

# **ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE CON ESPUMA EXPANSIVA A BASE DE PAVIMENTO RECICLADO EN FRÍO**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

El asfalto modificado con espuma expansiva es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo diferente a las convencionales, la estructura del pavimento modificado es muy parecido al de las mezclas tradicionales con la excepción que se debe considerar la humedad de la mezcla y éstas serán mezclas en frío para así poder mejorar las condiciones de resistencia de las bases de los pavimentos existentes, construidos con materiales de menor calidad que los requeridos por las Normas bolivianas, y que hoy se encuentran en un considerable estado de deterioro.

En Bolivia actualmente no se aplican métodos de reciclado de pavimento y tampoco se modifica el pavimento para poder alcanzar mayores valores en su resistencia y así evitar las tempranas fallas en la estructura de la carpeta asfáltica, existen antecedentes en otros países como en Cuba que no son muy desarrollados donde mediante la reutilización de sus materiales logra una nueva capa de pavimento flexible donde lo llama pavimento espumoso, al cual se le adiciona un porcentaje de agua a una mezcla asfáltica al 160 grados centígrados.

El autor en este trabajo pretende poder determinar el comportamiento de la resistencia del pavimento flexible con espuma expansiva reciclado en frío para que pueda cumplir su periodo de vida útil y no presente deterioros, fisuras, desgastes, etc. Se pretende satisfacer la estabilidad Marshall para el diseño del pavimento con algunas modificaciones al adherir la espuma expansiva para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Este trabajo está basado en una síntesis de una amplia bibliografía sobre la espuma expansiva el diseño de mezclas y la aplicación de esta tecnología, la bibliografía se complementa con un estudio de laboratorio para dar solución a problemas de los

pavimentos convencionales en su diseño que no cumple con lo establecido o solicitado, esta técnica cuyo objetivo fundamental es transformar un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar.

El costo de la construcción del pavimento es muy elevado por este motivo se pretende reciclar el pavimento para reducir el uso de los recursos económicos en la reposición de la carpeta este método pretende dar solución a los problema tempranos en los caminos y carreteras evitando el deterioro del suelo y sub suelo se pretende evitar los impactos ambientales que genera la reposición de pavimento, se desea brindar mayor comodidad y bienestar a los usuarios, en la actualidad es un una necesidad muy importante contar con buenas vías, caminos, carreteras para contribuir al desarrollo económico social y ambiental de nuestro país.

## **1.1 ANTECEDENTES**

En los últimos años, en un mundo cada vez más contaminado y con un deterioro creciente del medio ambiente, la preservación de los recursos naturales se ha convertido en una preocupación general de todos los sectores productivos del mundo.

El asfalto reciclado con espuma expansiva es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo diferente a las convencionales, teniendo en cuenta el fenómeno de la formación de espuma cuando la humedad de los agregados entra en contacto con el asfalto caliente es considerado una falla constructiva, la estructura del pavimento modificado es muy parecido al de las mezclas tradicionales. Aun así este fenómeno producido intencionalmente y manejado en forma adecuada puede proporcionar muchas ventajas, como eficiencia en la pavimentación, fácil reciclado de pavimentos viejos, mejor adaptabilidad a cualquier tipo de agregado, menor costo e impacto ambiental debido a un considerable ahorro energético.

Sin embargo, en el ámbito internacional el asfalto espumado fue ampliamente investigado. El método fue desarrollado en los Estados Unidos por un profesor universitario.

El profesor Ladis Csanyi de la universidad de Iowa en USA, demostró que el asfalto espumado podría ser muy útil. El demostró que se podría mezclar el asfalto caliente con agregados húmedos y fríos si primeramente se espumaba el asfalto. El profesor Csanyi usó vapor de agua como un medio para introducir agua dentro de un asfalto caliente. Hubo poco interés en el nuevo proceso, hasta que en 1968 Mobil Oil (actualmente Mobil) adquirió la patente del invento y realizó mayor investigación en el tema, principalmente modificó el procedimiento original, agregando agua fría en lugar de vapor y desarrollo una serie de investigaciones relacionadas a la optimización del proceso. El vencimiento de los derechos sobre la patente del espumado derivó en una explosión de avances en el tema en los años 90s. Diversos estudios internacionales han determinado parámetros para mejorar la eficiencia del proceso relacionados con: Temperatura del asfalto, presión de espumado del asfalto, viscosidad del asfalto, tamaño del recipiente donde se espuma en laboratorio, banda Granulométrica, utilización de Filler, contenido de RAP, Cantidad de finos y algunos estudios de contenido óptimo de asfalto.

A diferencia de las mezclas con asfalto espumado, las mezclas con emulsión han sido ampliamente investigadas y aplicadas por diversas instituciones, encargadas de la administración de caminos y carreteras.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de técnicas modernas especialmente desarrolladas para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas constructivas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento.

El autor en este trabajo pretende determinar el comportamiento de la resistencia del pavimento flexible reciclado en frío con espuma expansiva deliberadamente y en condiciones controladas. Se pretende realizar briquetas para satisfacer la estabilidad

Marshall para el diseño del pavimento con algunas modificaciones al adherir la espuma expansiva para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Se brindará a la universidad un equipo sencillo para realizar experimentalmente el ensayo de espumado de asfalto, con diferentes porcentajes de inyección de agua y a diferentes temperaturas. Además de datos que sirvan como parámetros de los resultados que se puedan obtener de este ensayo.

Este trabajo está basado en una síntesis de una amplia bibliografía sobre la espuma expansiva el diseño de mezclas y la aplicación de esta tecnología, la bibliografía se complementa con un estudio de laboratorio para dar solución a problemas de los pavimentos convencionales en su diseño que cumple con lo establecido o solicitado, teniendo esta técnica como objetivo fundamental es transformar un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar, tomando en cuenta el costo elevado de la construcción por este motivo se pretende reciclar el pavimento para reducir el uso de los recursos económicos en la reposición de la carpeta este método pretende dar solución a los problema tempranos en los caminos y carreteras evitando el deterioro del suelo y sub suelo se pretende evitar los impactos ambientales que genera la reposición de pavimento, se desea brindar mayor comodidad y bienestar a los usuarios, en la actualidad es un una necesidad muy importante contar con buenas vías, caminos, carreteras para contribuir al desarrollo económico social y ambiental de nuestro país.

### **1.3 SITUACIÓN PROBLÉMICA**

El principal problema en el pavimento flexible es el rápido deterioro debido al mal uso de sus propiedades al no tener un estudio minucioso de sus características que afectan directamente a la resistencia del pavimento, el mal uso de un pavimento empleado como mezcla asfáltica en frío provoca: desgaste, hundimiento, exudación, agrietamiento, corrugación, ahuellamiento, meteorización de los agregados, lavado de finos lo cual provoca que el deterioro no sea progresivo.

La resistencia del pavimento es muy importante en la construcción de una calle camino o carretera ya que si no tuviéramos esta propiedad a partir de una buena dosificación

de los materiales y las mejores características del cemento asfáltico el colapso sería inminente por la mala capacidad portante de la carpeta asfáltica, la cual no cumpliría con sus funciones respectivas.

Al contar con desgaste prematuro en los pavimentos que fueron diseñados originalmente para flujo vehicular bajo se deben tomar medidas inmediatas de reposición del pavimento, teniendo en cuenta el alto costo de la rehabilitación para así poder brindar una mayor comodidad a los usuarios, se debe investigar nuevos métodos para economizar y obtener mejores durabilidad en la carpeta asfáltica.

El problema de construir un tramo de pavimento y a corto tiempo reemplazar ese pavimento por uno nuevo provoca grandes deterioros a suelo y sub suelo y debemos evitar todos esos impactos ambientales a través de nuevas tecnologías menos contaminantes como el método de la espuma expansiva que se ve influenciada en la resistencia del pavimento que produce desgaste, hundimiento, agrietamiento lavado de finos, etc.; que condicionan la estabilidad de la estructura.

#### **1.4 DETERMINACION DEL PROBLEMA**

¿CUÁL ES EL EFECTO QUE TIENE LA RESISTENCIA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, CUANDO EN LA REUTILIZACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO, SE APLICA LA TÉCNICA DE LA ESPUMA EXPANSIVA?

#### **1.5 OBJETIVOS**

##### **1.5.1 GENERAL:**

Determinar el efecto de la resistencia en mezclas asfálticas en frío re utilizadas con el método de espuma expansiva en pavimento flexible variando la temperatura y el porcentaje de agua de acuerdo a la investigación, para obtener las características mecánicas mejoradas, así poder comparar y satisfacer la estabilidad Marshall.

##### **1.5.2 ESPECÍFICOS:**

- Estudiar los métodos y parámetros requeridos por el diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión y espuma expansiva adquiriendo factibilidad para la reproducción en laboratorio.

- Diseñar y fabricar una cámara de expansión en el laboratorio.
- Transformar un firme degradado de pavimento flexible en una estructura homogénea y adaptarlo al tráfico que debe soportar
- Especificar el proceso físico para poder inyectar una cantidad de agua fría y aire comprimido al cemento asfáltico en condiciones controladas para optimizar el desarrollo de la espuma expansiva.
- Determinar las propiedades de las mezclas asfálticas en frío desarrollando el método Marshall modificado.
- Analizar la resistencia del pavimento de la relación de mezclas en frío con emulsión y con espuma expansiva.

## **1.6 HIPOTESIS**

Por medio de un análisis de la técnica de la espuma expansiva, se alterará temporalmente la estructura del asfalto reduciendo su viscosidad del conjunto agua-aire-asfalto permitiendo mezclar el material re utilizado con diferentes porcentajes de espumado, produciendo así una mezcla asfáltica en frío obteniendo distintos valores de sus propiedades mecánicas que permitan obtener mejoras en su resistencia.

## **1.7 ALCANCE**

Se reciclará el pavimento flexible a través del método de reciclado en frío.

Se determinará si las mezclas asfálticas re utilizadas con espuma expansiva satisfacen los requerimientos mínimos deseados de acuerdo a especificaciones de las mezclas asfálticas en frío.

Se elaborará un esquema de un equipo sencillo que sirva para el espumado de asfalto que podrá ser mezclado con agregados reciclados de características ya conocidas.

Dentro del “*ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE CON ESPUMA EXPANSIVA A BASE DE PAVIMENTO RECICLADO EN FRÍO*” se:

- Conseguirán agregados ya conocidos y utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas en frío para su caracterización.
- Conseguirá una muestra del cemento asfáltico actualmente usado para la elaboración de mezclas asfálticas para su caracterización.
- Realizara ensayos de laboratorio para determinar la cantidad de agua exacta y temperatura óptima del cemento asfáltico para la producción de espuma expansiva, y se verificará si las características resultantes entran en los rangos sugeridos.
- Realizará el reciclado del pavimento flexible en el laboratorio utilizando el diseño de mezclas en frío.
- Fabricará un equipo sencillo que permita crear la espuma expansiva para mezclar con un pavimento asfáltico reciclado y frezado.
- Creará espuma expansiva de un cemento asfáltico, en condiciones ideales de temperatura y contenido de humedad, para fabricar briquetas que sean sometidas a pruebas Marshall.
- Realizará ensayos Marshall de diseño de mezclas asfálticas en frío con espuma expansiva para definir y compararán las propiedades entre todas las obtenidas.

Finalmente, se presentarán los resultados de las características mecánicas de las mezclas asfálticas en frío usando el método de espuma expansiva, en una comparación con sus propiedades obtenidas mediante su distinta dosificación.

## 1.8 DEFINICIÓN DE VARIABLES

- **VARIABLES INDEPENDIENTES**

- Espuma expansiva
- Pavimento asfáltico reciclado
- Agregados
- Emulsión
- Contenido de humedad de mezcla

- **VARIABLES DEPENDIENTES**

- Densidad
- Porcentaje de vacíos
- Estabilidad
- Fluencia

### DEFINICION DE VARIABLES

**Espuma expansiva.-** Conjunto agua-aire-asfalto que funciona como un ligante expandido, producido por un proceso mecánico.

**Pavimento asfáltico reciclado.-** Capa de rodadura en mal estado extraída de caminos, calles, carreteras deteriorados que tuvieron alguna falla estructural.

**Agregados.-** La base para el diseño de mezclas asfálticas, se sub divide en piedra triturada, grava triturada, agregado fino (arena, filler).

**Emulsión.-** Mezcla de asfalto con emulsificantes que con el agua forman una emulsión estable que permite tender las carpetas asfálticas "en frío", es decir, a temperatura ambiente.

**Contenido de humedad de mezcla.-** cantidad o porcentaje de agua que se adhiere a los agregados para poderlos mezclar a temperatura ambiente.

## DEFINICIÓN OPERACIONAL

Variable	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Espuma expansiva	Porcentaje de agua añadido	se variara el porcentaje entre 1 a 3% en intervalos de 0,4% del peso del cemento asfáltico	inyectar agua para producir la expansión
	Tempera de espumado más favorable	temperatura de 140 a 180°C con intervalos de 10°C	cambiar la temperatura
Agregado	agregado mineral	Mezcla en frio con emulsion	docificar de acuerdo a las especificaciones ASTM
	reciclado de pavimnto flexible (RAP)	Mezcla reciclada con el metodo de espuma expansiva	Docificar de acuerdo a las especificaciones de la investigacion
Emulsion	cantidad de residuo asfáltico optimo	CRS-2H variara de 6,9% a 10,9% en intervalos de 1%	especificaciones de la norma AASTHO
Propiedades mecanicas	Densidad	no mayor al 50%	(Especificaciones de la Norma AASTHO)
	Porcentaje de vacios	procedimiento Marshall, Metodo A0613	
	Estabilidad	Mínima de 500lbs a 50 golpes.	
	Fluencia	tasa de deformacion 0,25mm a 50 golpes	

## **1.9 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.9.1 COMPONENTES**

#### **Unidad de estudio y decisión muestral.**

**Unidades de estudio.-** Propiedades del pavimento flexible, (RESISTENCIA)

**Población.-** Reciclado en frío de pavimento flexible con el método de espuma expansiva.

**Muestra.-** Cantidad en porcentaje, de asfalto espumado empleado para diseñar mezclas asfálticas en frío.

**Muestreo.-** Para la selección de la muestra se analizará el cemento asfáltico que cumpla con las especificaciones del fabricante para posteriormente formar el conjunto agua aire asfalto que dará como resultado la espuma expansiva utilizando su comportamiento más óptimo.

### **1.9.2 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

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

El método utilizado para este trabajo de investigación será correlacional mediante el cual estudiaremos, seleccionaremos, agruparemos las variables a analizar, así estudiar las propiedades mecánicas del pavimento flexible reciclado en frío adhiriendo espuma expansiva para poder mejorar su resistencia característica y cumpla con la estabilidad Marshall.

Se empleará el método de reciclado de pavimento flexible en frío con espuma expansiva, con material de la carpeta asfáltica que por algún motivo ha perdido alguna de sus propiedades iniciales como ser: Cohesión, textura, composición, geometría o ya cumplió su periodo útil.

Se estudiará todos los ensayos necesarios para la caracterización del asfalto espumado, agregados, carpeta asfáltica reciclada y emulsión.

Se analizará con los resultados la vida útil con relación a la expansión del pavimento reciclado.

De acuerdo a las técnicas empleadas nos permitirá obtener la resistencia del pavimento flexible re utilizado con espuma expansiva para poder realizar las comparaciones pertinentes de las propiedades de estas mezclas.

- **Técnicas de muestreo**

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

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

Elección de todos los materiales y equipos a utilizar:

-Equipo diseñado y construido por el alumno a cargo del proyecto, para poder inyectar los contenidos de agua y aire al cemento asfáltico para espumar.

-Termómetro de alta temperatura.- para poder controlar la temperatura y termómetro laser.

-Pavimento para reciclar obtenido del re bacheo en las calles céntricas de la ciudad de Tarija

**MÉTODO MARSHALL**

-Una máquina para la aplicación de carga vertical con una capacidad de 2724 kg.

-Moldes para la preparación de la muestra de 10cm de diámetro interior.

-Un sujetador de molde para facilitar la compactación.

-Un martillo o pisón

-Dispositivo para las pruebas de estabilidad que se encuentra en el laboratorio de suelos.

-moldes para fabricación de briquetas que tiene una dimensión de 4 pulgadas de diámetro y una altura de 2,1/2 pulgadas de altura

-Máquina de desgaste de los ángeles.

-tamices

-horno

-esfera de acero

**Se realizará los siguientes ensayos previos:**

Granulometría (ASTM C-71).

- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95).
- Equivalente de la arena y agregados finos (ASTM D 2419)
- Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles (ASTM C-131).
- Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM D-128).
- Peso específico y absorción agregado grueso (ASTM D-127).
- Partículas planas y alargadas (ASTM D-4791).

- Límites de Attemberg.
- Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102).
- Ensayo de penetración (ASTM D-5).
- Ensayo de ductilidad (ASTM D-113).
- Ensayo de punto de inflamación (ASTM D-92).
- Ensayo de peso específico (ASTM D-70).
- Método Marshall (ASTM D-1559).
- Ensayo de estabilidad y flujo.

Todos estos métodos aplicados en este trabajo de investigación están detallados en el siguiente capítulo

De todos los instrumentos y materiales a utilizar se tomara en cuenta los errores personales o del instrumento que se pueden presentar en la obtención de datos.

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

Una vez realizada la preparación del material y equipo a utilizar y teniendo una un profundo y amplio estado de conocimiento se creará el banco de pavimento para reciclar que será obtenido del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado, en el banco se tendrá todos los materiales necesarios, se obtendrá la caracterización de los agregados, y para la fabricación de las briquetas y los ensayos mencionados anteriormente.

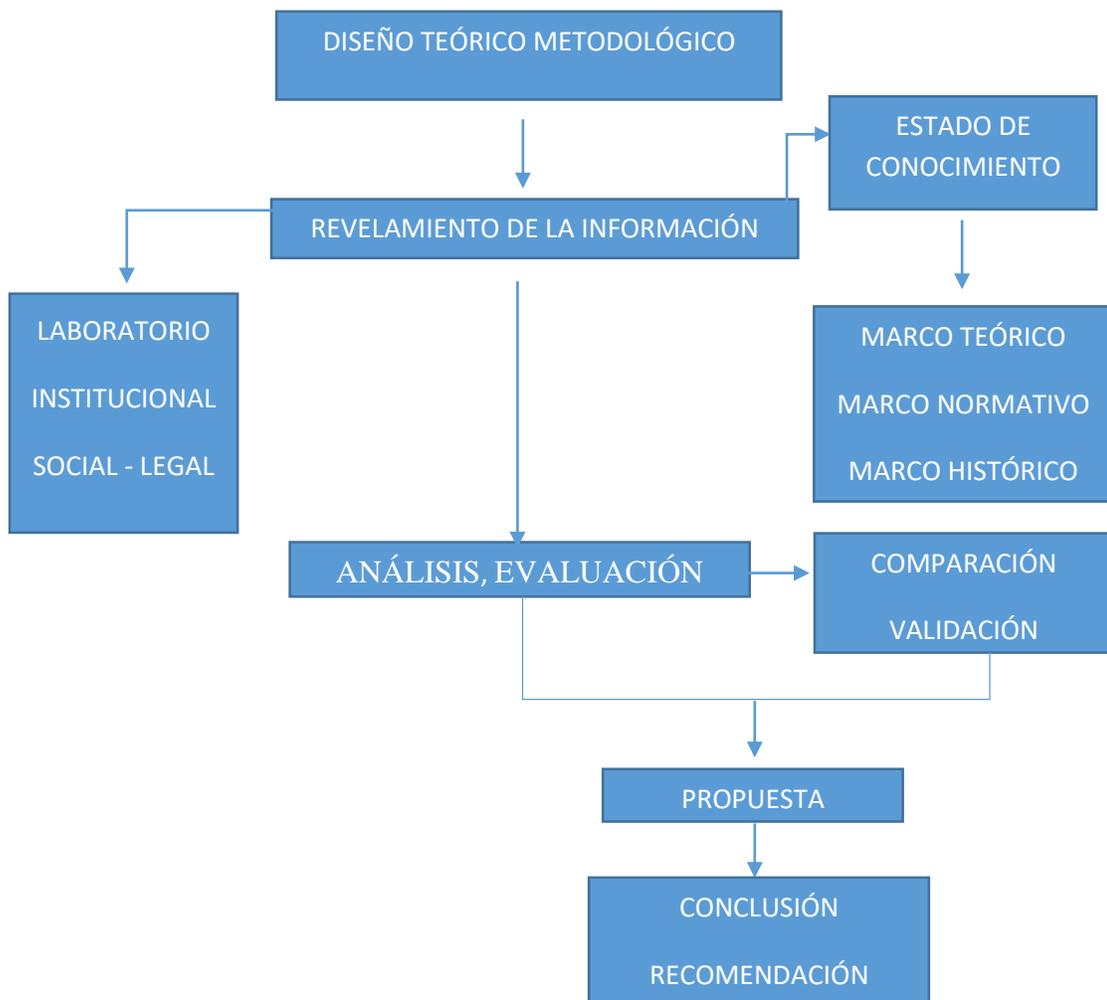
Este proceso se logrará sin aplicación de calor, se espumará el pavimento reciclado dosificando cantidades de espuma entre un rango del 2 a 4% del peso de la muestra sugerido por la bibliografía con un contenido óptimo de humedad al 75% a reciclar, variando cada 0,4%, se espumará el cemento asfáltico con la sencilla máquina fabricada, se variara los porcentajes de agua 5 veces y con 5 diferentes temperaturas para cada cantidad de agua. Se detalla este proceso en el capítulo III. Se fabricará 5 briquetas con cada porcentaje de espumado las cuales suman un total de 25 briquetas a analizar con pavimento reciclado con espuma expansiva se determinara los valores de las propiedades mecánicas del pavimento y se obtendrá las resistencias Marshall, se coloca en los moldes con una capacidad de 1200 gramos de mezcla.

La temperatura del cemento asfáltico será la misma con la que compactaremos (temperatura ambiente).

Se procederá al compactado de las briquetas.

Se obtendrá los datos a analizar, comparar y analizar con los que comprobaremos con mezclas en frío con emulsión. Con la cual comprobaremos nuestra hipótesis y cumpliremos con los alcances de esta investigación.

- **Esquema lógico estructural del proyecto**



- **Tratamiento estadístico**

Tratamiento estadístico a ejecutarse:

**Procedimiento para el análisis e interpretación de la información:**

Tenemos seleccionado que la investigación que realizaremos es de Estadística explicativa No Probabilística.

Para la evaluación y validación de nuestra investigación utilizaremos la estadística cuyas fórmulas son las siguientes:

- **Media.**- Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable. Suma de los valores dividido por el tamaño muestra.

Conveniente cuando los datos se encuentran simétricamente con respecto a ese valor.

Muy sensible a valores extremos. Centro de gravedad de los datos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

- **Mediana.**-Es un conjunto de datos ordenados de menor a mayor, a mediana corresponde al dato central. Aquél que deja un 50% de la información bajo él y el otro 50% es mayor o igual. Es un valor que divide a las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos. Si el número es de datos par, se elige la media de los datos centrales.

Es conveniente cuando los datos son asimétricos. No es sensible a valores extremos.

$$Me = \begin{cases} \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)}}{2}, & \text{si } n \text{ es par} \\ x_{(\frac{n+1}{2})}, & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

- **Moda.**-Es el /los valor/valores donde la distribución de frecuencias alcanza un máximo.
- **Desviación estándar.**-Es la raíz cuadrada de la varianza es la más usada de las medidas de dispersión.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES Y DEFINICIONES SOBRE EL CEMENTO ASFÁLTICO, EMULSIONES ASFÁLTICAS, AGREGADOS, MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADAS, ASFALTO ESPUMADO Y ENSAYO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS EN FRÍO.**

#### **2.1 EL CEMENTO ASFÁLTICO**

##### **2.1.1 DEFINICIÓN**

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

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

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

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

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

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

### **2.1.2 REFINACIÓN DEL PETROLEO CRUDO PARA LA OBTENCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

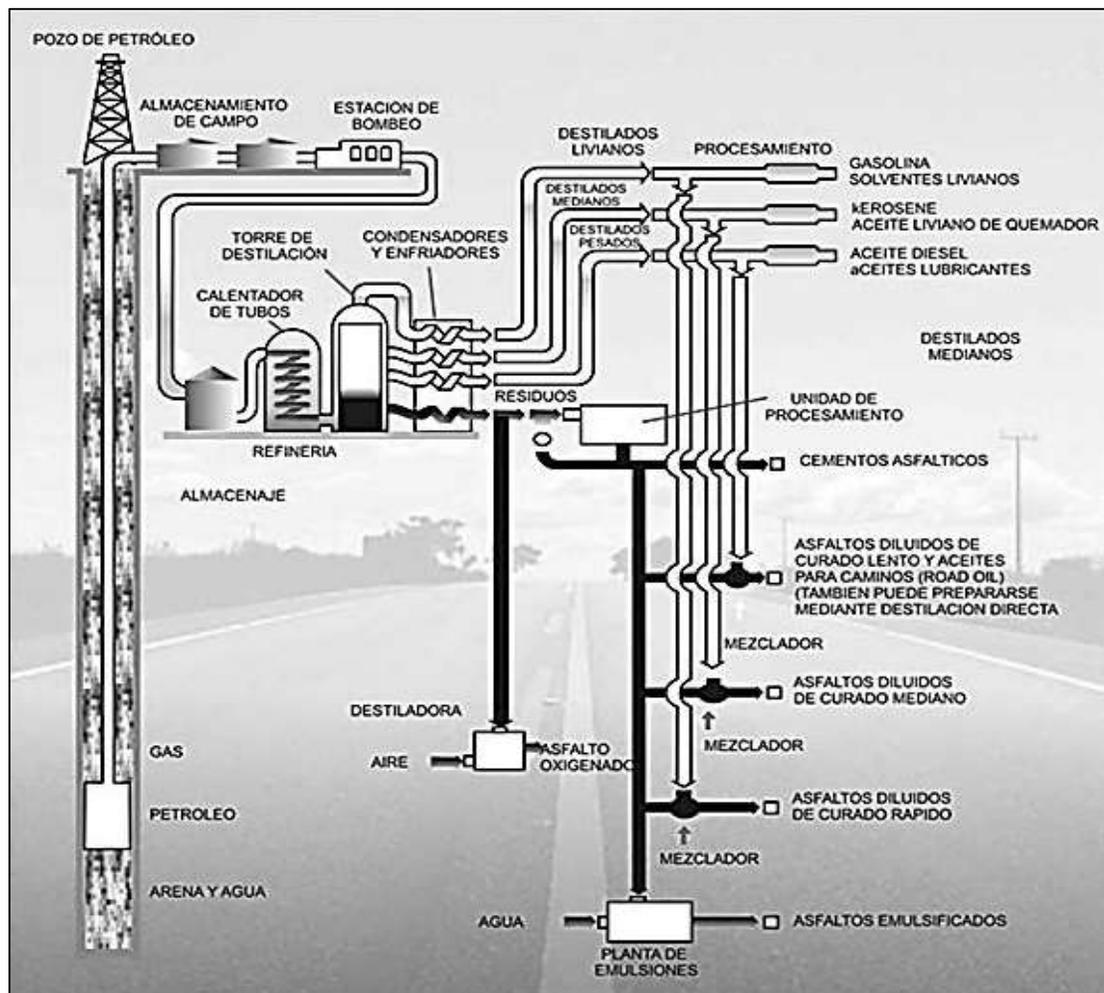
El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. El diagrama del proceso para la extracción del asfalto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

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

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

## Diagrama del proceso para la extracción del asfalto

Figura 2.1



(Fuente: “<http://asfaltoenobractivil.blogspot.com/2012/07/5-obtencion-del-asfalto-en-refinerias.html>”)

### 2.1.3 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR EL CEMENTO ASFÁLTICO

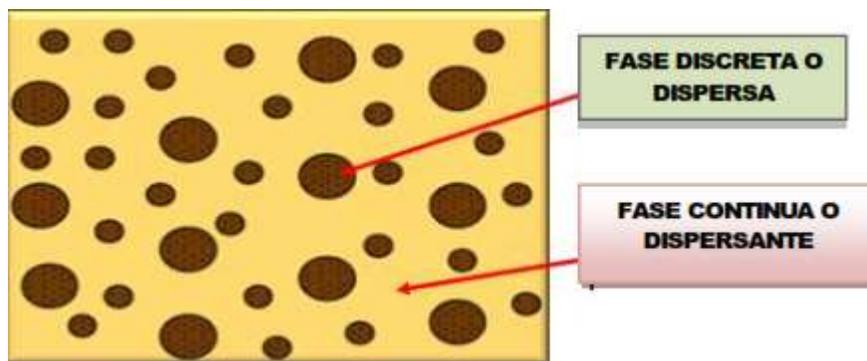
- ENSAYOS DE VISCOSIDAD
- ENSAYOS DE PENETRACIÓN
- ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN
- ENSAYO DE DUCTILIDAD

## 2.2 EMULSIONES ASFÁLTICAS

### 2.2.1 GENERALIDADES

Se define una emulsión como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la Figura 2.2, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

**Figura 2.2 Diagrama de una emulsión**



Generalmente el tamaño de la fase discreta tiene alguna dimensión lineal entre 1 nanómetro y 1 micra. Son estos tamaños tan pequeños los que dan a las emulsiones sus importantes e interesantes propiedades. La ciencia que trata con las emulsiones es multidisciplinaria, ya que involucra física, química, biología, etc. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

Existen varios tipos de dispersiones de partículas de diferentes tamaños en diferentes tipos de medios; es entre estas dispersiones que se encuentran las emulsiones, las cuales como ya se mencionó son dispersiones de un líquido en otro. En el siguiente cuadro se muestran los diferentes tipos de suspensiones que existen.

**Tabla 2.1 Tipos de dispersiones**

<b>FASE CONTINUA</b>	<b>FASE DISCRETA</b>	<b>SISTEMA</b>
<b>GAS</b>	LIQUIDO	<b>AEROSOLES, NIEBLA, ROCIO</b>
<b>GAS</b>	SOLIDO	<b>SMOKE, AEROSOL</b>
<b>LIQUIDO</b>	GAS	<b>ESPUMA</b>
<b>LIQUIDO</b>	LIQUIDO	<b>EMULSION, SOLUCION COLOIDAL</b>
<b>LIQUIDO</b>	SOLIDO	<b>SOL, SOLUCION COLOIDAL</b>
<b>SOLIDO</b>	GAS	<b>ESPUMAS SOLIDAS(Piedra poma), ZEOLITAS</b>
<b>SOLIDO</b>	LIQUIDO	<b>GEL, EMULSION SOLIDA</b>
<b>SOLIDO</b>	SOLIDO	<b>ALEACION</b>

**Fuente:** Manual serie 19 Instituto del Asfalto

**Definición de emulsión asfáltica:** Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto con emulsificantes que con el agua forman una emulsión estable que permite tender las carpetas asfálticas "en frío", es decir, a temperatura ambiente.

### **2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS**

Podemos mencionar que existen dos tipos de emulsiones:

- Emulsiones formadas por macromoléculas en solución (sistemas de una fase)
- Emulsiones formadas por materia finamente dividida (sistema de 2 o más fases)

Las podemos dividir en:

- Liofílicas; si la partícula no repele el solvente
- Liofóbicas; si la partícula repele el solvente.

Si el medio es agua, entonces:

- Liofílico = Hidrofílico y Liofóbico = Hidrofóbico.

Las emulsiones liofílicas son verdaderas soluciones (desde el punto de vista termodinámico), por lo que no es fácil hablar de la superficie de la emulsión.

Por el contrario, para emulsiones liofóbicas, debido a la diferencia de fases entre las partículas en la emulsión y el medio donde se encuentran dispersas, no existe ningún problema para definir la superficie de la emulsión. Por lo tanto, el concepto de superficie sólo es aplicable a sistemas multifásicos.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de estabilizador usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas:

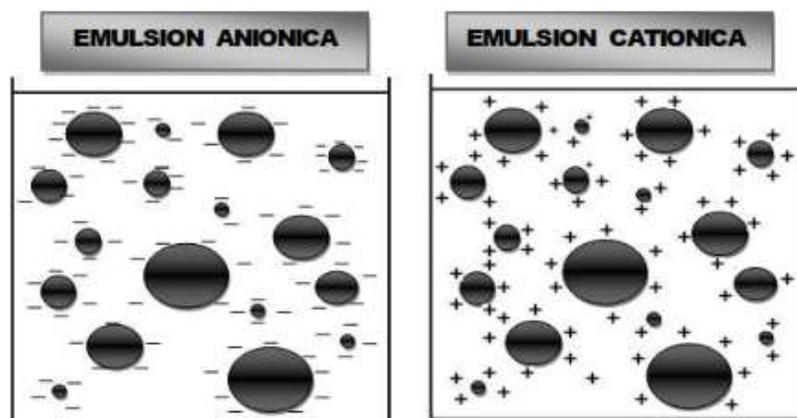
**a) Emulsiones Aniónicas:**

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa

**b) Emulsiones Catiónicas:**

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva

**Figura 2.3 Representación Pictórica**



FUENTE. Doc. Técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte.

**Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:**

**1) De Rompimiento Rápido:**

Estas se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos (con excepción de la emulsión conocida como ECR-60), la cual no se debe utilizar en la elaboración de estas últimas.

**2) De Rompimiento Medio:**

Estas normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

**3) De Rompimiento Lento:**

Estas se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

**4) Para Impregnación:**

Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.

**5) Súper Estables:**

Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos.

Según el contenido de asfalto en la emulsión, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se muestra en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Clasificación de emulsiones**

CLASIFICACION	CONTENIDO DE ASFALTO (% EN MASA)	TIPO DE ROMPIMIENTO	POLARIDAD
EAR - 55	55	RAPIDO	ANIONICA
EAR - 60	60	RAPIDO	ANIONICA
EAM - 60	60	MEDIO	ANIONICA
EAM - 65	65	MEDIO	ANIONICA
EAL - 55	55	LENTO	ANIONICA
EAL - 60	60	LENTO	ANIONICA
EAI - 60	60	PARA IMPREGNACION	ANIONICA
ECR - 60	60	RAPIDO	CATIONICA
ECR - 65	65	RAPIDO	CATIONICA
ECR - 70	70	RAPIDO	CATIONICA
ECM - 65	65	MEDIO	CATIONICA
ECL - 65	65	LENTO	CATIONICA
ECI - 60	60	PARA IMPREGNACION	CATIONICA
ECS - 60	60	SOBRE - ESTABILIZADA	CATIONICA

**FUENTE:** Manual Serie – 19. Instituto del Asfalto.

## **2.3 AGREGADOS PARA EL USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.3.1 GENERALIDADES**

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

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

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

## **2.3.2 TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.3.2.1 AGREGADO GRUESO**

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

### **2.3.2.2 PIEDRA TRITURADA:**

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

El producto triturado puede ser tamizado para obtener el tamaño del agregado deseado. Algunas veces, por razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado “triturado sin cribar”, en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos.

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

### **2.3.2.3 GRAVA TRITURADA:**

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

### **2.3.2.4 AGREGADO FINO**

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

- **Arena:**

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

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

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

- **Filler:**

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

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

### **Grados Estándar Del Filler Mineral**

Tabla 2.3

<b>Filler Mineral</b>			
<b>Tamiz</b>	#30	#100	#200
<b>% que pasa</b>	100	90-100	65-100

El polvo mineral es usado principalmente como filler para la mezcla de asfalto en caliente. Es la parte de los áridos que pasa por el tamiz N°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 está mojado.

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

### 2.3.3 ENSAYOS DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

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

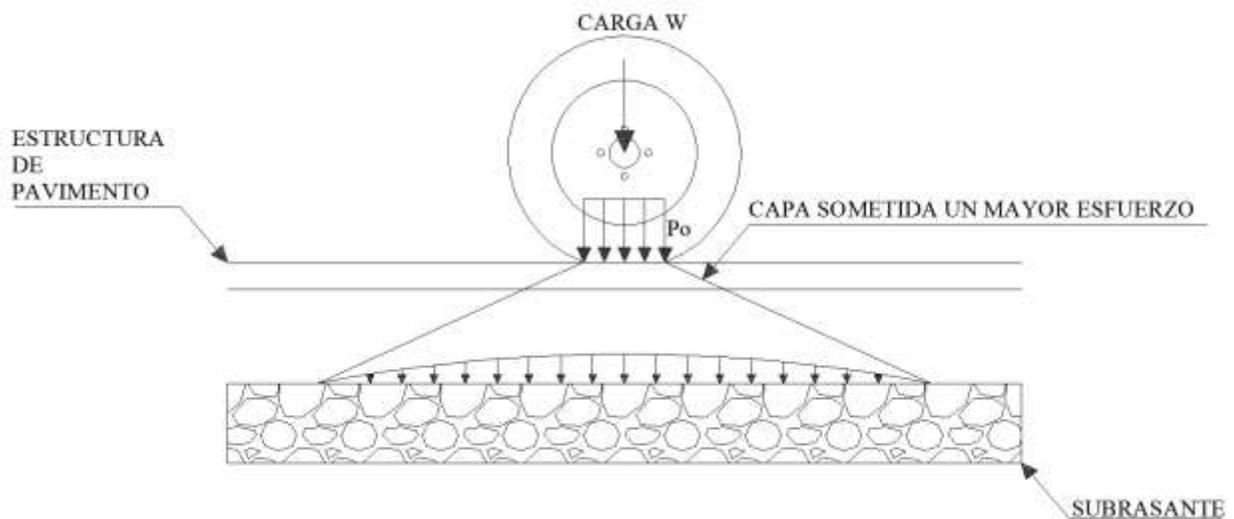
Los áridos se emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezcla de usos muy diversos. Como los áridos constituyen normalmente el 90% al 95% en peso de las mezclas asfálticas sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado. Los áridos más empleados son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

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

El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores donde las cargas resultan disipadas o no son tan concentradas como se puede observar en la figura 2.4.

#### Distribución de esfuerzos

Figura 2.4



## **2.4 MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO**

### **2.4.1 DEFINICIÓN**

Una mezcla asfáltica en general es una combinación de emulsiones y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes o pavimentos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente para el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

La mezcla tiene que ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, elevadas temperaturas, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Cada una de estas y otras propiedades deseables de las mezclas en frío.

Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para obtener una adecuada trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como la emulsión deben tener el contenido óptimo de humedad antes del mezclado, de ahí el término “Mezcla Asfáltica en frío”.

Con la finalidad de que la mezcla tenga la suficiente trabajabilidad, existen métodos alternativos de producción de mezclas sin necesidad de calentar los ingredientes, puede ser con emulsiones asfálticas, o la alternativa que se plantea en el presente proyecto de investigación.

### **2.4.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **2.4.2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados

incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la 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.

#### **2.4.2.2 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: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión.

#### **2.4.2.3 MEZCLAS POROSAS DRENANTES**

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos, con asfaltos normales, se aplican

en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón. Utilizadas como mezclas en caliente para tráficos de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm., se consigue que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

#### **2.4.2.4 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 microaglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones. Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor. Hay microaglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

#### **2.4.2.5 MASILLAS**

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

#### **2.4.2.6 MEZCLAS DE ALTO MÓDULO**

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

## 2.4.3 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.4.3.1 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 fórmula (que se detalla a continuación) el peso específico del agregado grueso y el agregado fino se utiliza el peso específico masivo (bulk), y para el filler se usa el peso específico aparente, por lo tanto la fórmula de peso específico promedio, del agregado mineral es la siguiente:

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

(Ec. 2.1 Peso específico de los agregados)

Donde:

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

$PA$ : Peso total expresado en porcentaje

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

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

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

#### **2.4.3.2 DENSIDAD MÁXIMA REAL DE LA MEZCLA (gr/cm<sup>3</sup>)**

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:

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

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

Donde:

*Dr*: Densidad real de la mezcla (briqueta)

*PB*: Peso de la briqueta sin parafina

*VP*: Volumen de la briqueta sin parafina

#### **2.4.3.3 DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (gr/cm<sup>3</sup>)**

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

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

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

**(Ec. 2.3 Densidad Máxima Teórica)**

Donde:

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

*%C.A.*: Porcentaje de cemento asfáltico

*GCA*: Peso específico de cemento asfáltico

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

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

#### **2.4.3.4 VACIOS DE LA MEZCLA (%)**

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido

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

Por lo tanto, como ya se indicó los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos esta entre 3 y 5 % dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

$$Vm(\%) = \frac{Dmt - Drm}{Dmt} * 100$$

**(Ec. 2.4 Vacíos de la Mezcla)**

Donde:

*Vm*: Vacíos de la mezcla compactada

*Dmt*: Densidad máxima teórica

*Drm*: Densidad real promedio

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

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

#### **2.4.3.5 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 densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.

#### **Distribución de volúmenes en una mezcla asfáltica**

Figura 2.5



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

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

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

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

#### **Valores recomendados para los V.A.M.**

Tabla 2.4

<b>Tamices Standard</b>		<b>Tamaño Nominal de la partícula</b>		<b>Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento</b>
<b>Standard (mm)</b>	<b>Alternativo</b>	<b>Mm</b>	<b>Plg.</b>	
1.18	N° 16	1.18	0.0469	23.5
2.36	N° 8	2.36	0.093	21.0

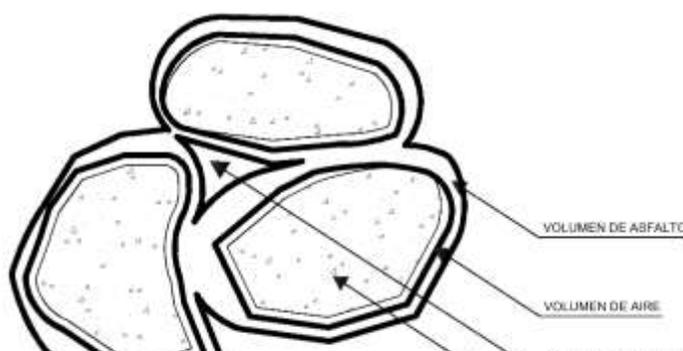
4.75	N° 4	4.75	0.187	18.0
9.50	3/8	9.50	0.375	16.0
12.50	1/2	12.50	0.5	15.0
19.00	3/4	19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM como se detalla en el cuadro anterior los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

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

### Diagrama de partículas en la mezcla asfáltica

(Figura 2.6)



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

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

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$VAM (\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

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

Donde:

*VAM* (%): Vacíos del agregado mineral

*Vm*(%): Vacíos de la mezcla compactada

*CA*(%): Porcentaje de cemento asfáltico

*GCA*: Peso específico del cemento asfáltico

*D<sub>rm</sub>*: Densidad real promedio

Bajo ninguna circunstancia se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que estas variaciones se deben sobrepasar, sólo bajo condiciones extremas, a menos que el

comportamiento, con combinaciones específicas de agregados muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica.

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

#### **2.4.3.6 RELACIÓN BETUMEN VACÍOS (%)**

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

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

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

**(Ec. 2.6 Relación Betumen-Vacíos)**

Donde:

*RBV*(%): Relación betumen vacíos

*VAM*(%): Vacíos del agregado mineral

*Vm*(%): Vacíos de la mezcla compactada

#### **2.4.3.7 ESTABILIDAD DE LA MEZCLA (Lb)**

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

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

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

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

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

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

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

#### **2.4.3.8 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.

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

Para la elaboración de asfaltos espumados, no se realizó ningún estudio que relaciones ambas propiedades mecánicas y de esta manera poder hacer una evaluación de su factibilidad como método de fabricación de asfaltos, que pueda salvar los problemas suscitados durante la fabricación de un asfalto tradicional como es la pérdida de la temperatura de la mezcla antes del proceso de compactación.

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

## **2.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS, ASFALTO ESPUMADO**

### **2.5.1 INTRODUCCIÓN Y ORIGEN**

#### **2.5.1.1 INTRODUCCIÓN**

El tratamiento de materiales con asfalto espumado es una técnica que utiliza procesos constructivos especializados y de alto rendimiento, que permite para elaborar mezclas capaces de ser empleadas en la construcción de nuevos pavimentos, el reciclado en frío y en la estabilización de suelos.

El tratamiento que se realiza en la cámara mezcladora de la máquina de estabilización utilizada para fabricar capas con asfalto espumado, incluye la expansión del asfalto líquido y el mezclado con el material proveniente del pulverizado del camino viejo, o del agregado disponible para la nueva capa. El asfalto expandido tiene mayor potencial de cobertura que el estado líquido, dado su mayor volumen, y produce un recubrimiento en el espesor más completo del material tratado.

Si bien es cierto, el asfalto espumado se ha masificado en los últimos 20 años, su utilización en Bolivia es aún incipiente y su estudio ha sido nulo.

La mezcla íntima que se produce entre asfalto y agregado es diferente, pero sin embargo, este tipo de mezclas tiene un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional. Las mezclas con asfalto espumado presentan ventajas especiales frente a mezclas tradicionales, entre éstas las más importantes son las del tipo constructivas, energéticas y ambientales.

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de técnicas modernas especialmente desarrolladas para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento. El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfáltico reciclados. Las mezclas con asfalto espumado pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en una planta central.

## **2.5.2 TECNICAS DE RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO**

### **2.5.2.1 RECICLADO IN SITU EN CALIENTE**

Se reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra. El firme se calienta mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado. Este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con

nueva mezcla. Finalmente, la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante procedimientos convencionales.

### **2.5.2.2 RECICLADO “IN SITU” EN FRÍO CON CEMENTO**

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

### **2.5.2.3 RECICLADO “IN SITU” EN FRÍO CON EMULSIONES BITUMINOSAS**

Esta técnica, que es la utilizada en los tramos que posteriormente estudiaremos y comentaremos, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables. El procedimiento usual y básico consiste fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- Fresado en frío de un cierto grosor del firme
- Mezclado del material obtenido con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos
- Extensión en obra de la nueva mezcla
- Compactación enérgica
- Curado de la capa reciclada
- Extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla en caliente

#### **2.5.2.3.1 TIPOS DE RECICLADO CON EMULSIÓN**

La técnica del reciclado con emulsión puede aplicarse a casi todos los tipos de pavimentos existentes y permite solucionar una variada gama de problemas, aunque no todos como ya se ha indicado. Por su repercusión en el diseño de la fórmula de trabajo conviene diferenciar el reciclado de los materiales tratados con ligantes asfálticos del resto, es decir, materiales no tratados o tratados con conglomerantes hidráulicos. La diferencia fundamental reside en la presencia en los primeros del ligante bituminoso, que debe ser tenida en cuenta tanto por su aporte a la cohesión final de la mezcla obtenida como por su posible efecto sobre la deformabilidad de ésta. Se establecen cuatro tipos de reciclado que son que se ven en la tabla siguiente:

Tabla 2.5

Tipo de reciclado  Características	Reciclado con emulsión asfáltica			Reciclado con un conglomerante hidráulico
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
Ligante	Emulsión de betún blando de penetración 180/220 o 80/100	Emulsión de betún blando o de betún regenerante	Emulsión de betún regenerante	Cemento, o conglomerante del tipo de escoria granulada, mezcla del conglomerante hidráulico + arena
Materiales reciclados provenientes del firme antiguo	3 o 4 cm de las capas bituminosas + capa de base (tratada o no tratada)	4 o 8 cm del pavimento bituminoso + capa de base, pero al menos el 75% proviene de las capas bituminosas	Solamente materiales bituminosos, incluyendo la interfaz	Todo o parte del pavimento bituminoso. Todo o parte de las capas de base. Eventualmente parte del soporte
Objetivo	Mejora de las características mecánicas y geométricas del firme utilizando en mayor o menor medida el firme antiguo, y eventualmente regeneración del betún en la Clase II		Reciclado del pavimento bituminoso con regeneración del betún	Construcción de una nueva capa hidráulica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• con o sin material de aportación</li> <li>• con o sin ensanche de la calzada</li> <li>• con o sin alcanzar el suelo de la explanada</li> <li>• con o sin eliminar la capa superficial</li> </ul>
Aplicación	Refuerzo estructural para tráfico bajo	Rehabilitación de capas superficiales		Refuerzo estructural importante con o sin ensanche de la calzada

#### 2.5.2.4 RECICLADO EN PLANTA

Este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales. Dadas todas las técnicas de conservación posibles, debe hacerse un análisis de cada una de ellas teniendo en

cuenta todos los condicionantes que las puedan afectar. Algunos de los más importantes serían:

- Coste. Cada técnica tendrá un cierto coste que hay que tratar de minimizar. El coste se puede considerar en términos económicos, sociales y medioambientales. – Experiencia. La empresa y los técnicos pueden tener más experiencia con una técnica que con otra, con lo que las garantías de éxito son diferentes en cada caso. – Equipos disponibles. La empresa debe tener disponibles los equipos humanos y materiales necesarios para poder utilizar una determinada técnica.
- Tiempo requerido de ejecución. El tiempo de entrega de la obra acabada puede ser determinante a la hora de elegir una técnica de conservación.
- Otros varios.

### **2.5.3 OBTENCIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO**

El asfalto espumado o ligante expandido es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 % y 4% sobre el peso de ligante) al asfalto caliente (140 °C a 180 °C) dentro de una cámara de expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de espuma en el asfalto. El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua que eleva la temperatura del agua a más de 100°C y la evapora instantáneamente, se crean burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto. Esta mezcla se libera a través de la boquilla y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto aumentando su volumen (de 12 a 20 veces mayor) que alcanza el equilibrio debido a la tensión superficial. Este proceso reduce la viscosidad del asfalto lo que permite el mezclado con los agregados humedecidos a temperatura ambiente. Sin embargo, este equilibrio dura menos de 1 minuto debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua. Una vez que el asfalto espumado llega a temperatura ambiente las burbujas de vapor colapsan por condensación y se desintegra la espuma. El asfalto recupera su volumen inicial.

### **2.5.4 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO**

Se sostiene que espumar el asfalto reduce la viscosidad, aumentando las propiedades adherentes, haciéndolo apto para mezclar con agregados fríos y húmedos. La realidad es que bajo un mismo nivel de temperatura, el bitumen sin espumar posee exactamente la misma viscosidad que uno espumado, ya que solo es un cambio físico, la diferencia se encuentra al considerar el volumen completo, ya espumado, porque se incluye la cantidad de gas en la estimación de la viscosidad, por lo tanto, se obtiene un sistema bitumen-aire, que realmente es menos viscoso, a este efecto se le suma la mayor área superficial por unidad de masa, derivando en que sea más fácil de dispersar en materiales granulares fríos.

La intensidad y eficiencia del bitumen espumado se puede controlar óptimamente mediante la relación agua/asfalto, teniendo en cuenta condiciones físicas y ambientales, tales como presión y temperatura.

El asfalto espumado es caracterizado principalmente, por medio de dos propiedades:

#### **2.5.4.1 RELACIÓN DE EXPANSIÓN:**

Es la medida de la viscosidad de la espuma y determina que tan bien está dispersa la mezcla. Indica la trabajabilidad del asfalto y su capacidad de recubrir los agregados. Se define la relación entre el volumen máximo alcanzado del betún en estado espumado y el volumen del betún sin espumar. Normalmente, la expansión del asfalto es entre 12 y 20 veces el volumen inicial.

#### **2.5.4.2 VIDA MEDIA:**

La Vida Media es el tiempo tomado, en segundos, desde el estado espumado hasta llegar a la mitad del máximo volumen obtenido.

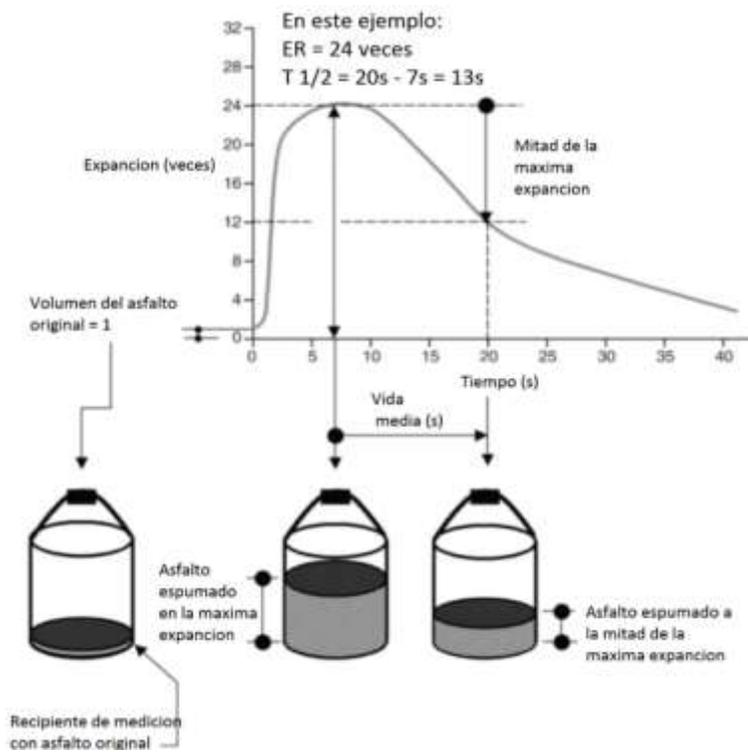
A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de

Expansión como la Vida Media. Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico, para distintas cantidades de agua y temperaturas. En general no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

El uso de algunos aditivos por ejemplo, los compuestos por silicona hacen perder la capacidad de espumacion del asfalto. La presión del asfalto y agua; mayores presiones permiten una mejor “atomización” de las partículas que mejora la uniformidad del asfalto, no es concluyente la influencia de esta propiedad sobre la razón de expansión y la vida media.

### Ejemplo de Vida Media Vs. Relación de Expansión

Figura 2.7

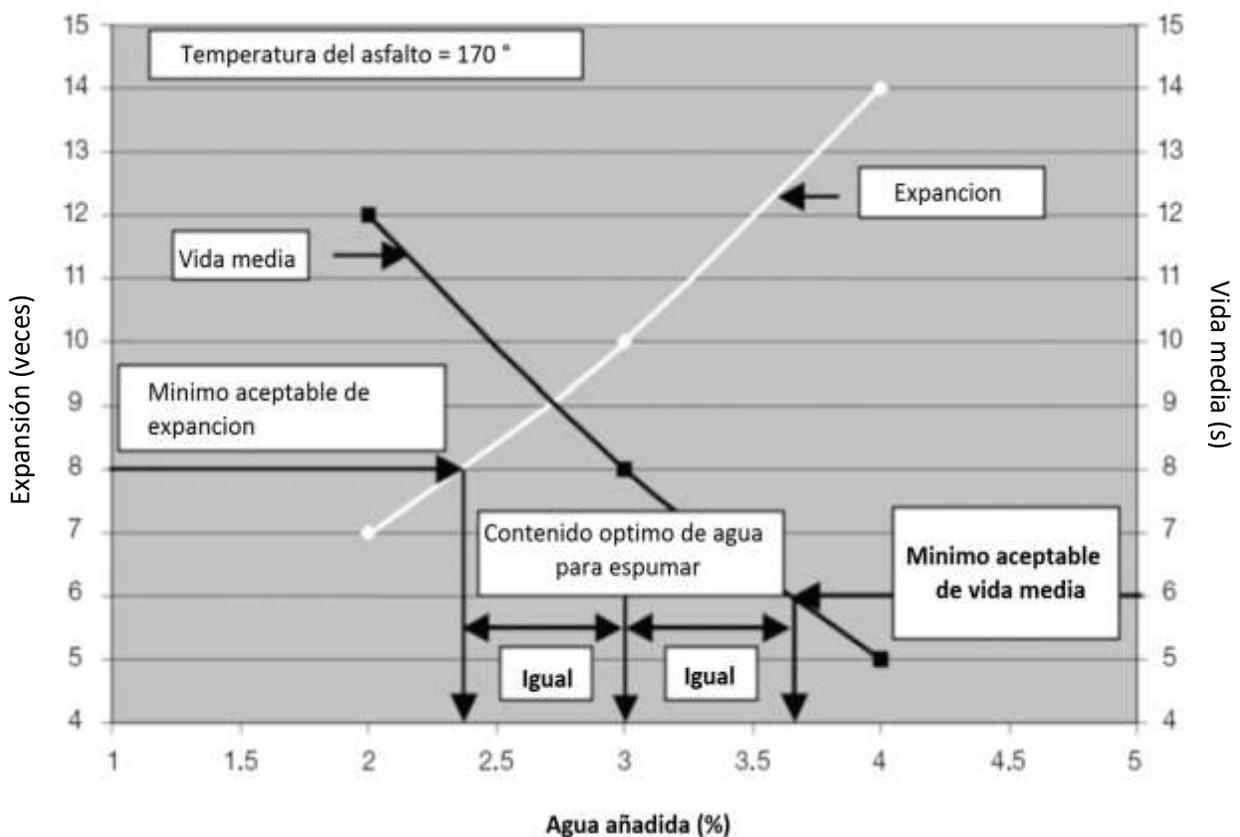


(Fuente: “Boletín Técnico PITRA”)

Como se ve que el contenido de agua añadir es tan importante para la espumación, ésta se debe diseñar por lo que, en el laboratorio se deben adicionar distintos porcentajes de agua sobre masa de asfalto y graficar la expansión y la vida media para obtener el contenido de agua a utilizar en la planta de producción. Se pueden usar los siguientes porcentajes: 2 %, 3% y 4% por ejemplo, y graficar ambas características en un mismo gráfico como se muestra en la Figura 2.8.

### Características del asfalto espumado en función del agua inyectada

Figura 2.8



(Fuente: “Boletín Técnico PITRA”)

Las características de espumado (Razón de Expansión y Vida Media) no son medidas exactas, sino más bien órdenes de magnitud. En general se recomienda una Razón de Expansión entre 12 y 20, y al menos 15 segundos de Vida Media. Por otro lado, mediante el empleo de aditivos activos se pueden obtener valores más elevados, tanto de la Razón de Expansión (superiores a 20) como de la Vida

Media (superiores a 60 segundos) (Macarrone et al., 1994). Cuando las características de espumado son extremadamente pobres (una Razón de Expansión menor que 5 y una Vida Media bajo los 5 segundos), es difícil obtener una mezcla aceptable. Las consideraciones deberían entonces estar orientadas a emplear un asfalto de un origen distinto o incluir un agente espumante.

## **2.5.5 PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS ESPUMADOS**

### **2.5.5.1 PROPIEDADES FÍSICAS**

- **Volumen de Expansión**

Para calcular el volumen de expansión teórico de la espuma de asfalto en laboratorio, se requiere entender cómo se produce el intercambio energético dentro del sistema agua-asfalto-recipientes.

Se puede determinar el volumen de expansión, utilizando la ley universal de gases ( $P \times V = n \times R \times T$ ). Para entender mejor el proceso se presenta el siguiente ejemplo (Jenkins et al., 1999), que representa las condiciones de laboratorio: al descargar una masa de 500 gr de asfalto espumado en un recipiente metálico (de masa 1500 gr) con un 2,5 % de agua (% en peso del asfalto), se obtiene un volumen de 21,2 litros de vapor proveniente del agua inyectada la cual sufre un cambio de fase. Esto, entrega una razón de expansión (razón entre el máximo volumen alcanzado y el volumen sin espumar), de 42,4 para el asfalto, lo cual es 2,5 veces más alto que los valores medidos normalmente bajo condiciones de laboratorio. Las explicaciones para estas diferencias son:

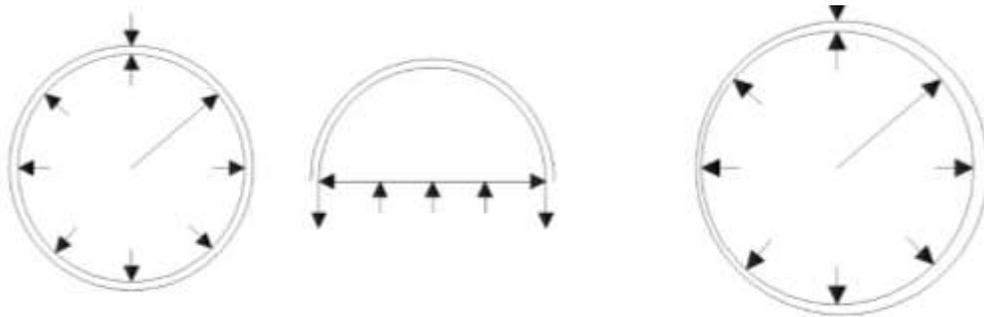
- El vapor de agua no es encapsulado en su totalidad y parte de éste se escapa durante el proceso de espumado del asfalto.
- No toda el agua es utilizada para generar espuma, es decir pequeñas cantidades de ésta son aisladas por el vapor dentro de las burbujas de asfalto.
- Otros factores dados por las condiciones de borde de la cámara de expansión y del recipiente.

- Debido a que son diversos los factores que determinan la magnitud real de expansión, es que se requiere de varias pruebas de laboratorio para determinar el valor máximo de expansión práctico.
- Tamaño y Espesor Burbuja de Asfalto

Para explicar la interacción física entre el vapor y el asfalto, se analiza una burbuja aislada de asfalto espumado.

### Dimensiones medidas en una burbuja de asfalto

Figura 2.9



(Fuente: THENOUX Guillermo, JAMET Andrés, “Tecnología del Asfalto Espumado”,  
Revista de Ingeniería de Construcción, Vol. 17)

Usando la geometría de una esfera, se puede demostrar que los esfuerzos de tracción permanecen constantes a medida que la burbuja se expande (Jenkins, 1999). Sin embargo, existen una serie de factores físicos que limitan la expansión de las burbujas y por ende de la espuma.

Heukelom en 1973, estableció una relación entre la elongación y el módulo de rigidez de los asfaltos con diferentes grados de penetración. Usando esta relación como un indicador de la elongación de la película de asfalto que forma las burbujas, se puede estimar la máxima elongación de la burbuja.

Del monograma de Heukelom y la relación establecida entre el Módulo de Rigidez y elongación, se obtiene una elongación igual a 100 veces el valor del perímetro de la

circunferencia. Esto significa que las gotas de agua de 0,1 mm de radio y un perímetro de 0,628 mm, que son encapsuladas en el asfalto, se expandirán hasta 62,8 mm antes de la rotura, es decir una circunferencia de 10 mm de radio. Esto concuerda con las observaciones realizadas en laboratorio (burbujas de 10 a 15 mm). Basado en estos cálculos se determina un espesor crítico para la burbuja (espesor antes del quiebre) entre 100 a 150 Micras (Jenkins et al., 1999).

### **2.5.5.2 PROPIEDADES EMPÍRICAS**

Las propiedades empíricas más importantes del asfalto espumado que se estudian en la actualidad son: Estabilidad, Razón de Expansión, Vida Media e Índice de Espumación.

- **Estabilidad del Asfalto Espumado**

La estabilidad del asfalto espumado se determina por medio del estudio del tiempo que requiere la espuma para colapsar. Dichos estudios son realizados en laboratorio. El quiebre en pruebas de laboratorio ocurre cuando uno de los dos siguientes efectos ocurre primero:

- Reducción en la temperatura del vapor debido al contacto de la película de asfalto con el aire (o el recipiente), que se encuentra a menor temperatura. Las burbujas más grandes, aunque posean teóricamente la misma tensión superficial que sus contrapartes más pequeñas, tienen una mayor área superficial expuesta y por lo tanto experimentarán una mayor disminución de la temperatura lo que las hará colapsar primero (Jenkins et al., 1999).
- Superación del límite de elongación de la película de asfalto. Cuando la presión de vapor al interior de la burbuja es demasiado grande, la película de asfalto se expandirá más allá de su límite de elongación, resultando en su quiebre antes de lograr el equilibrio (Jenkins et al., 1999).
- **Razón de Expansión**

La Razón de Expansión como se mencionó anteriormente está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar.

- **Vida Media**

Esta propiedad de espumación del asfalto, descrita anteriormente, puede ser susceptible a diversos factores, entre estos:

- En laboratorio uno de los parámetros que afectan las propiedades de espumación es el tamaño del recipiente donde estas propiedades son medidas (Ruckel et al., 1982).
- Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la mayoría de los asfaltos mejoran con temperatura más altas. Espumas aceptables se consiguen con temperaturas sobre 149 ° C (Abel, 1978).
- Cantidad de agua agregada al asfalto: generalmente la Relación de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua agregada, mientras la Vida Media decrece.
- Presión bajo la cual el asfalto es inyectado en la cámara de expansión. Bajas presiones (menores a 3 bar) afectan negativamente tanto a la Relación de Expansión como a la Vida Media.
- Uso de agentes anti-espumantes, tales como compuestos de silicona, en el asfalto virgen (Abel, 1978).
- Viscosidad del asfalto: En cuanto a la viscosidad del asfalto, los resultados obtenidos en varios estudios no permiten relacionar de forma concluyente esta característica con las variaciones en la Razón de Expansión y Vida Media.

### **2.5.5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS**

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga.

Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad, sin embargo existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad, al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad.

Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30 ° C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en caliente equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente).

Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros: Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga:

- **Tracción Indirecta**

Para un buen comportamiento en terreno las mezclas deben tener como mínimo una resistencia a la tracción indirecta de 100 kpa, para probetas de laboratorio ensayadas bajo condiciones de saturación y un mínimo de 200 kpa en condición seca.

- **Módulo Resiliente**

Del mismo modo que todos los materiales viscoelásticos, el Módulo Resiliente de las mezclas con asfalto espumado dependen del tiempo de carga, del nivel de esfuerzo y la temperatura. Los valores medios que alcanzan mezclas correctamente dosificadas, pueden ser comparados con aquellos obtenidos en materiales tratados con cemento, pero con la ventaja de la mayor flexibilidad y mayor resistencia a la fatiga.

- **Resistencia a la Fatiga**

Las características de resistencia a la fatiga de las mezclas con asfalto espumado son similares a aquéllas obtenidas en mezclas asfálticas en caliente (Maccarrone et al., 1993).

Como una aproximación para el diseño estructural de las capas estabilizadas, se presenta en la Tabla 2.8 algunos valores propuestos por WIRTGEN S.A. para las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado (Wirtgen GMBH, 1998).

### **Rango de valores de diseño estructural sugerido por WRITGEN**

**Tabla 2.6**

<b>Material</b>	<b>% Asfalto</b>	<b>Tracción Indirecta (Kpa)</b>	<b>Módulo Resiliente (Mpa)</b>
RAP/ Chancado (50/50)	1.5 – 3	350 - 800	2500 - 5000
Chancado	2.5 - 4	400 - 900	3000 - 6000
Grava Rodada	3 – 4.5	250 - 500	2000 - 4000

#### **2.5.6 CONSIDERACIONES BÁSICAS DE DISEÑO DE LA MEZCLA**

En esta sección se presenta un resumen de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de una mezcla con asfalto espumado. Éstos son:

##### **2.5.6.1 ELECCIÓN DEL GRADO DEL ASFALTO**

En general, los asfaltos blandos tienen mejores características de espumación, sin embargo no existen diferencias apreciables entre las propiedades de espumación medidas en relación al grado de asfalto empleado. La base espumada es siempre la segunda capa, por lo cual dependiendo del tipo de carpeta de rodado (tratamientos de superficie tipo sellos o carpetas estructurales) el efecto de la temperatura ambiente en conjunto con las cargas de tránsito puede ser más o

menos influyente (este efecto se encuentra actualmente en estudio). El proceso de envejecimiento instantáneo del espumado puede ser suficiente para otorgar las propiedades viscoelásticas requeridas, por lo tanto la elección del grado del asfalto puede ser eventualmente sólo función de las propiedades de la espuma (el estudio del envejecimiento instantáneo del asfalto espumado se encuentra en etapa de estudio).

### 2.5.6.2 TEMPERATURA DEL ASFALTO Y PORCENTAJE DE AGUA DE INYECCIÓN

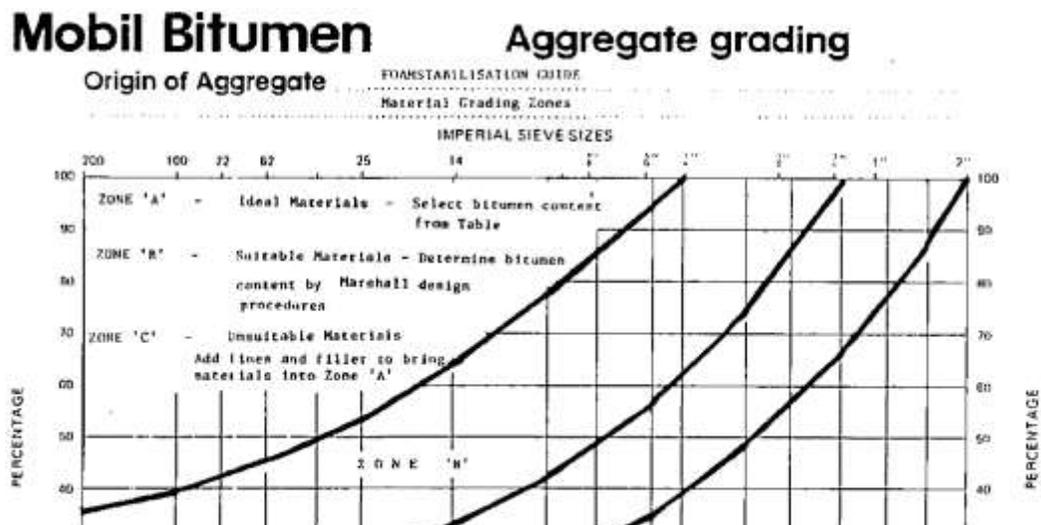
La temperatura del asfalto y el porcentaje de agua a inyectar se determinan en función de la Razón de Expansión y Vida Media. El porcentaje de agua de inyección es independiente del agua empleada para la compactación de la mezcla.

### 2.5.6.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Las investigaciones realizadas, muestran que una gran variedad de agregados pueden ser mezclados con asfalto espumado. Esta variedad incluye áridos chancados, arena arcillosa, RAP y otros materiales tales como escorias. Sin embargo, algunos tipos de materiales (principalmente el RAP) requieren ser mezclados con cemento o cal, para incrementar su contenido de finos y mejorar las propiedades de la mezcla. En la Figura 2.10 se indica la clasificación de materiales granulares empleados para estabilización de suelos con asfalto espumado, realizada por Akeroyd y Hicks en 1988, para Mobil Oil.

#### Clasificación de materiales granulares para su uso con A.E.

Figura 2.10



(Fuente: <http://asphalt.csir.co.za/FArefs/Akeroyd%20&%20Hicks.pdf>)

El contenido de finos del agregado, es un parámetro de gran importancia y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al., 1982). La relación entre el contenido de finos y asfalto es crítica, ya que un exceso de asfalto en el mortero generará un incremento en la lubricación lo que resultará en una pérdida de resistencia y estabilidad. Las mezclas con altos porcentajes de finos poseen valores elevados de tracción indirecta.

En general las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado son influenciadas por la trabazón de los agregados más que por la viscosidad del asfalto, lo cual difiere de las mezclas asfálticas en caliente.

#### **2.5.6.4 CONDICIONES DE TEMPERATURA DE LOS AGREGADOS Y RAP**

Distintos investigadores han reconocido la influencia de la temperatura de los áridos en el comportamiento de las mezclas con asfalto espumado. Los esfuerzos se han orientado a determinar la mínima temperatura a la cual los áridos deben encontrarse para evitar una baja dispersión del asfalto en la mezcla. Se determinó que al calentar los áridos se logra incrementar la dispersión del asfalto en la mezcla lo que se traduce en un mejor cubrimiento de los agregados más gruesos, sin embargo los principios que dominan este proceso no han sido explicados en su totalidad.

La temperatura óptima de mezclado para los agregados se encuentra entre los 13 y los 23 °C dependiendo del tipo de agregado, ya que para temperaturas fuera de este rango resultan mezclas de mala calidad (Bowering y Martin, 1976). Las temperaturas empleadas en investigaciones generalmente no superan los 60° C

## **2.5.7 MEZCLAS Y MATERIALES TRATADOS CON ASFALTO ESPUMADO**

### **2.5.7.1 MEZCLAS**

Una diferencia marcada entre las mezclas producidas con asfalto espumado y las mezclas con asfalto caliente, o mezclas usando emulsiones asfálticas, es la manera como el asfalto se dispersa a través del agregado. En todos los últimos casos, el asfalto tiende a cubrir todas las partículas, mientras que en las mezclas de asfalto espumado las partículas largas no son cubiertas totalmente. El asfalto espumado se dispersa así mismo entre las partículas finas, formando un mortero, el cual se adhiere de manera efectiva manteniendo unida la mezcla.

Este revestimiento parcial es el responsable del pequeño cambio de color de los agregados tratados con asfalto espumado. Materiales similares mezclados con un asfalto caliente, o en frío con emulsiones bituminosas, tienden a ser más oscuros o aún más negros. Si un agregado claro es usado, el producto tratado con la espuma tendera a permanecer de color ligeramente más claro.

Una espuma con una alta relación de expansión y una alta vida media, se dispersara de una manera adecuada en el material pétreo, mejorándose el

cubrimiento de los agregados por el asfalto y, por lo tanto, las propiedades de la mezcla.

Son limitadas las referencias disponibles, sobre las magnitudes más apropiadas de la relación de expansión y la vida media, para la elaboración de las mezclas de asfalto espumado con materiales pétreos. Sin embargo, parece existir consenso que con relaciones de expansión mayores a 10 se logra una adecuada dispersión de asfalto en el agregado mineral.

Ruckel (1983) recomienda valores superiores a 8 o 15 de relación de expansión y como mínimo de 20 segundos para la vida media. Maccarrone y otros (1995), sugieren que con el uso de ciertos tipos de agentes de superficie activa, es posible fabricar asfaltos espumados con relaciones de expansión superiores a 15 y vidas medias mayores a 60 segundos. De acuerdo con la experiencia sudafricana, vidas medias de alrededor de 10 segundos han resultado apropiadas, teniendo expansiones superiores a 10, en diferentes aplicaciones realizadas en la obra.

### 2.5.7.2 AGREGADOS

En la tabla a continuación se muestra una clasificación de materiales, agrupados por tipo de suelo, de acuerdo con su conveniencia para ser tratados con asfalto espumado, desarrollada por Bowering y Martin. Esta clasificación se logró a partir del análisis de los resultados de ensayos realizados sobre un total de 50 materiales.

#### **Clasificación de suelos y conveniencia para el tratado con asfalto espumado**

Tabla 2.7

USC	Conveniencia para el tratamiento	Rangos de Contenidos de asfalto		Cohesión	Factores de equivalencia de capa	Comentarios
		Total	Optimo			
GW	Buena	1.5 - 5.0	2.0 – 2.5	300-700	1.21 – 1.50	Mezclas permeables

GW-GM	Buena	1.5 - 5.5	2.0 – 4.5	300-400	1.25 – 1.33	Mezclas permeables
GP-GC	Buena	1.5 - 4.0	2.5 – 3.0	300-400	1.25 – 1.33	Baja permeabilidad
GC	Pobre	4.0 - 6.0	4.0 – 6.0	300-400	1.25 – 1.33	Impermeable  Contenido de asfalto crítico  Puede usarse añadiendo bajo % de cal
SW	Regular	3.5 - 5.0	4.0 – 5.0	100		Requiere adición de finos – pasa No. 200
SW-SM	Buena	1.0 - 6.0	2.5 – 4.0	100-400	1.0 – 1.33	
SP-SM	Pobre	4.85 - 6.0+	3.0 – 4.5	100		Requiere asfaltos de baja penetración y adición de finos
SP	Regular	1.0 - 6.0	2.5 – 5.0	100-300	1.0 – 1.25	Posiblemente requiera adición de finos
SM	Buena	1.5 - 6.0	2.5 – 4.5	100-400	1.0 – 1.33	
SM-SC	Buena	2.5 - 6.0	4.0	400-700	1.33 – 1.50	
SC	Sola - Pobre	3.5 - 6.0+	4.0 – 6.0	400-700	1.33 – 1.50	Requiere la adición de un pequeño % de cal
	Con cal - Buena	-	3.0 – 4.0		1.33 – 1.50	

Observando estos resultados, parece ser que los materiales que resultan adecuados para ser tratados con asfalto espumado se extienden desde arenas arcillosas de baja plasticidad, hasta gravas y piedras trituradas.

### **2.5.7.3 CONDICIONES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS**

Tanto los trabajos originales de estabilización de suelos con asfalto espumado, desarrollados por el profesor Csanyi: a quien se le atribuye el origen de la tecnología, como diversos estudios realizados en Australia y otros lugares, han

mostrado la necesidad de agregar agua al suelo o al agregado antes de adicionarle el asfalto espumado.

Acerva de la importancia del contenido de agua de los agregados el profesor Csanyi realizo la siguiente observación:

*“El agua añadida al agregado, durante el proceso de mezcla, ablanda los materiales arcillosos o las fracciones duras, rompe las aglomeraciones y se distribuye uniformemente en la mezcla. El agua, además, separa las partículas finas y las suspende en un medio líquido, creando canales de humedad a través de los cuales el asfalto espumado puede penetrar y cubrir todas las partículas minerales. La cantidad de agua no es crítica, procede a agregar la suficiente para que la mezcla se haga satisfactoriamente. El exceso de agua es indeseable, porque hace que la mezcla se reblandezca demasiado y se reduce la cobertura de los agregados. La cantidad de agua de la mezcla debe determinarse haciendo ensayos de prueba y error en algunas cochadas de material.”*

El contenido de humedad durante el proceso de mezclado y compactación es considerado por muchos investigadores como el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado. La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et al., 1982)

Una insuficiente cantidad de agua resultará en una inadecuada dispersión del asfalto, mientras que un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla. El contenido óptimo de humedad varía, dependiendo de las propiedades de la mezcla que se requieren optimizar (resistencia, densidad, etc.).

Investigaciones realizadas por Mobil Oil, sugieren que el contenido óptimo de humedad, es aquel que maximiza la pérdida de volumen (70% - 80% de la humedad óptima AASHTO de los agregados). Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado (Bowering, 1970)

En general, el contenido óptimo de humedad para el proceso de mezclado debe ser aproximadamente un 10 a 20 % mayor que la humedad de compactación, debido a la pérdida que tiene lugar entre ambos procesos (Sakr y Manke, 1985).

- Condiciones de curado

Las mezclas con asfalto espumado no desarrollan la totalidad de su resistencia hasta que un gran porcentaje de su humedad se pierde después del proceso de compactación. Este proceso se denomina curado y mediante él, la mezcla obtiene gradualmente resistencia en el tiempo, a medida que disminuye el contenido de humedad. Sin embargo, existe evidencia experimental que demuestra que la pérdida de humedad no es un pre-requisito para la obtención de resistencia de las mezclas con asfalto espumado.

Aun considerando las discrepancias presentadas, el procedimiento de diseño de mezclas en laboratorio debe simular las condiciones del proceso de curado en terreno, con la finalidad de correlacionar las propiedades de la mezcla en laboratorio con terreno. Debido a que el proceso de curado en terreno se desarrolla durante varios meses, la simulación de estas condiciones de terreno se realiza mediante un proceso acelerado de curado. Existen varios procesos de curado acelerado entre los cuales destacan:

- Periodo de tres días a una temperatura de 60° C (Bowering, 1970), que representa el estado conseguido en terreno después de un año de servicio (Macarrone et al., 1995)
- Secado en horno a masa constante a una temperatura de 40° C.C.

Para algunos autores el contenido óptimo de fluidos para la compactación, tal como el usado para mezclas como emulsiones asfálticas, resulta valido para las mezclas con asfalto espumado; en este concepto, se considera la acción lubricante del ligante y del agua, de manera que el contenido de porción en que se incremente la cantidad de ligante.

En síntesis, las mezclas con asfalto espumado requieren un contenido definido de humedad de los agregados para romper los terrones y alcanzar una buena dispersión del asfalto durante el proceso de mezclado, colaborando de esta manera con su compactación y, por tanto, con la estabilidad de la mezcla.

Este contenido de humedad varía según el tipo de material y, en especial, con el contenido de la fracción inferior a 0.075mm; pero, en general, se encuentre entre el 65% y el 85% del contenido óptimo determinado en una prueba AASHTO T99. Resulta importante mencionar que la adición del agua a la mezcla, posterior a la inyección del asfalto espumado, no tiene efectos benéficos.

### **2.5.8 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE LA MEZCLA**

El procedimiento de diseño de la mezcla requiere el uso de una pequeña planta de laboratorio para producir el asfalto espumado. Es importante que este equipo simule cuidadosamente el asfalto espumado que será producido durante la producción a gran escala.

La planta de laboratorio de asfalto espumado consiste, esencialmente, en una caldera para calentar el asfalto, y dos sistemas de bombeo calibrados, uno para el asfalto caliente, y otro usado para el agua en la producción de la espuma. Predeterminadas cantidades de asfalto caliente y agua fría son inyectadas a una cámara de expansión especialmente diseñada, donde el asfalto es espumado antes de ser descargado a través de una boquilla.

La relación de expansión y la vida media de un asfalto espumado pueden ser variadas por la alteración de las proporciones de agua que se adicionan al asfalto, o por la adición de aditivos químicos.

En el diseño de mezclas reciclada con asfalto espumado, es necesario optimizar las características de espumado del cemento asfáltico que vaya a ser usado. Ello se logra midiendo la relación de expansión y la vida media de las espumas elaboradas, bajo diferentes condiciones de temperatura, presión de aire y concentración de agua.

Algunas veces, puede ser necesario el uso de aditivos para contrarrestar el efecto deletéreo de siliconas presentes en el asfalto y causantes de características pobres de espumado, en el mismo.

Tanto la relación de expansión como la vida media de las espumas se evalúan a temperaturas en el rango de 130°C a 180°C, presiones de aire entre 1 y 5 bares (1bar = 14.5psi) y concentraciones de agua desde 1% al 4% usando incrementos del 0.5%. En caso particular del desarrollo de la investigación, el asfalto usado tiene una temperatura máxima de calentamiento de 180°C recomendada por el fabricante.

Una vez la relación agua-asfalto ha sido determinada, un volumen predeterminado de asfalto espumado se descarga directamente sobre de una muestra de RAP más agregado, mientras está siendo agitado y homogéneamente mezclado. Normalmente se producen 5 muestras de esta manera, con variaciones en el contenido de asfalto. Antes de la adición de asfalto espumado, el material es llevado a su óptimo contenido de humedad. Si hay necesidad de cal, esta se adiciona en este estado.

Briquetas tipo Marshall se elaboran de cada una de las muestras aplicando 75 golpes por cara. En algunos países como Australia, el compactador giratorio es usado en lugar del martillo Marshall. Las briquetas son curadas en sus moldes durante 24 Horas a temperatura ambiente. Luego son extraídas de los moldes y curadas en un horno por 72 horas, a temperatura de 60°C.

El contenido óptimo de aglutinante está basado en el volumen y en el diseño de las curvas de estabilidad Marshall, como en las mezclas con asfalto caliente.

### **2.5.9 CONDICIONES DE CURADO**

Otro aspecto relevante a ser tenido en cuenta en la tecnología de los asfaltos espumados, es el curado de las mezclas y el efecto de las condiciones del mismo, sobre las propiedades mecánicas del material tratado.

El curado es el proceso mediante el cual la mezcla del agregado con asfalto espumado gana gradualmente resistencia con el tiempo, mientras se presenta la reducción en el contenido de humedad. La temperatura del curado, su duración y por lo tanto las

condiciones de humedad, afectan severamente la resistencia de las mezclas con asfalto espumado.

De manera similar a lo que sucede con las mezclas en frío, elaboradas con emulsiones asfálticas, las mezclas con asfalto espumado desarrollan su resistencia con el tiempo, aunque se requiere un periodo relativamente menor para alcanzar su resistencia final.

Ruckel y otros investigadores proponen los procedimientos de curado que se muestran en la tabla, con objeto de reproducir en laboratorio las condiciones de humedad y así mismo de resistencia obtenida de material tratado en obra, a diferentes edades: corto, mediano y largo plazo.

En un gran número de trabajos e investigaciones se ha adoptado el procedimiento de curado de las mezclas propuesto por Bowering (1970), consiste en el secado de las muestras en horno a 60°C durante 3 días. Algunos autores consideran que esta temperatura, por el hecho de ser superior a la temperatura correspondiente a la del punto de ablandamiento del cemento asfáltico, puede generar cambios en su dispersión y un posible envejecimiento del mismo.

### **Tiempo de curado de mezclas asfálticas tratadas con asfalto espumado**

Tabla 2.8

<b>Procedimientos propuestos para el curado de las mezclas</b>			
<b>Termino</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
Duración en laboratorio	24 horas	48 horas	96 horas

Condiciones de curado	Dentro de los moldes	24 h dentro de los moldes y 24 h fuera de los moldes	24 h dentro de los moldes y 72 h fuera de los moldes
Temperatura	Ambiente	40° C	40°C
Similitud con la obra			
- Duración después de extendida la capa	1 día	7 a 14 días	30 días
- Condición climática	Seca	Seca	Seca

(Fuente: A.A London & Partners. Consulting Engineers. South Africa. *Rehabilitation of distressed Pavements. Recommended Pavement. Procedures for Deep Recycling 1996*)

### **2.5.10 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL RECICLADO EN FRÍO CON ASFALTO ESPUMADO**

Esta técnica permite la construcción eficiente de capas de rodadura y de base ligadas de forma bituminosa, mediante el procesamiento y tratamiento con maquinaria especializada, que puede cumplir con las funciones de recicladora de carpetas deterioradas o de pavimentadora de nuevas capas.

Para la elaboración de un pavimento reciclado en frío:

- Se esparce una capa del material RAP más base granular no ligado que cumpla con las especificaciones para el diseño de la mezcla.
- Una cisterna pasa esparciendo agua sobre el material, y una motoniveladora, por detrás mezclando el material para que se humedezca homogéneamente, cual si trataría de la preparación de una capa base.
- Siguiendo en la fila, la pavimentadora autopropulsada, que tiene unas aspas rotatorias que agitan el material en el interior de una cámara de expansión, mientras el asfalto espumado es rociado en su interior y mezclado homogéneamente. La pavimentadora es calibrada electrónicamente mediante computadora, para expulsar la cantidad de diseño de asfalto, según la velocidad de desplazamiento y espesor de la capa de pavimento.

- El material humedecido queda detrás de la pavimentadora a medida que esta avanza, para su compactación y perfilado con la maquinaria tradicional.

### 2.5.11 ALTERNATIVAS Y COSTOS DE RECICLADORAS

Por su práctico tamaño, versatilidad de funciones, tanto como para pavimentar nuevas superficies como para el reciclado de pavimentos viejos, la recicladora *WIRTGEN WR 2500 S* es una excelente alternativa al uso de una planta de elaboración de mezclas asfálticas tradicionales. Con un costo de 4026400 (cuatro millones veintiséis mil cuatrocientos) Bolivianos, frente a los 7000000 (siete millones) de Bolivianos de la planta de preparación de mezclas asfálticas tradicionales ubicada en “La Pintada”, más el costo de instalación de 4000000 (cuatro millones) de Bolivianos, el equipo de asfalto espumado es una alternativa atractiva considerando la eficiencia en los trabajos de pavimentación, frente a los de una planta tradicional. A continuación se presentan las características técnicas del equipo *WR 2500 S*:

#### Especificaciones del equipo WR 2500 S

Tabla 2.9

<b>Anchura de trabajo</b>	2438 mm
<b>Profundidad de trabajo</b>	0 – 500 mm
<b>Potencia de motor</b>	500 Kw / 670.51 Hp
<b>Peso de servicio</b>	32000 Kg
<b>Accionamiento del tambor de fresado</b>	Mecánico
<b>Numero de ruedas</b>	4
<b>Accionamiento de traslación</b>	Hidráulico en todas las ruedas

La recicladora cuenta además con las siguientes características:

- **Rendimiento y rentabilidad.-** Gracias a su enorme potencia, dispone de energía suficiente para realizar múltiples tareas, desde la estabilización de suelos, elaboración de mezclas con asfalto espumado, hasta el reciclado en

frío. La instalación de inyección dispone de unos microprocesadores que controlan la dosificación de agua, emulsión, suspensión de cemento y asfalto espumado en función de las respectivas exigencias.

- **Seguridad para el trabajo.-** Faros montados en los cuatro lados de la máquina para iluminación perfecta, iluminación interior en la cabina.
- **Sistemas de nivelación para trabajos perfectos.-** Al objeto de conseguir resultados perfectos, la WR 2500 S cuenta con sistemas de nivelación automáticos, palpadores de transductor de giro, sensores de inclinación, palpadores laser entre otros.

Entre otras características cuenta con:

- **Tracción en las cuatro ruedas.**

#### **Wirtgen WR 2500 S, tracción en las 4 ruedas**

Figura 2.11



- **Dirección versátil**

### Wirtgen WR 2500 S, Dirección versátil

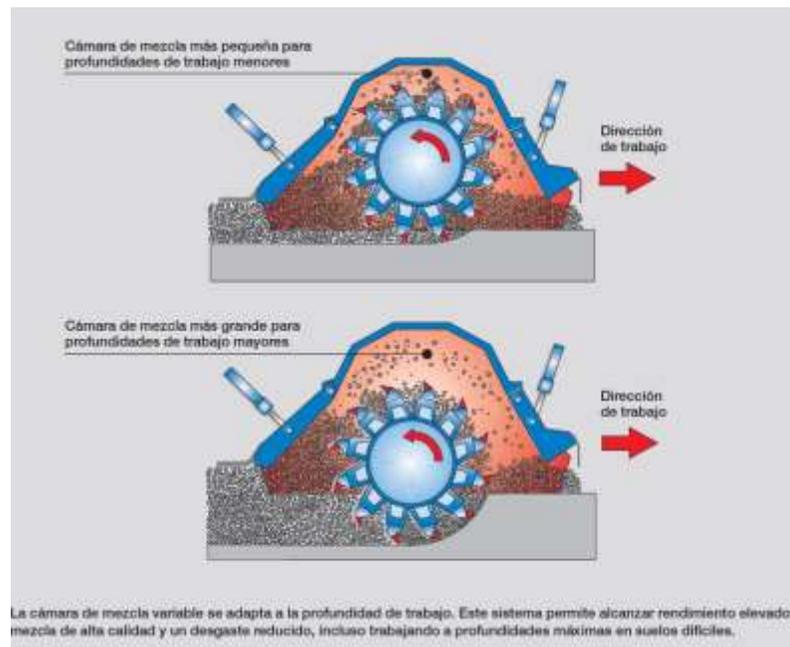
Figura 2.12



- **Calidad Homogénea en toda profundidad**

### Wirtgen WR 2500 S, Mezclado homogéneo de material

Figura 2.13



(Fuente de las imágenes: [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/p\\_wr2500s\\_s.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/p_wr2500s_s.pdf))

## **2.5.12 LA ECONOMÍA Y EFICIENCIA DEL RECICLADO EN FRÍO CON ASFALTO ESPUMADO**

El proceso del reciclado de asfalto espumado ha demostrado ser una manera favorablemente económica de mezclar el asfalto con pavimento deteriorado. No hay costo por el calentamiento del agregado, el cual es significativo en el costo de producción del asfalto. No hay ningún costo de manufactura, lo cual hace que la emulsión asfáltica relativamente costosa y además la eficiencia en los trabajos de pavimentación es mucho mayor. El proceso de asfalto espumado emplea solamente asfalto de un grado de penetración constante, y agua. (MONTEJO FONSECA Alfonso, “Ingeniería de Pavimentos”)

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

### **2.6.1 DESCRIPCIÓN**

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

- **Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

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

- **Selección de las muestras de material**

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

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

- **Preparación del agregado**

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

Con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto, se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecue al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (Grava de 3/4, Grava de 3/8 y Arena Natural).

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

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

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

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

Para la aplicación de este método al diseño de una mezcla con asfalto espumado, no es necesario el secado previo del agregado, ya que el método permite adicionar al asfalto el agregado húmedo y frío. Salvo esta acepción, el método sigue los mismos pasos hasta el final.

- **Preparación del pavimento a reciclar (RAP)**

Con la finalidad de realizar las briquetas para el diseño Marshall se debe realizar la granulometría del RAP para poder introducirlo a la faja de trabajo para determinar para que zona de trabajo es apto este material

El porcentaje de finos de este material debe ser mayor al 5 por ciento para que la espuma expansiva pueda trabajar en óptimas condiciones.

Se realizara Limites y si el resultado del IP es mayor a 10 se recomienda usar Cal en un porcentaje menor a 1,5% ó cemento en un porcentaje menor a 1%.

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

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

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la comparación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, m 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta Marshall de 35 golpes, realmente, recibe un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes

recibe 100 impactos. Después de completar la compactación, las briquetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

## **2.6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL**

- **Gráficos de los resultados.**

Los técnicos de laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficas, para poder entender las características particulares de cada briketa usada en la serie. Mediante el estudio de las gráficas, ellos pueden determinar cuál briketa, de la serie, cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento determinado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta briketa se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

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

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

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

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para el peso unitario (densidad) de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un

contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.

- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto.

- **Verificación de los criterios de diseño.**

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

- **Selección de un Diseño de Mezcla.**

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

**CAPITULO III**  
**CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO, RAP, CEMENTO ASFÁLTICO,**  
**RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA DE LA ESPUMA EXPANSIVA Y**  
**CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN**

**3.1 INTRODUCCION**

En los capítulos anteriores se trataron aspectos sobre el método Marshall, los aspectos para el diseño de Mezclas Asfálticas en frío, el reciclado de pavimento asfáltico y la espuma expansiva así como las normas aplicables al diseño de la misma.

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla propuestas en el estudio, éstas se las realizara a las muestras de material pétreo obtenidas en banco de material ubicado en la localidad de Santa Ana “la Pintada”, de igual manera se realizara los ensayos de laboratorio material ah reutilizar, se presenta el procedimiento para la caracterización de la Emulsión y cemento asfáltico, aclarando que estos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos y asfaltos del SEDECA y en el laboratorio de asfaltos de la U.A.J.M.S. por tal motivo, se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

El capítulo está dividido principalmente en tres partes: La primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los material pétreos (grava  $\frac{3}{4}$ ” y arena triturada, filler, RAP), la segunda parte constituye al análisis de la emulsión y el cemento asfáltico y finalmente se aborda las pruebas realizadas a la espuma expansiva (relación de expansión y vida media).

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

## **3.2 UNIDAD DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL**

### **3.2.1 MUESTRA**

La muestra es la obtención de material por ser aprovechado en este proyecto el cual se obtuvo de remover la carpeta asfáltica deteriorada de la calles del departamento de Tarija a través de funcionarios de la alcaldía que tienen la función de realizar los mantenimientos a las calles. Este material se procedió a frezar para su análisis y caracterización.

Se utilizó agua en varias proporciones para realizar la espuma expansiva, esta agua fue introducida a la cámara con ayuda de una jeringa.

### **3.2.2 MUESTREO**

Para el muestreo se tuvo que realizar un aparato especial construido para poder espumar el asfalto y así poder mezclar con el RAP y diseñar las mezclas recicladas, con este muestreo se pretende variar los porcentajes de agua para espumar el asfalto.

#### **3.2.2.1 CÁMARA DE EXPANSIÓN**

Al no contar con una cámara de expansión en el laboratorio de asfaltos de la universidad Juan Misael Saracho y tampoco en el SEDECA, se tuvo que hacer la elaboración de la misma cumpliendo las especificaciones y recomendaciones descritas anteriormente. Para el cual se utilizó los siguientes materiales:

#### **3.2.2.2 MATERIALES UTILIZADOS**

- **Olla a presión**
- **Termómetro**
- **Tubo de cobre**
- **Valvula tipo mariposa**
- **Tubería de  $\frac{3}{4}$**
- **Cinta teflón**
- **Silicona**
- **Proxipol**

### **3.2.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

El método utilizado para este trabajo de investigación será correlacional mediante el cual estudiaremos, seleccionaremos, agruparemos las variables a analizar, así estudiar las propiedades mecánicas del pavimento flexible reciclado en frío adhiriendo espuma expansiva para poder mejorar su resistencia característica y cumpla con la estabilidad Marshall.

Se empleara el método de reciclado de pavimento flexible en frío con espuma expansiva, con material de la carpeta asfáltica que por algún motivo ha perdido alguna de sus propiedades iniciales como ser: Cohesión, textura, composición, geometría o ya cumplió su periodo útil.

Se estudiara todos los ensayos necesarios para la caracterización de los asfaltos, asfaltos reciclados con espuma expansiva

Se analizara con los resultados la vida útil con relación a la expansión del pavimento reciclado.

De acuerdo a las técnicas empleadas nos permitirá obtener la resistencia del pavimento flexible re utilizado con espuma expansiva para poder realizar las comparaciones pertinentes de las propiedades empíricas, físicas de estas mezclas.

### **3.2.4 PROCEDIMIENTO Y APLICACIÓN**

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

- Se estableció un volumen inicial de asfalto de  $60\text{cm}^3$ .
- Se calculó el peso de ese volumen de asfalto.
- Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones entre 2 y 4%, con incrementos de 0.5%.
- Para la elaboración del ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150, 160, 170 y  $180^{\circ}\text{C}$ .
- Se calentó una muestra de asfalto a la temperatura más baja, a la que se inyectó el primer porcentaje de agua en ml, se registró el máximo volumen de expansión y el

tiempo de duración de la espuma de asfalto. Posteriormente con una nueva muestra de asfalto, se repitió el procedimiento, y se inyectó porcentaje de agua.

- El mismo procedimiento se repitió para las 5 cantidades de agua correspondientes a las 3 temperaturas escogidas para la realización del ensayo.
- Con el resultado más favorable se procederá al diseño de las mezclas modificadas con espuma expansiva las cuales se van a variar los contenidos de asfalto y asfalto residual para obtener los valores de sus propiedades mecánicas.

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

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se asistió al Laboratorio de Suelos y Materiales del SEDECA donde se realizaron los ensayos de **Granulometría, Peso Específico, Caras Fracturadas, Partículas Planas, Partículas Alargadas Límites, Desgaste de Los Ángeles y Equivalente de Arena** Con la finalidad de determinar el comportamiento del agregado para la elaboración de mezclas asfálticas los resultados se presentan a continuación:

#### **3.3.1 GRANULOMETRÍA**

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

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

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

porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla 3.1.

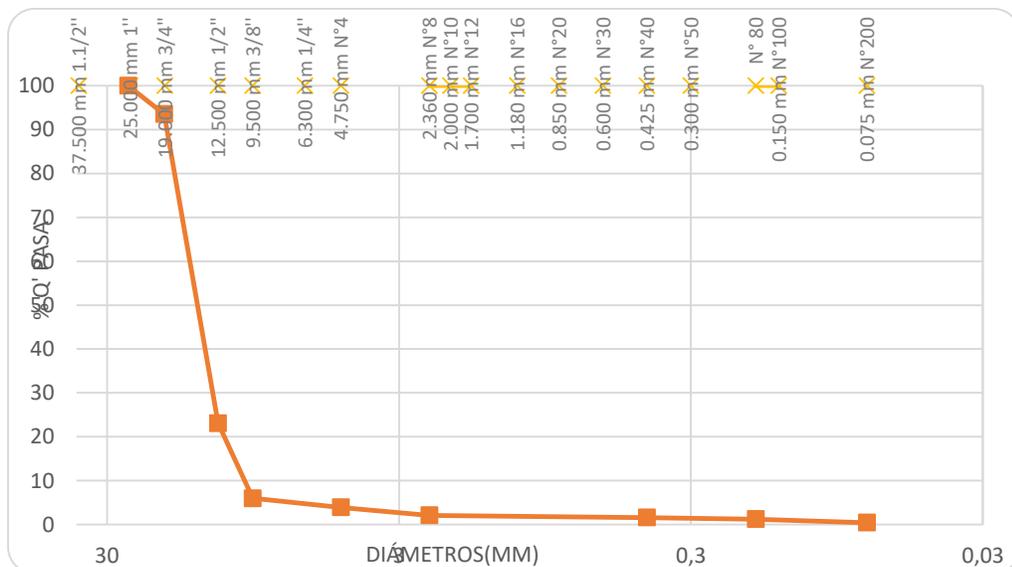
### Granulometría - Grava de 3/4

Tabla 3.1

Peso Total Seco	2503,0 gr		Abertura
Tamiz	Grava		Tamiz
Nº	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.
1"	0,0	100,0	25,40
3/4"	162,0	93,5	19,10
1/2"	1925,0	23,1	12,70
3/8"	2353,0	6,0	9,50
Nº 4	2405,0	3,9	4,75
Nº 8	2450,0	2,1	2,36
Nº 16	2463,0	1,6	1,18
Nº 40	2472,0	1,2	0,43
Nº 80	2492,0	0,4	0,15
Nº 200	2496,0	0,3	0,075

### Curva granulometrica – Grava de 3/4

Figura 3.1



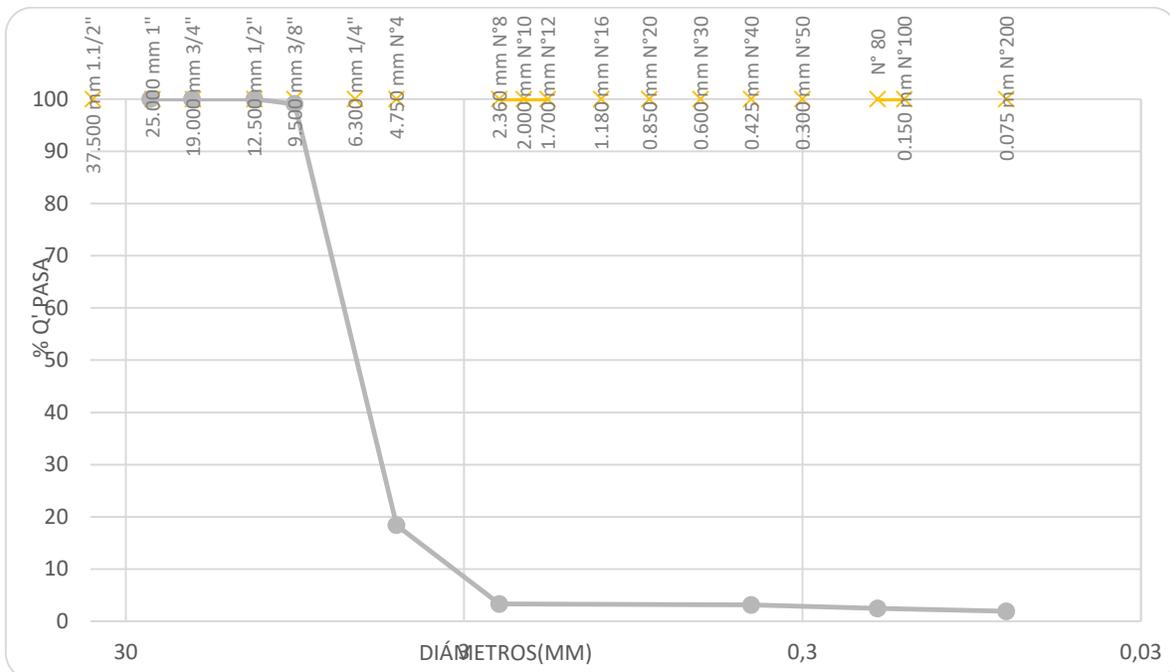
## Resumen granulométrico - Grava de 3/8"

Tabla 3.2

Peso Total Seco		2122,0 gr		Abertura
Tamiz	Gravilla		Tamiz	
Nº	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.	
1"	0,0	100,0	25,40	
3/4"	0,0	100,0	19,10	
1/2"	0,0	100,0	12,70	
3/8"	20,0	99,1	9,50	
Nº 4	1732,0	18,4	4,75	
Nº 8	2052,0	3,3	2,36	
Nº 16	2053,0	3,3	1,18	
Nº 40	2056,0	3,1	0,43	
Nº 80	2070,0	2,5	0,15	
Nº 200	2082,0	1,9	0,075	

## Curva granulométrica – Grava de 3/8"

Figura 3.2



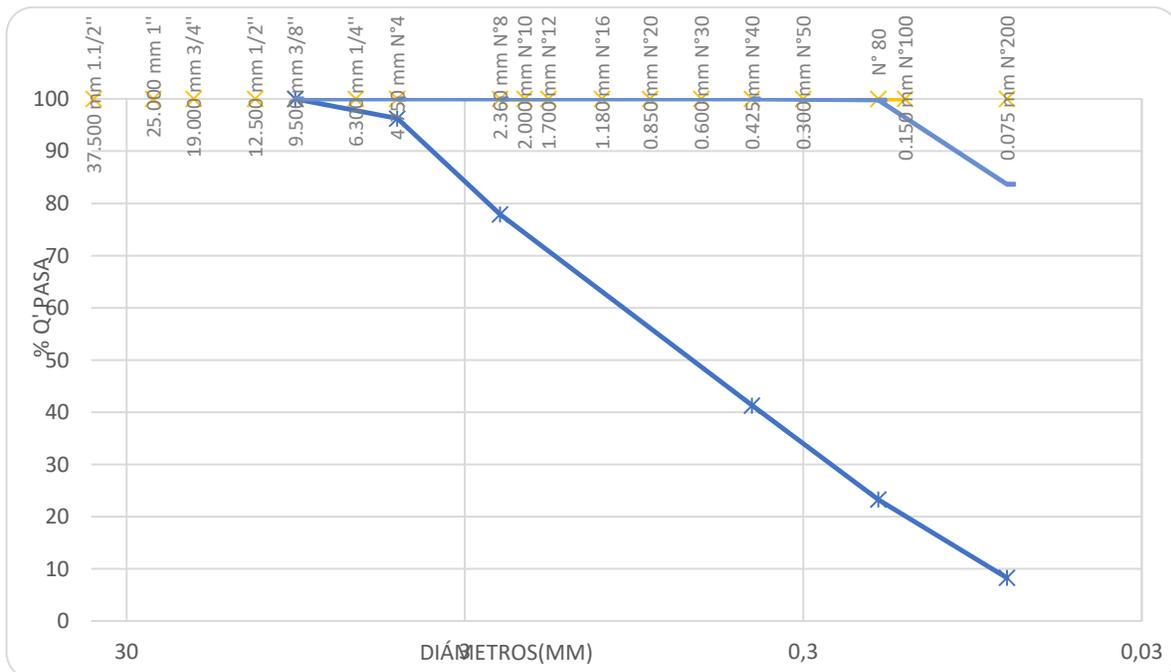
## granulometría – material fino (Arena)

**Tabla 3.3**

Peso Total Seco		600,0 gr		540,2 gr		Abertura
Tamiz	Arena Triturada		Arena (filler)		Tamiz	
Nº	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.	
1"	0,0	100,0	0,0	100,0	25,40	
3/4"	0,0	100,0	0,0	100,0	19,10	
1/2"	0,0	100,0	0,0	100,0	12,70	
3/8"	0,0	100,0	0,0	100,0	9,50	
Nº 4	22,5	96,3	0,0	100,0	4,75	
Nº 8	132,6	77,9	0,0	100,0	2,36	
Nº 16	210,2	65,0	0,0	100,0	1,18	
Nº 40	352,2	41,3	0,0	100,0	0,43	
Nº 80	460,2	23,3	1,1	99,8	0,15	
Nº 200	550,2	8,3	88,2	83,7	0,075	

### Curva granulométrica – material fino (Arena) (filler)

Figura 3.3



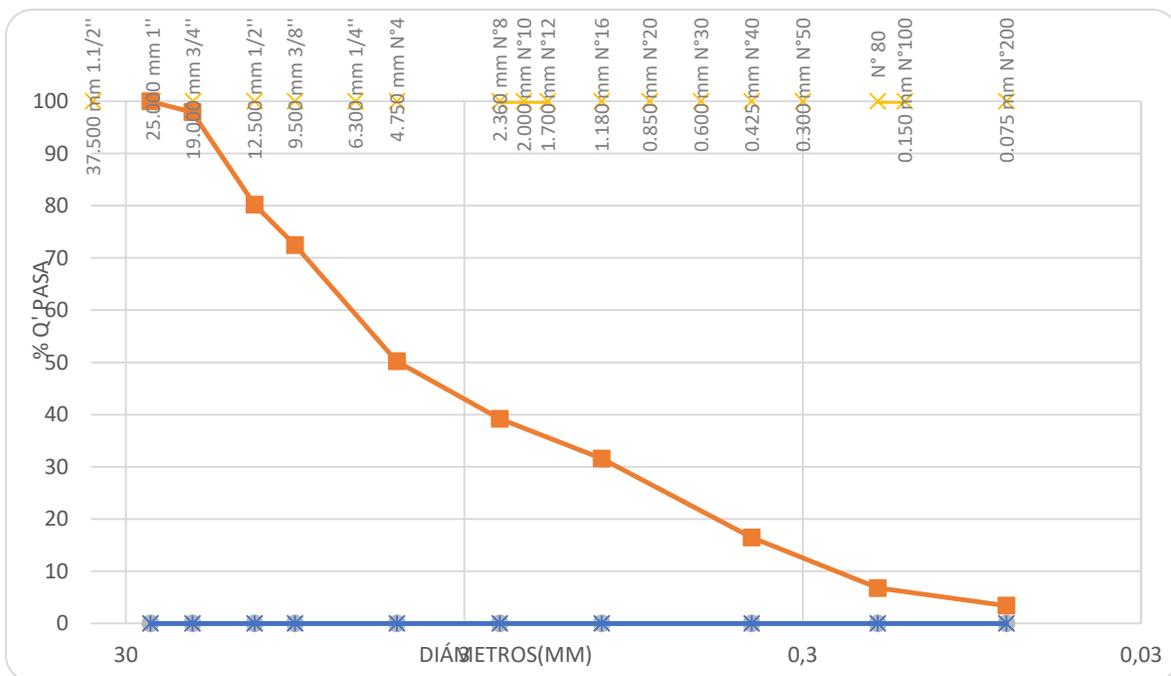
## Granulometría – material RAP

**Tabla 3.4**

Peso Total Seco	4500,0 gr	
Tamiz	Grava	
N°	Peso Ret.	% Que Pasa
1"	0,0	100,0
3/4"	94,0	97,9
1/2"	891,0	80,2
3/8"	1238,0	72,5
N° 4	2241,0	50,2
N° 8	2736,0	39,2
N° 16	3078,0	31,6
N° 40	3758,0	16,5
N° 80	4194,0	6,8
N° 200	4347,0	3,4

## Curva granulométrica – material RAP

Figura 3.4



### 3.3.2 PESO ESPECÍFICO

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, en este caso al tener un tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$  pulg, La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a  $100^{\circ}$  -  $110^{\circ}\text{C}$  y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante  $24 \pm 4$  horas. Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (PEBS.S.S.) A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , La canastilla y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas. Se seca entonces la muestra en horno a  $100^{\circ}$  -  $110^{\circ}\text{C}$ , se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.

### Peso específico de la grava de 3/4"

Tabla 3.5

MATERIAL	CARACTERÍSTICA	PESO ESPECÍFICO	OBSERVACIONES
Grava de 3/4"	Peso Específico Bruto Seco (PEBS)	2,613	
	Peso Específico Aparente (PEA)	2,654	Material pesado, denso y bueno para trabajar
	Peso Esp. Bruto Sat. Sup. Seca (PEBSSS)	2,628	
	% de Absorción (%D)	0,589	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

### Peso específico de la grava de 3/8"

Tabla 3.6

MATERIAL	CARACTERÍSTICA	PESO ESPECÍFICO	OBSERVACIONES
Grava de 3/8"	Peso Específico Bruto Seco (PEBS)	2,615	
	Peso Específico Aparente (PEA)	2,648	Material bastante pesado, denso y bueno para trabajar
	Peso Esp. Bruto Sat. Sup. Seca (PEBSSS)	2,628	
	% de Absorción (%D)	0,473	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

### Peso específico del material fino (Arena)

Tabla 3.7

<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>PESO ESPECÍFICO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Material Fino Arena	Peso específico seco	2,603	
	Peso Específico Sat. Sup Seca	2,653	
	Peso Específico Aparente	2,739	
	% de Absorción (%)	1,906	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

### Peso específico del material RAP

Tabla 3.8

<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>PESO ESPECÍFICO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Material RAP	Peso específico seco	2,678	
	Peso Específico Sat. Sup Seca	2,629	
	Peso Específico Aparente	2,727	
	% de Absorción (%)	2,21	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

### 3.3.3 CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

#### Contenido de humedad natural de los agregados

Tabla 3.9

CARACTERÍSTICA	MATERIAL			
	Grava	Gravilla	Arena	
Peso de la bandeja (grs.)	360	360	360	
Peso de la muestra humedad + bandeja (grs.)	1360	1360	860	
Peso de la muestra seca + bandeja (grs.)	1356,4	1355,1	854,3	
Peso de la muestra seca (grs.)	996,4	995,1	494,3	
Peso del agua (grs.)	3,6	4,9	5,7	<b>TOTAL</b>
<b>Contenido de humedad (%)</b>	<b>0,36</b>	<b>0,49</b>	<b>0,57</b>	<b>1,42</b>

### 3.3.4 CARAS FRACTURADAS

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

Para el agregado de 3/4”:

- Se tamizó el agregado y se trabajó utilizando un tamaño máximo de partícula de 3/4”.
- Se lavó el material para apreciar mejor las caras fracturadas del material.
- Se secó el material para pesar la totalidad de la muestra.
- Se separa el agregado que tiene caras fracturadas del canto rodado y se pesan los materiales separados, los resultados obtenidos son los siguientes:

### Caras fracturadas material de 3/4"

Tabla 3.10

<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de caras Sanas (gr)	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	846	154	<b>84,6</b>	75%

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas

Para el agregado de 3/4":

Se repite el mismo procedimiento para el agregado de 3/8" y se obtuvieron los siguientes resultados:

### Caras fracturadas, material de 3/8"

Tabla 3.11

<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de caras Sanas (gr)	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)	Especificaciones Mínimo (%)
800		50	<b>93,5</b>	75

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas

### Caras fracturadas, material de RAP

Tabla 3.12

<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de caras Sanas (gr)	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	877	123	<b>87,70</b>	75

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas

### 3.3.5 DESGASTE 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 sometidos a los efectos del tráfico de vehículos. El procedimiento que se siguió para el desarrollo del ensayo fue el siguiente:

Para el material de 3/4”

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

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

Se obtuvieron los siguientes resultados:

### Desgaste de Los Ángeles, material de 3/4”

Tabla 3.13

ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES						
Retenido 1/2 (gr)	Retenido 3/8 (gr)	Total (gr)	Retenido #12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones Máximo
2500	2500	5000	3612	1388	<b>27,76</b>	40

El resultado es satisfactorio, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas.

Para el material de 3/4”:

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

### Desgaste de Los Ángeles, material de 3/8"

Tabla 3.14

ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES						
Retenido 1/4 (gr)	Retenido #4 (gr)	Total (gr)	Retenido #12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones Máximo
2500	2500	5000	3726	1274	<b>25,48</b>	40

El resultado es satisfactorio, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas.

### Desgaste de Los Ángeles, material RAP

Tabla 3.15

ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES						
Retenido 1/4 (gr)	Retenido #4 (gr)	Total (gr)	Retenido #12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones Máximo
2500	2500	5000	3502	1498	<b>29,96</b>	40

### 3.3.6 EQUIVALENTE DE ARENA

Con el ensayo de equivalente de arena se pretende determinar las proporciones de arena y arcilla presentes en el agregado fino para la elaboración de mezclas

asfálticas u hormigones, para la realización del ensayo se ejecutó el siguiente procedimiento:

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

Se obtuvieron los siguientes resultados:

### Equivalente de arena

Tabla 3.16

Ensayo	Lecturas			Media.	Esp.
	1	2	3		
Lectura nivel superior	22,4	23,2	23,8	54,2	>45
Lectura nivel inferior	12,2	12,5	12,7		
% de arena	54,46	53,88	53,36		

Los resultados son satisfactorios, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas según las especificaciones.

### Equivalente de arena RAP

Tabla 3.17

Ensayo	Lecturas			Media.	Esp.
	1	2	3		
Lectura nivel superior	18,2	18,6		73,4	>45
Lectura nivel inferior	13,5	13,5			
% de arena	74,18	72,58			

### 3.3.7 PROCTOR MODIFICADO T-180 – RAP

La prueba Proctor modificado al igual que la Proctor estándar se utiliza para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo. Este ensayo se aplica solamente a suelos con menos del 30 % en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm.

Para conducir la prueba Proctor modificado, se utilizó el mismo molde con un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup> (1/30 pie<sup>3</sup>) como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 4.54 ± 0.01 kg, la caída del pisón es 457.2 ± 1.6 mm, la cara de golpe del pisón tiene un diámetro de 50.8 ± 0.25 mm. El pisón debe ser reemplazado cuando el diámetro de la cara de golpe es desgastado o expandido en 12 mm. El número de golpes del pisón para cada capa se conserva en 25 como en el caso de la prueba Proctor estándar. El pisón debe estar equipado con un tubo que le permita desplazarse en la caída con facilidad, el tubo debe tener al menos cuatro agujeros en cada extremo espaciados 90° entre sí, el diámetro mínimo de estos agujeros es de 9.5 mm

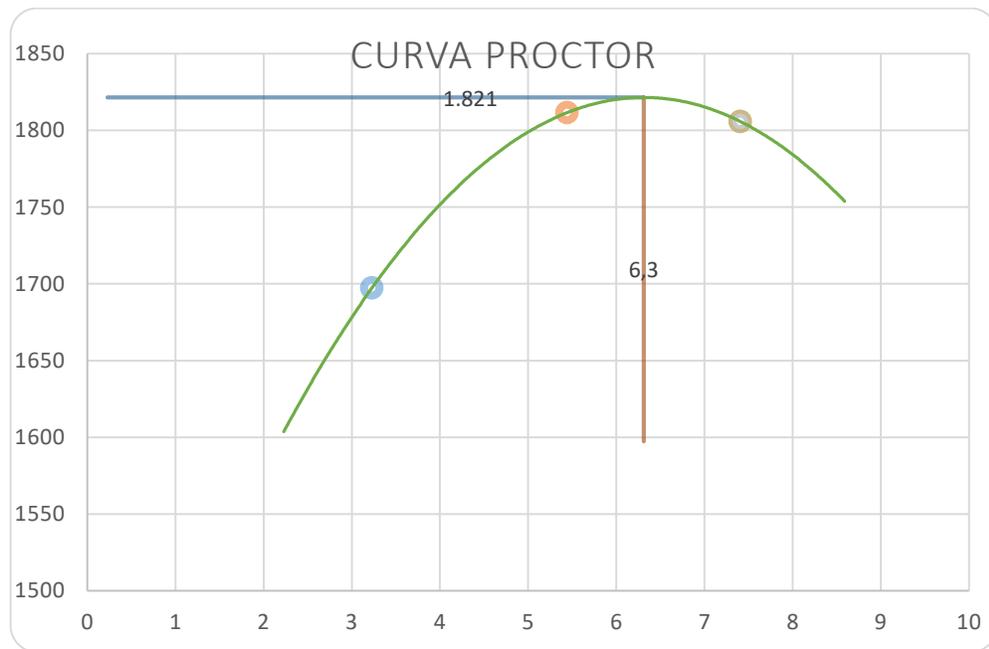
### Datos y cálculos proctor

Tabla 3.18

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	10225,0	10562,0	10625,0
Peso del Molde	gr.	6486,0	6486,0	6486,0
Peso Suelo Húmedo	gr.	3739,0	4076,0	4139,0
Volumen del Molde	cc	2134,0	2134,0	2134,0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	1752,1	1910,0	1939,6
Cápsula No		5	2	12
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	322,00	355,00	305,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	315,00	342,00	291,00
Peso Agua	gr.	7,00	13,00	14,00
Peso Cápsula	gr.	98,20	103,00	102,00
Peso Suelo Seco	gr.	216,80	239,00	189,00
Contenido de Humedad	%	3,23	5,44	7,41
Peso Específico Seco	gr./m3	1,6973	1,8115	1,8058

**Curva Proctor modificado T-180**

**Figura 3.5**



### 3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.

Por condiciones de disponibilidad con los equipos necesarios para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron en el SEDECA los ensayos de: *Viscosidad Saybolt Furol*, *Punto de Inflamación* y *Penetración*. Con la finalidad de complementar el Proyecto de Grado, se realizó el ensayo de Ductilidad

de *Peso Específico* en el asfalto en instalaciones del Laboratorio de Suelos y Asfaltos de la UAJMS.

### **3.4.1 VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL**

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

- Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140 °C.
- Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que un vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). El calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.
- Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.
- Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboco, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo ( $\pm 0.05$  °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.
- Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor.
- Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

### Resultados Viscosidad Saybolt Furol

Tabla 3.19

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135 °C  AASHTO T-72	seg	130.0	132.0	131.0	85	-----

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

#### 3.4.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN

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

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

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

Se anotaron los siguientes resultados:

### Resultados punto de inflamación

Tabla 3.20

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T – 48	°C	256	258	257	232	-----

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

### 3.4.3 PENETRACIÓN

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

- Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes. Se cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100 °C al punto de ablandamiento, también con el objeto que colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.
- Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperada. Se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.
- Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20 y 30 °C durante un periodo aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.
- Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 °C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.
- Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración se limpió con gasolina y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.
- La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la cara superior del asfalto.
- Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

### **Resultados ensayo de penetración**

Tabla 3.21

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25 °C, 100g, 5 seg. AASHTO T49	Lectura 1	Mm	90	90	90	-----	-----
	Lectura 2	Mm	89	93	91	-----	-----
	Lectura 3	Mm	89	90	90	-----	-----
	Promedio	Mm			90,2	85	100

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

### 3.4.4 DUCTILIDAD

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

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

- El material asfáltico es estirado por las pinzas hasta formar un hilo produciendo la ruptura.

### Resultados ensayo de Ductilidad

Tabla 3.22

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Mínimo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	130	127	129	129	≥100

#### 3.4.5 PESO ESPECÍFICO

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

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

Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

Verterlo una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del

picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

### Resultados ensayo de Ductilidad

Tabla 3.23

ENSAYO	UNIDAD	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Peso Picnómetro	grs.	62,02	62,02	
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	142,75	142,75	
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	125,72	122,55	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	143,9	143,96	
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	1,015	1,017	1,016

### 3.5 RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

- Se estableció un volumen inicial de asfalto de 60cm<sup>3</sup>.
- Se calculó el peso de ese volumen de asfalto.
- Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones entre 2 y 4%, con incrementos de 0.5%.
- Para la elaboración del ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150, 160, 170 y 180°C.
- Se calentó una muestra de asfalto a la temperatura más baja, a la que se inyectó el primer porcentaje de agua en ml, se registró el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto. Posteriormente con una nueva muestra de asfalto, se repitió el procedimiento, y se inyectó porcentaje de agua.

- El mismo procedimiento se repitió para las 5 cantidades de agua correspondientes a las 3 temperaturas escogidas para la realización del ensayo.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

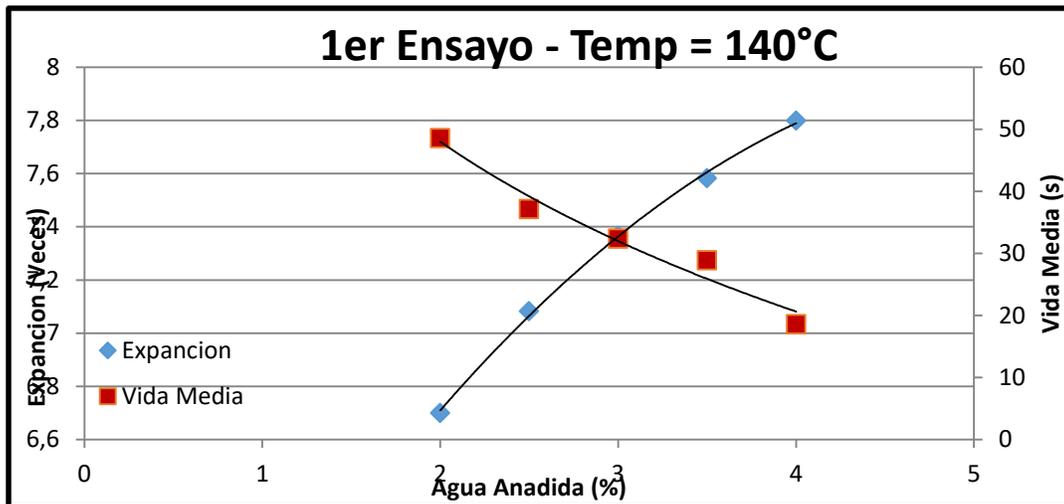
**1er Ensayo – 140°C - RE vs VM**

Tabla 3.24

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>140</b>					
<b>Vol. Inicial de asfalto (cm3)</b>	<b>60</b>					
<b>Peso del asfalto (g)</b>	<b>60,96</b>					
<b>% Agua</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>	<b>4</b>	
<b>Vol. Agua (ml)</b>	<b>1,224</b>	<b>1,53</b>	<b>1,836</b>	<b>2,142</b>	<b>2,448</b>	<b>Esp.</b>
<b>VIDA MEDIA</b>	48,6	37,2	32,4	28,9	18,6	>15
<b>Vol. final de asfalto (cm3)</b>	402	425	442	455	468	
<b>Relación Expansión</b>	6,7	7,083333	7,366667	7,583333	7,8	12-20

**Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 140 °C**

Figura 3.6



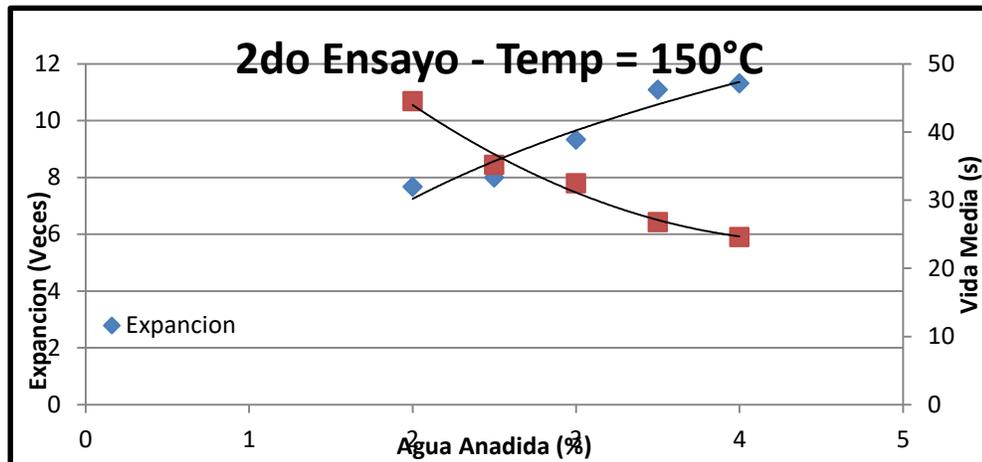
**2do Ensayo – 150°C - RE vs VM**

Tabla 3.25

Temperatura (°C)	150					
Vol Inicial de asfalto (cm3)	60					
Peso del asfalto (g)	60,96					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol Agua cm3	1,224	1,53	1,836	2,142	2,448	Esp.
Vida Media	44,5	35,2	32,5	26,8	24,6	>15
Vol final de asfalto (cm3)	460	480	560	665	679	
Relación de Expansión	7,666667	8	9,333333	11,08333	11,31667	12-20

### Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 150 °C

Figura 3.7



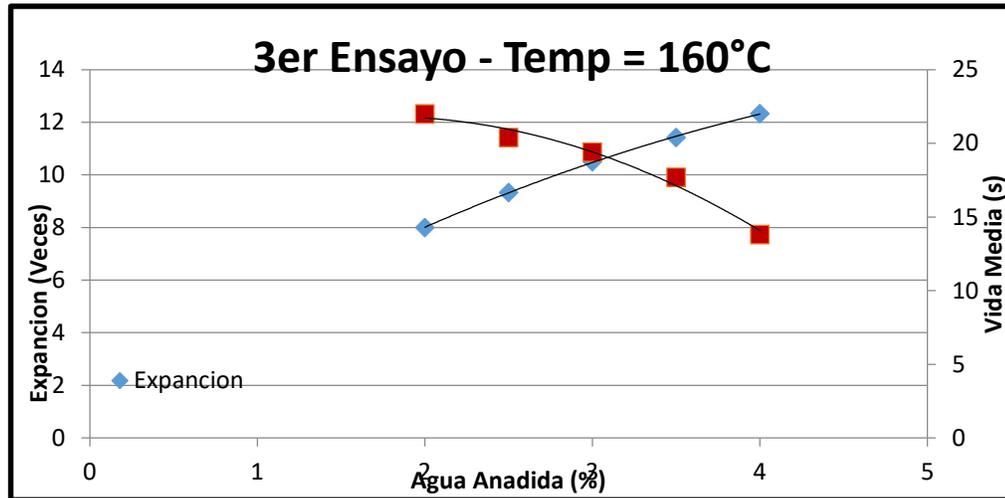
### 3ero Ensayo - 160°C - RE vs VM

Tabla 3.26

Temperatura (°C)	160					
Vol Inicial de asfalto (cm3)	60					
Peso del asfalto (g)	60,96					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol Agua cm3	1,224	1,53	1,836	2,142	2,448	Esp.
Vida Media	22	20,4	19,4	17,7	13,8	>15
Vol final de asfalto (cm3)	480	560	630	685	740	
Relación de Expansión	8	9,333333	10,5	11,41667	12,33333	12-20

**Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 160 °C**

Figura 3.8



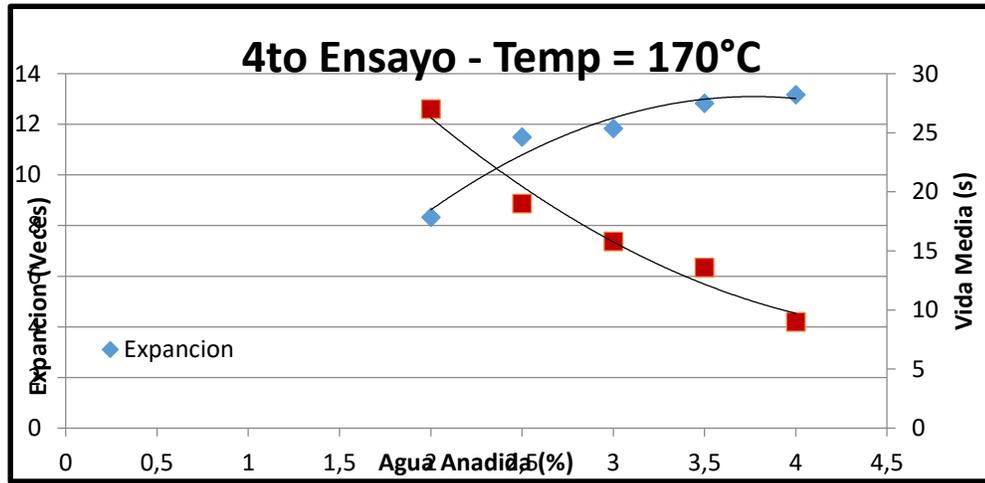
**4to Ensayo - 170°C - RE vs VM**

Tabla 3.27

Temperatura (°C)	170					
Vol Inicial de asfalto (cm3)	60					
Peso del asfalto (g)	60,96					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol Agua cm3	1,224	1,53	1,836	2,142	2,448	Esp.
Vida Media	27	19	15,8	13,6	9	>15
Vol final de asfalto (cm3)	500	690	710	770	790	
Relación de Expansión	8,333333	11,5	11,8333	12,83333	13,16667	12-20

**Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 170 °C**

Figura 3.9



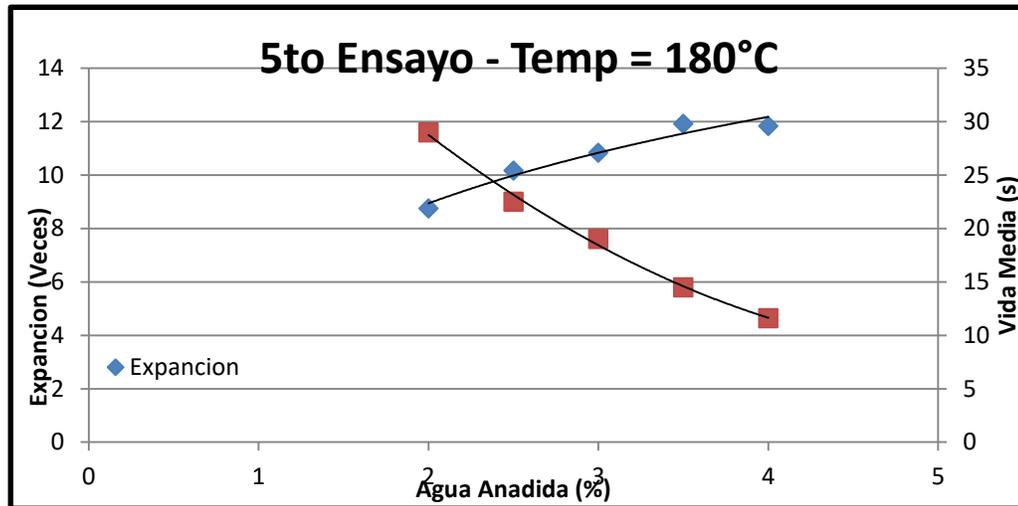
**5to Ensayo - 180°C - RE vs VM**

Tabla 3.28

Temperatura (°C)	180					
Vol Inicial de asfalto (cm3)	60					
Peso del asfalto (g)	60,96					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol Agua cm3	1,224	1,53	1,836	2,142	2,448	Esp.
Vida Media	29	22,5	19	14,5	11,6	>15
Vol final de asfalto (cm3)	525	610	650	715	710	
Relación de Expansión	8,75	10,16667	10,83333	11,91667	11,83333	12-20

**Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 180 °C**

Figura 3.10



### 3.6 CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

La caracterización de la emulsión que se utilizó en este diseño de mezcla no se realizó completa, ya que para emulsificar el asfalto se requiere de una buena dosis de pericia en los ensayos, aparte de la manipulación de instrumentos complejos y de limitada existencia en los laboratorios de Tarija, por tales motivos, se acordó tomar un tipo de emulsión fabricada por la empresa STRATURA ASFALTOS. No obstante, el procedimiento y norma que ampara cada ensayo para la caracterización realizada se presentan a continuación.

#### 3.6.1 ENSAYO RESIDUO POR EVAPORACIÓN

Mediante este ensayo se determina el porcentaje de asfalto que contiene una emulsión, evaporando el agua y pesando el residuo.

Este procedimiento se empleará cuando se necesite únicamente determinar el porcentaje de residuo de la emulsión. Después de haber mezclado bien la emulsión, se pesan  $50 \pm 0.1$  g de muestra en cada uno de los tres vasos, previamente tarado cada conjunto de vasos y varillas. Se colocan los vasos en el horno, cuya temperatura se ha regulado a

$163 \pm 3$  °C ( $325$  °F  $\pm 6$  °F), y se dejan durante 2 horas.

Seguidamente, se retiran del horno y se remueve cuidadosamente y se deja en el horno durante 1 hora, sacándolos a continuación y dejándolos enfriar a la temperatura ambiente antes de pesarlos bien el residuo.

### Resumen de resultados

Tabla 3.29

Muestras	Peso de la Emulsión + Tara + Agitador (grs.)	Peso de la Tara (grs.)	Peso del Agitador (grs.)	Peso después de la evaporación (grs.)	Peso del Residuo de Asfalto (grs.)	Porcentaje del Contenido de Agua en la Emulsión (%)	Porcentaje del Contenido de Asfalto en la Emulsión (%)
1	97	27,00	10,00	79,50	42,50	29	70,8
2	97	27,00	10,00	77,95	40,95	32	68,3
3	97	27,00	10,00	78,80	41,80	30	69,7
<b>PROMEDIO =</b>							<b>69,6</b>

### 3.6.2 VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL (ASTM D 244).

Describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la viscosidad o consistencia de las emulsiones asfálticas por medio del viscosímetro Saybolt Furol.

Las determinaciones se realizan a 25 °C o 50 °C (77 o 122 °F), pudiendo emplearse el viscosímetro, aún en el caso en que el tiempo empleado para fluir, sea menor de 20 segundos.

Ensayo a 50 °C (122 °F). (Para emulsiones con porcentaje de agua igual o menor del 35%).

1. Se agita bien la muestra sin incorporar burbujas y se echan unos 100 cm<sup>3</sup> en un vaso de vidrio de 400 cm<sup>3</sup>. El vaso con la emulsión se sumerge en un baño de agua, de manera que el fondo quede a 50 mm de la superficie y se mantiene en posición vertical. La temperatura del baño debe ser  $71 \pm 2.5$  °C

2. Con objeto de obtener una distribución uniforme de la temperatura, se agita la emulsión con el termómetro del viscosímetro mediante un movimiento circular de 60 vueltas por minuto (el termómetro deberá ir tocando las paredes y el fondo del vaso). Se tendrá cuidado para no producir burbujas.
3. La emulsión que se va a ensayar se calentará, dentro del baño, °C.
4. Se coloca el tapón conforme se indicó en el numeral B.1. Una vez que la emulsión alcance la temperatura indicada, se vierte inmediatamente a través del tamiz de 850 mm (No. 20), en el tubo del viscosímetro, hasta que rebose en la galería del aparato.
5. La emulsión se sigue agitando con el termómetro, con las mismas revoluciones hasta alcanzar la temperatura del ensayo. Se tendrá cuidado para no producir burbujas durante la agitación. La temperatura del baño se regula para lograr que la emulsión se mantenga, por lo menos durante 1 min

### Resumen de resultados Viscosidad

**Tabla 3.30**

Nº Muestras	Peso de la muestra (grs)	Tiempo (seg.)	Especificación ASTM D 88 (seg.)
1	60	339	(100 - 400)
2	60	342	(100 - 400)
3	60	340	(100 - 400)
<b>PROMEDIO</b>		<b>= 340</b>	<b>Segundos</b>

#### 3.6.3 TAMIZADO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA EN MALLA #20

Mediante este ensayo se determina la cantidad de producto asfáltico mal emulsionado que hay en la emulsión. Los grumos, así como la película que se forma en la parte superior, pueden ser debidos a la rotura de la emulsión, contaminaciones, mala fabricación, etc.

La temperatura a la cual la prueba de tamiz debe ser efectuada está relacionada con la viscosidad de la emulsión. Para aquéllos materiales cuya viscosidad es 100 s ó más a 25°C realizar el ensayo a temperatura ambiente y para aquellos materiales cuya viscosidad es más de 100 s a 25°C y aquellos cuya viscosidad es especificada a 50°C (122° F), use una temperatura de ensayo a 50°C si es necesario calentar, la muestra, puede ser colocada en un horno a baño de agua, agitando para alcanzar su homogeneidad.

**PORCENTAJE RETENIDO TAMIZ Nº 20**

**Peso del Tamiz Nº 20 = 474 grs.**

Tabla 3.31

Nº Muestras	Peso de la muestra Inicial (grs)	Peso Retenido en la malla lavada (grs)	Porcentaje Retenido (%)	Especificacion ASTM D 88 (%)
1	60	0	0	≤ 0,1
2	70	0	0	≤ 0,1
3	80	0	0	≤ 0,1
<b>PROMEDIO</b>	<b>=</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>%</b>

**3.6.4 ENSAYO DE MISCIBILIDAD CON AGUA**

Mediante este ensayo se determina si se produce coagulación cuando se diluye la emulsión con agua.

Medir en una probeta 50 cm<sup>3</sup> de emulsión, vertiéndolos en un vaso de vidrio de 400 cm<sup>3</sup>. Medir también por medio de una probeta 150 cm<sup>3</sup> de agua destilada, añadiéndolos gradualmente a continuación sobre la emulsión mientras se está agitando. La temperatura, aunque no afecta de manera importante al ensayo, deberá estar comprendida entre 20 y 25 °C (68 y 77 °F).

Después de haber homogenizar la mezcla, se deja en reposo durante dos horas, pasadas las cuales se observa visualmente si se ha producido coagulación del asfalto que contiene la emulsión.

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, MEZCLA RECICLADA CON EL MÉTODO DE ESPUMA EXPANSIVA Y ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Para poder comparar las características de una mezcla asfáltica con asfalto espumado, es necesario tener una mezcla de referencia, de la que se conozcan todas las

características Marshall. Con esta finalidad se realizó el diseño de una mezcla asfáltica en frío con emulsión y posteriormente una reciclada con asfalto espumado.

#### **4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON EMULSIONES ASFÁLTICA**

Se realizara el procedimiento siguiendo el manual de carreteras ABC.

##### **4.1.1 DOSIFICACIÓN POR LA FÓRMULA BÁSICA TANTEOS SUCESIVOS**

El método de tanteos recibe este nombre porque se tantean los porcentajes de aporte de cada material, hasta que la curva de la granulometría de la mezcla entre en el rango de las especificaciones.

##### **4.1.1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LA MEZCLA CON EMULSIÓN**

###### **Dosificación de materiales**

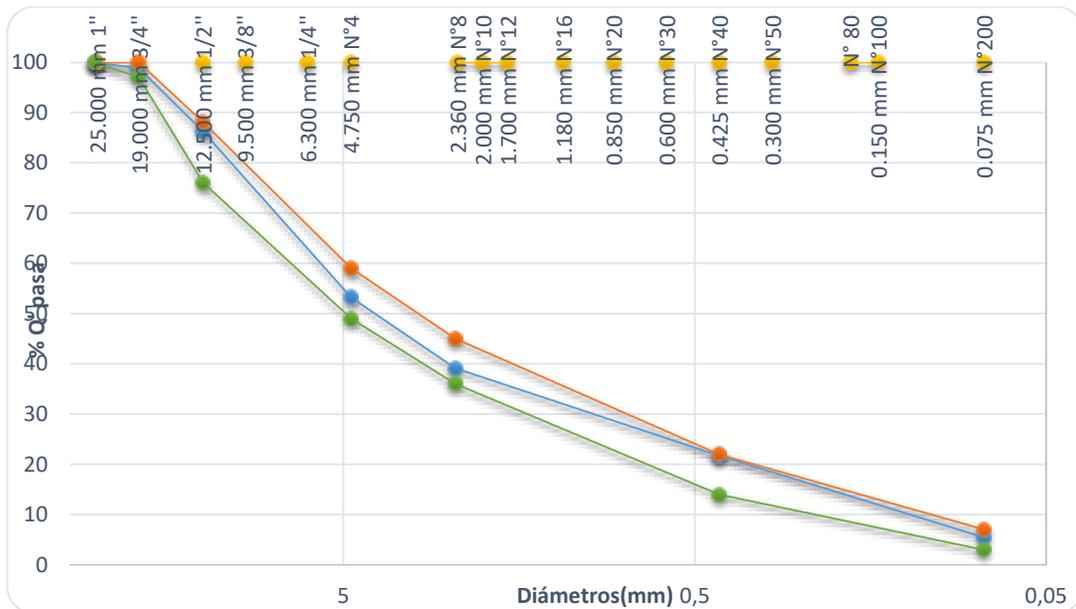
Tabla 4.1

AGREGADO	GRAVA TRIT. 3/4"		GRAVA TRIT. 3/8"		ARENA TRIT.		AREN FILLER		% QUE PASA	FAJA		FAJA
	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.		CURVA DE TRABAJO	TOLERANCIAS (+/-)	
% USADO	18%		34%		47%		1%		100,00			
TAMICES	PULG	mm.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.		INF.	SUP.	
			100,0		100,0		100,0		100,00			
1"	25,40		100,0	18,0	100,0	34,0	100,0	47,0	100,0			100 100
3/4"	19,10		93,5	16,8	100,0	34,0	100,0	47,0	98,8			97 100
1/2"	12,50		23,1	4,2	100,0	34,0	100,0	47,0	86,2			76 88
3/8"	9,50		6,0	1,1	99,1	33,7	100,0	47,0	82,8			
#4	4,75		3,9	0,7	18,4	6,2	96,3	45,2	53,2			49 59
#8	2,360		2,1	0,4	3,3	1,1	77,9	36,6	39,1			36 45
#16	1,180		1,6	0,3	3,3	1,1	65,0	30,5	32,9			
#40	0,425		1,2	0,2	3,1	1,1	41,3	19,4	21,7			14 22
#80	0,180		0,4	0,1	2,5	0,8	23,3	11,0	12,9			
#200	0,075		0,3	0,1	1,9	0,6	8,3	3,9	5,4			3 7

Las especificaciones de esta combinación de agregados corresponden a la mezcla tipo IV (Gradación Densa), subtipo c, sugeridas por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

### CURVA GRANULOMÉTRICA

Figura 4.1



Se verifica que la dosificación escogida este dentro de la banda de control de la obra, que es una faja de trabajo que permite una tolerancia en la gradación del agregado para el trabajo en obra.

#### 4.1.1.2 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE EMULSIÓN (método Marshall modificado)

Para determinar el porcentaje de emulsión en la mezcla se toman los datos necesarios y establecidos por la fórmula de Illinois.

El procedimiento de cálculo del porcentaje de emulsión necesario en una mezcla, es muy importante como punto de partida del diseño de la mezcla. Se considera el contenido mínimo de emulsión, como la cantidad mínima de asfalto, que es necesaria para cubrir todas las partículas de agregado, ser absorbido y además,

cumplir como cementante en la mezcla. El procedimiento de cálculo de contenido mínimo se presenta a continuación:

$$E = 0.05 A + 0.1 B + 0.5 C$$

Donde:

E = porcentaje en peso de la emulsión asfáltica.

A = 100 – pasante de la malla N° 8. En porcentaje.

B = (Material pasante de MALLA N° 8) – (Material pasante de la malla N° 200).

C = Material pasante de la malla N° 200

Luego con los datos determinados la fórmula quedó de la siguiente forma:

Por tanto el porcentaje de emulsión a utilizar en el diseño es:

$E = 8,96 \% \approx 9 \%$
----------------------------

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de emulsión. El margen de contenido de emulsión usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla y a la precisión que se le quiera dar a las ecuaciones de la nube de puntos.

#### **4.1.1.3 CONTENIDO ÓPTIMO DE RECUBRIMIENTO DE LA MEZCLA**

En la práctica de diseño es recomendable observar la facilidad de la emulsión para cubrir el agregado (ver figura 4.2) el cual normalmente es afectado por el

contenido de agua de premezcla. Esto da lugar a ejecutar el ensayo de recubrimiento con diferentes contenidos de humedad

Figura 4.2



### Resumen de test de cubrimiento

Tabla 4.2

Contenido de humedad %	% de agua	agua agragado gr.	1/2 hora	1 hora	1 1/2 hora	2 horas
8,00	3,87	19,37101		100%		
7,00	2,87	14,37101	60%	100%		
6,00	1,87	9,371009	50%			
5,00	0,87	4,371009		40%		65%
4,00	-0,13	-0,62899	-----	-----	-----	-----

NOTA 1: El procedimiento realizado de repetirá para todos los porcentajes de humedad para poder determinar el óptimo recubriendo

NOTA 2: Para el contenido de humedad de 4% no es posible ensayar ya que el agua es menor contenida por la mezcla

#### **4.1.1.4 TEST DE ADHESIÓN**

- Pesar una muestra de 100gr. De la mezcla de aridos con humedad natural, colocar en un recipiente de poca profundidad y curarla en el horno por un periodo de 24 horas a 60°C
- colocar mezcla curada en un vaso de 600 ml. La cual debe contener 400 ml. De agua destilada hirviendo.
- manteniendo el agua hirviendo, revolver durante 3 minutos a una vuelta por segundo aproximadamente.
- sacar el agua del frasco y colocar la mezcla sobre papel absorbente.
- después que la mezcla haya secado, evalué visualmente visual mente el contenido de asfalto retenido en los áridos, si es satisfactorio continúe el diseño de la mezcla.

#### **4.1.1.5 CONTENIDO ÓPTIMO DE AGUA DE COMPACTACION (BRIQUETAS DE PRUEBA)**

Se realizará 4 briquetas por cada contenido de humedad (8%, 7%, 6%, 5%, 4%) para poder fabricar briquetas de metodología Marshall, para lograr las especificaciones se debe realizar algunos ajustes volumétricos variando la cantidad de los agregados.

### **RESUMEN DE CONTENIDO DE AGUA**

Tabla 4.3

# DE BRIQUETA	contenidos de humedad %	peso muestra estado humedo (gr.)	peso muestra estado seco (gr.)	emulsión 8,9 en (gr.)	agua a agregar (gr)	humedad a perder (gr)	% de compactacion
1	8	1115.5	1100	97,9	42,57	11	7
2	8	1115.5	1100	97,9	42,57	11	7
3	8	1115.5	1100	97,9	42,57	11	7
4	8	1115.5	1100	97,9	42,57	11	7
5	7	1115.5	1100	97,9	31,57	11	6
6	7	1064.19	1050	93,45	30,135	10,5	6
7	7	1014,19	1000	89	28,7	10	6
8	7	1014,19	1000	89	28,7	10	6
9	6	1014,19	1000	89	18,7	10	5
10	6	1014,19	1000	89	18,7	10	5
11	6	1014,19	1000	89	18,7	10	5
12	6	1014,19	1000	89	18,7	10	5
13	5	1014,19	1000	89	8,7	10	4
14	5	1014,19	1000	89	8,7	10	4
15	5	1014,19	1000	89	8,7	10	4
16	5	1014,19	1000	89	8,7	10	4
17	4	1014,19	1000	89	-1,3	10	3
18	4	1014,19	1000	89	-1,3	10	3
19	4	1014,19	1000	89	-1,3	10	3
20	4	1014,19	1000	89	-1,3	10	3

NOTA: Las briquetas obtenidas con 1100gr y 1050 gr de material pétreo no cumplen con las dimensiones Marshall exigidas (diámetro=102mm y altura: 63.5mm), las briquetas con contenidos de material pétreo de 1000 gr. Si están dentro de las dimensiones establecidas, por tanto se tomará esta cantidad de pétreo para las briquetas de “variación del contenido de asfalto residual”

#### 4.1.1.6 GRAVEDAD BULK PARA BRIQUETAS DE PRUEBA

Psec: Peso de la briqueta al aire.

Psum: Peso de la briqueta sumergida en agua.

Psss: Peso de la briqueta saturada superficialmente seca.

P. específico agregados = 2,58 gr. /cm<sup>3</sup>

### Gravedad Bulk

Tabla 4.4

# briquetas	Psec	Psum	Psss	GB
1	1140,4	614,5	1158,4	2,12
2	1150,6	625,4	1178,3	2,12
3	1115,8	610,4	1129	2,17
4	1120,4	610,1	1135,6	2,16
5	1062,2	622,6	1076,5	2,37
6	1164,2	590,6	1156,6	2,05
7	1134,4	578,3	1148,8	2,01
8	1058,2	565,4	1081,4	2,09
9	1060,2	560,5	1088,4	2,05
10	1056,4	557,8	1078,5	2,06
11	1055,8	559,4	1079,4	2,07
12	1055,5	658,2	1067,8	2,61
13	1055,3	566,2	1070,7	2,12
14	1056,5	563,6	1076,5	2,09
15	1057,8	568,1	1071,6	2,12
16	1058,6	566,7	1069,8	2,12
17	-----	-----	-----	-----
18	-----	-----	-----	-----
19	-----	-----	-----	-----
20	-----	-----	-----	-----

NOTA: Las briquetas obtenidas con 1100gr y 1050 gr de material pétreo no cumplen con las dimensiones Marshall exigidas (diámetro=102mm y altura: 63.5mm), las briquetas con contenidos de material pétreo de 1000 gr. Si están dentro de las dimensiones establecidas, por tanto se tomara esta cantidad de pétreo para las briquetas de “variación del contenido de asfalto residual”

### RESUMEN GRAVEDAD BULK

Tabla 4.5

# briquetas	% emulsión	% humedad	P.agre	Psec	Psum	Psss	GB	Media
1	8,9	8%	1100	1140,4	614,5	1158,4	2,12	2,14
2			1100	1150,6	625,4	1178,3	2,12	
3			1100	1115,8	610,4	1129	2,17	
4			1100	1120,4	610,1	1135,6	2,16	
5		7%	1100	1062,2	642,6	1076,5	2,48	2,17
6			1050	1164,2	590,6	1156,6	2,05	
7			1000	1134,4	578,3	1138,8	2,03	
8			1000	1058,2	565,4	1071,4	2,11	
9		6%	1000	1060,2	554,5	1088,4	2,03	2,15
10			1000	1056,4	553,8	1098,5	2,00	
11			1000	1055,8	552,4	1085,4	2,02	
12			1000	1055,5	651,2	1067,8	2,56	
13		5%	1000	1055,3	566,2	1070,7	2,12	2,12
14			1000	1056,5	563,6	1076,5	2,09	
15			1000	1057,8	568,1	1071,6	2,12	
16			1000	1058,6	566,7	1069,8	2,12	
17		4%	1000	-----	-----	-----	-----	
18			1000	-----	-----	-----	-----	
19			1000	-----	-----	-----	-----	
20			1000	-----	-----	-----	-----	

#### 4.1.1.7 DOSIFICACIONES DE BRIQUETAS PARA MEZCLA FRÍA CON EMULSIÓN (Marshall Modificado)

El Procedimiento adoptado es el propuesto por la Universidad de Illinois utilizando el método Marshall modificado, con cualquier grado de emulsión asfáltica y agregados de granulometría densa con tamaño máximo de 1" (25mm)

##### 4.1.1.7.1 VARIACION DEL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL

Contenido Teórico del Asfalto residual: Es el contenido óptimo de asfalto para la elaboración de la mezcla más la tolerancia  $\pm 1 \%$ .

Para el diseño propuesto se usará: **BETUMIX CRS-2H**

### Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 6,9 % Emulsión

Tabla 4.6

Tamiz		% E	P. agregado (gr)
		<b>6,9</b>	<b>1000</b>
Pasa	Retiene	% Ret	Peso Acum
1"	3/4"	1,2	11,65
3/4"	1/2"	12,7	126,78
1/2"	3/8"	3,4	33,98
3/8"	#4	29,6	295,67
#4	#8	14,1	140,75
#8	#16	6,2	61,88
#16	#40	11,2	112,36
#40	#80	8,8	88,30
#80	#200	7,4	74,32
#200	fondo	5,4	54,29
Emulsión (gr)		<b>69</b>	
% óptimo de agua		6,50	
% agua en emulsión		2,08	
% agua añadir		4,42	
P. añadir agua (gr.)		44,16	
P. total briqueta		1113,16	
agua a eliminar		11,13	
P. final para comp.		1102,03	

### Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 7,9 % Emulsión

Tabla 4.7

Tamiz		% E	P. agregado (gr)
		7,9	1000
Pasa	Retiene	% Ret	Peso Acum
1"	3/4"	1,2	11,65
3/4"	1/2"	12,7	126,78
1/2"	3/8"	3,4	33,98
3/8"	#4	29,6	295,67
#4	#8	14,1	140,75
#8	#16	6,2	61,88
#16	#40	11,2	112,36
#40	#80	8,8	88,30
#80	#200	7,4	74,32
#200	fondo	5,4	54,29
Emulsión (gr)		79	
% óptimo de agua		6,50	
% agua en emulsión		2,39	
% agua añadir		4,11	
P. añadir agua (gr.)		41,14	
P. total briqueta		1120,14	
agua a eliminar		11,20	
P. final para comp.		1108,94	

**Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 8,9 % Emulsión**

Tabla 4.8

Tamiz		% E	P. agregado (gr)
		8,9	1000
Pasa	Retiene	% Ret	Peso Acum
1"	3/4"	1,2	11,65
3/4"	1/2"	12,7	126,78
1/2"	3/8"	3,4	33,98
3/8"	#4	29,6	295,67
#4	#8	14,1	140,75
#8	#16	6,2	61,88
#16	#40	11,2	112,36
#40	#80	8,8	88,30
#80	#200	7,4	74,32
#200	fondo	5,4	54,29
Emulsión (gr)		89	
% óptimo de agua		6,50	
% agua en emulsión		2,69	
% agua añadir		3,81	
P. añadir agua (gr.)		38,12	
P. total briqueta		1127,12	
agua a eliminar		11,27	
P. final para comp.		1115,85	

**Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 9,9 % Emulsión**

Tabla 4.9

Tamiz		% E	P. agregado (gr)
		9,9	1000
Pasa	Retiene	% Ret	Peso Acum
1"	3/4"	1,2	11,65
3/4"	1/2"	12,7	126,78
1/2"	3/8"	3,4	33,98
3/8"	#4	29,6	295,67
#4	#8	14,1	140,75
#8	#16	6,2	61,88
#16	#40	11,2	112,36
#40	#80	8,8	88,30
#80	#200	7,4	74,32
#200	fondo	5,4	54,29
Emulsión (gr)		99	
% óptimo de agua		6,50	
% agua en emulsión		2,99	
% agua añadir		3,51	
P. añadir agua (gr.)		35,10	
P. total briqueta		1134,10	
agua a eliminar		11,34	
P. final para comp.		1122,76	

**Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 10,9 % Emulsión**

Tabla 4.10

Tamiz		% E	P. agregado (gr)
		10,9	1000
Pasa	Retiene	% Ret	Peso Acum
1"	3/4"	1,2	11,65
3/4"	1/2"	12,7	126,78
1/2"	3/8"	3,4	33,98
3/8"	#4	29,6	295,67
#4	#8	14,1	140,75
#8	#16	6,2	61,88
#16	#40	11,2	112,36
#40	#80	8,8	88,30
#80	#200	7,4	74,32
#200	fondo	5,4	54,29
<b>Emulsión (gr)</b>		<b>109</b>	
<b>% óptimo de agua</b>		6,50	
<b>% agua en emulsión</b>		3,29	
<b>% agua añadir</b>		3,21	
<b>P. añadir agua (gr.)</b>		32,08	
<b>P. total briqueta</b>		1141,08	
<b>agua a eliminar</b>		11,41	
<b>P. final para comp.</b>		1129,67	

Se calculan las cantidades retenidas de material para cada tamiz, en base a una briqueta en gramos, con contenidos de asfaltos que varían entre 6,9 y 10,9 % con incrementos parciales de cada 1 %.

Es importante mencionar, que el agregado para la elaboración de una mezcla frío tiene que estar seco, previo al pesado por tamices. Mientras que el agregado para la mezcla con asfalto espumado tiene una humedad natural, que posteriormente es uniformizada y llevada al Contenido de Humedad Óptimo en el momento previo al mezclado con el asfalto espumado.

## 4.2 DOSIFICACIÓN DE BRIQUETAS PARA MEZCLA RECICLADAS CON ASFALTO ESPUMADO

Se utilizará un diseño propio del autor por consecuencia de la investigación realizada.

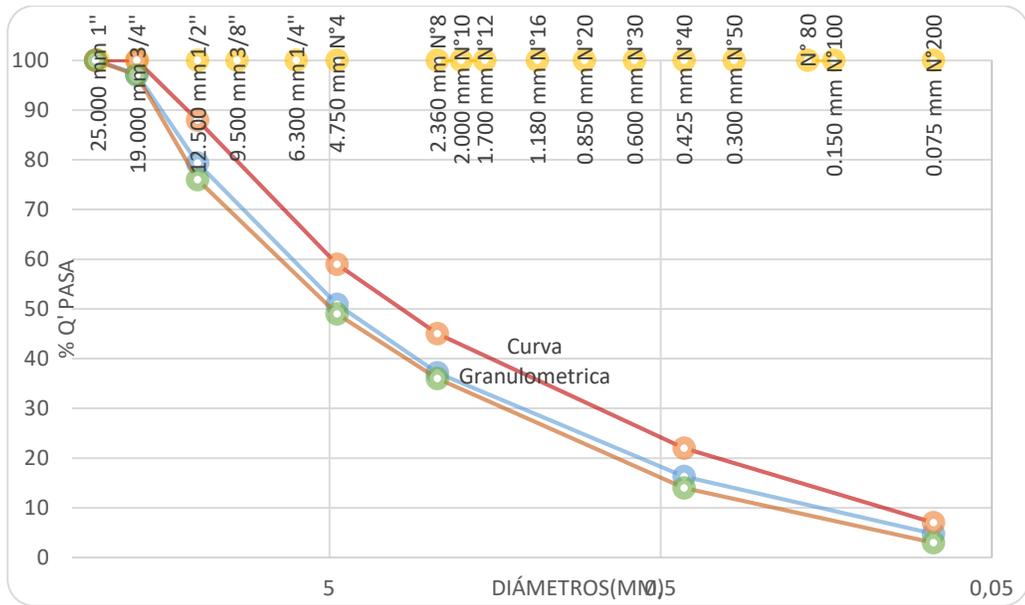
### 4.2.1 DOSIFICACIÓN TENTATIVA POR TANTEOS DEL RAP.

Tabla 4.11

AGREGADO		Material Reciclado 3/4"		GRAVA TRIT. 3/8"		ARENA TRIT.		AREN FILLER		% QUE PASA
% USADO		98%		0%		0%		2%		
TAMICES		% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	
PULG	mm.									
		100,0						100,0		100,00
1"	25,40	100,0	98,0		0,0		0,0	100,0	2,0	100,0
3/4"	19,10	97,2	95,3		0,0		0,0	100,0	2,0	97,3
1/2"	12,50	78,9	77,3		0,0		0,0	100,0	2,0	79,3
3/8"	9,50	69,3	67,9		0,0		0,0	100,0	2,0	69,9
#4	4,75	49,9	48,9		0,0		0,0	100,0	2,0	50,9
#8	2,360	35,9	35,2		0,0		0,0	100,0	2,0	37,2
#16	1,180	28,4	27,8		0,0		0,0	100,0	2,0	29,8
#40	0,425	14,6	14,3		0,0		0,0	100,0	2,0	16,3
#80	0,180	6,5	6,4		0,0		0,0	99,4	2,0	8,4
#200	0,075	3,2	3,1		0,0		0,0	83,3	1,7	4,8

Curva granulométrica del RAP.

Figura 4.3



**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz - 1 %Asf. Espumado**

Tabla 4.12

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		1	1131,87	1200	1188
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	31,06	31,06	
3/4"	1/2"	17,9	202,99	234,05	
1/2"	3/8"	9,4	106,49	340,53	
3/8"	#4	19,0	215,19	555,72	
#4	#8	13,7	155,29	711,02	
#8	#16	7,4	83,19	794,21	
#16	#40	13,5	153,07	947,28	
#40	#80	8,0	89,98	1037,27	
#80	#200	3,6	40,25	1077,51	
#200	fondo	4,8	54,35	1131,87	
Asf. Espumado (gr)		12			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		56,13			

**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz – 1,4 %Asf. Espumado**

Tabla 4.13

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		1,4	1127,29	1200	1183,2
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	30,93	30,93	
3/4"	1/2"	17,9	202,17	233,10	
1/2"	3/8"	9,4	106,06	339,16	
3/8"	#4	19,0	214,32	553,48	
#4	#8	13,7	154,66	708,14	
#8	#16	7,4	82,86	791,00	
#16	#40	13,5	152,46	943,45	
#40	#80	8,0	89,62	1033,07	
#80	#200	3,6	40,09	1073,16	
#200	fondo	4,8	54,13	1127,29	
Asf. Espumado (gr)		16,8			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		55,91			

**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz – 1,8 %Asf. Espumado**

Tabla 4.14

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		1,8	1122,72	1200	1178,4
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	30,81	30,81	
3/4"	1/2"	17,9	201,35	232,16	
1/2"	3/8"	9,4	105,63	337,78	
3/8"	#4	19,0	213,45	551,23	
#4	#8	13,7	154,04	705,27	
#8	#16	7,4	82,52	787,79	
#16	#40	13,5	151,84	939,63	
#40	#80	8,0	89,26	1028,88	
#80	#200	3,6	39,92	1068,81	
#200	fondo	4,8	53,91	1122,72	
Asf. Espumado (gr)		21,6			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		55,68			

**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz – 2,2 %Asf. Espumado**

Tabla 4.15

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		2,2	1118,15	1200	1173,6
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	30,68	30,68	
3/4"	1/2"	17,9	200,53	231,21	
1/2"	3/8"	9,4	105,20	336,41	
3/8"	#4	19,0	212,58	548,99	
#4	#8	13,7	153,41	702,40	
#8	#16	7,4	82,18	784,58	
#16	#40	13,5	151,22	935,80	
#40	#80	8,0	88,89	1024,69	
#80	#200	3,6	39,76	1064,45	
#200	fondo	4,8	53,69	1118,15	
Asf. Espumado (gr)		26,4			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		55,45			

**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz – 2,6 %Asf. Espumado**

Tabla 4.16

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		2,4	1115,86	1200	1171,2
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	30,62	30,62	
3/4"	1/2"	17,9	200,12	230,74	
1/2"	3/8"	9,4	104,98	335,72	
3/8"	#4	19,0	212,15	547,87	
#4	#8	13,7	153,10	700,96	
#8	#16	7,4	82,02	782,98	
#16	#40	13,5	150,91	933,89	
#40	#80	8,0	88,71	1022,60	
#80	#200	3,6	39,68	1062,28	
#200	fondo	4,8	53,58	1115,86	
Asf. Espumado (gr)		28,8			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		55,34			

**Dosificación granulométrica de RAP retenidos por tamiz - 3 %Asf. Espumado**

Tabla 4.17

Tamiz		% Esp.	P. agregado (gr)	P. BRIQUET	P. sin espuma
		3	1109,00	1200	1164
Pasa	Retiene	% Ret	peso ret	peso acum	
1"	3/4"	2,7	30,43	30,43	
3/4"	1/2"	17,9	198,89	229,32	
1/2"	3/8"	9,4	104,33	333,65	
3/8"	#4	19,0	210,84	544,50	
#4	#8	13,7	152,15	696,65	
#8	#16	7,4	81,51	778,16	
#16	#40	13,5	149,98	928,15	
#40	#80	8,0	88,17	1016,31	
#80	#200	3,6	39,44	1055,75	
#200	fondo	4,8	53,25	1109,00	
Asf. Espumado (gr)		36			
CHO		6,30			
CHMD		4,73			
P. CHMD		55,00			

Corresponde decir, que una mezcla con asfalto espumado, brinda la ventaja de poder usar el agregado húmedo. Pero para poder alcanzar una compactación óptima, es necesario adicionar una determinada cantidad de agua (CHO) AL 75% (CHDM), calculada por el ensayo de proctor modificado T-180

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS MARSHALL DE MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN

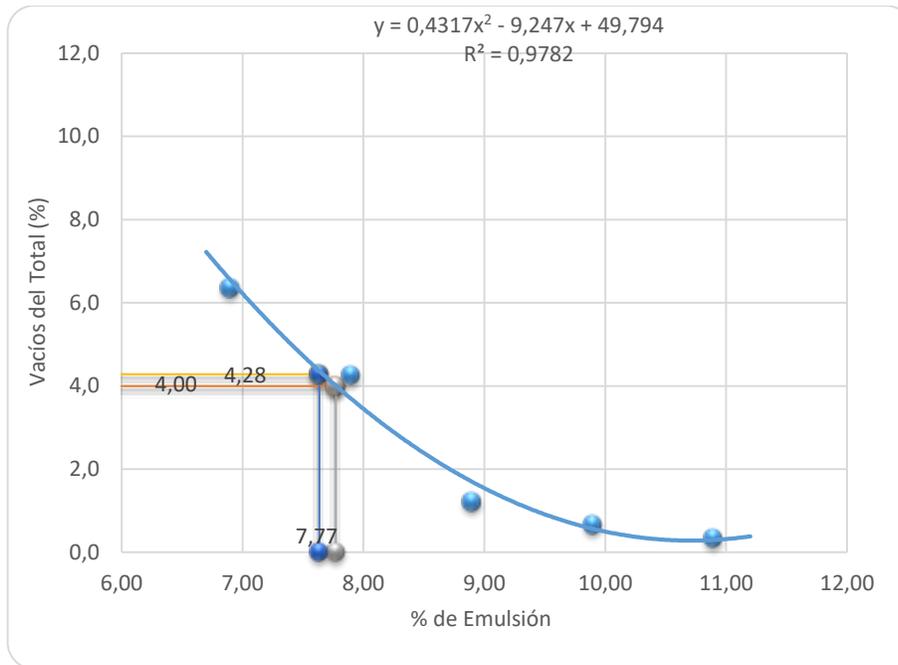


**Tabla 4.19**

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL				
CARACTERISTICAS	% DE EMUL	VALORES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DENSIDAD	7,64	2,262	-----	-----
% VACIOS	7,64	4,28	<b>3</b>	<b>5</b>
V.A.M.	7,64	21,80	<b>15</b>	
R.B.V.	7,64	80,50		
ESTABILIDAD (Lb)	7,64	1500,0	> 1500 Lb. (50 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	7,64	6,20	<b>8</b>	<b>16</b>
<b>% OPT. DE EMULSION PROPUESTO</b>			<b>7,64</b>	

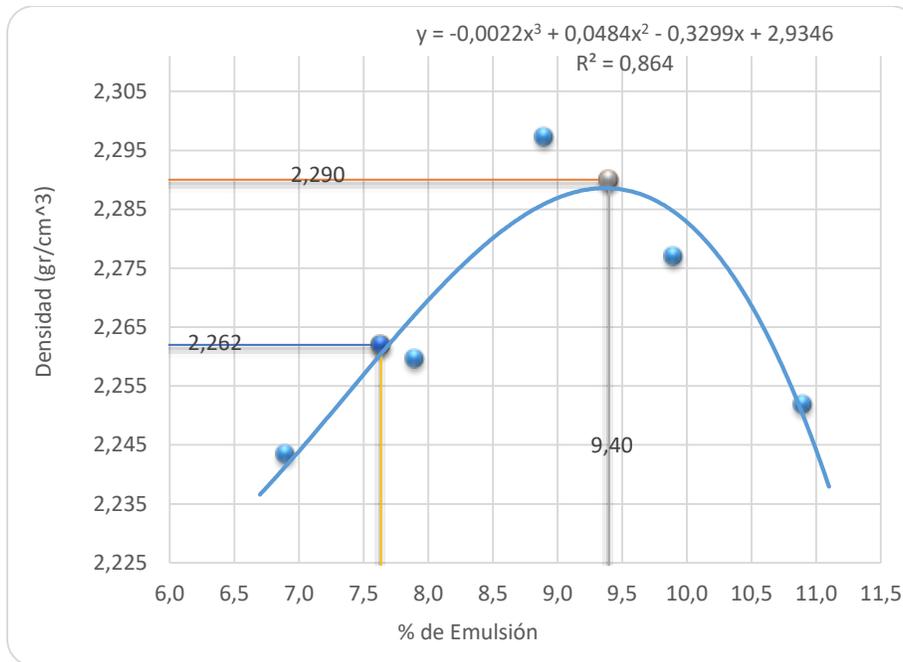
**4.3.1.1 VACÍOS DE LA MEZCLA TOTAL VS. % EMULSIÓN**

**Figura 4.4**



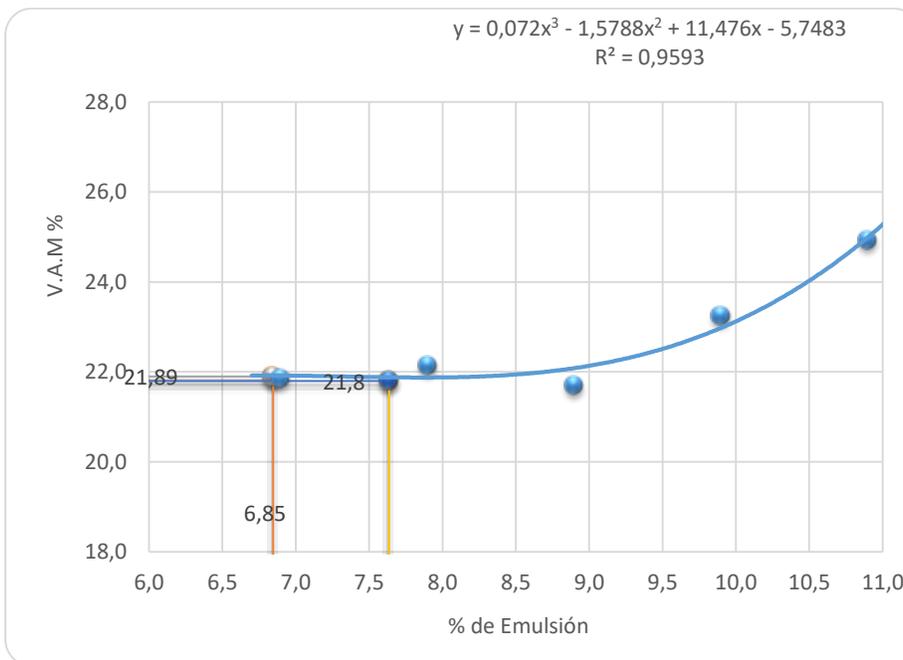
**4.3.1.2 DENSIDAD DE LA MEZCLA TOTAL VS. % EMULSIÓN**

**Figura 4.5**



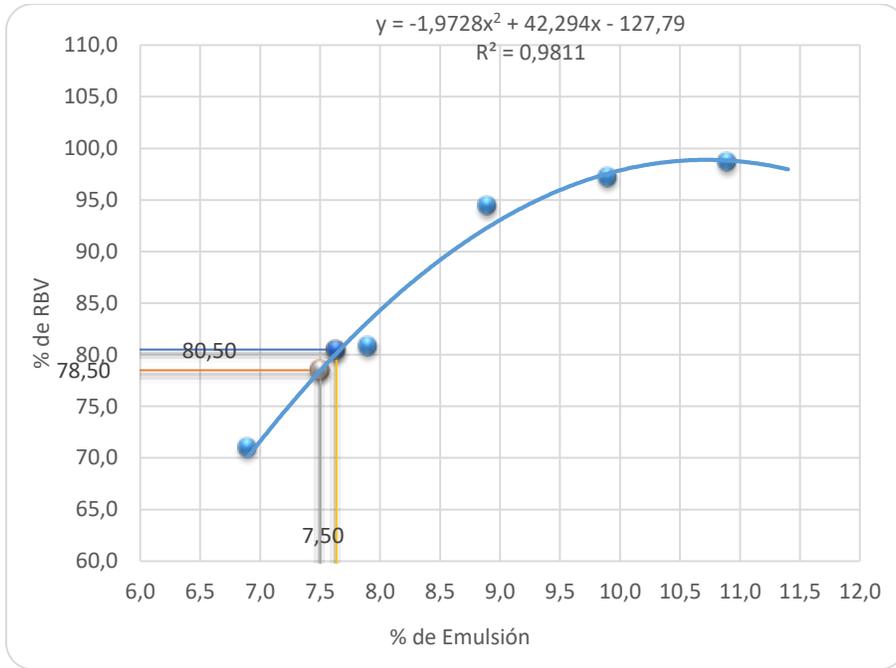
### 4.3.1.3 VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL VS. % EMULSIÓN

Figura 4.6



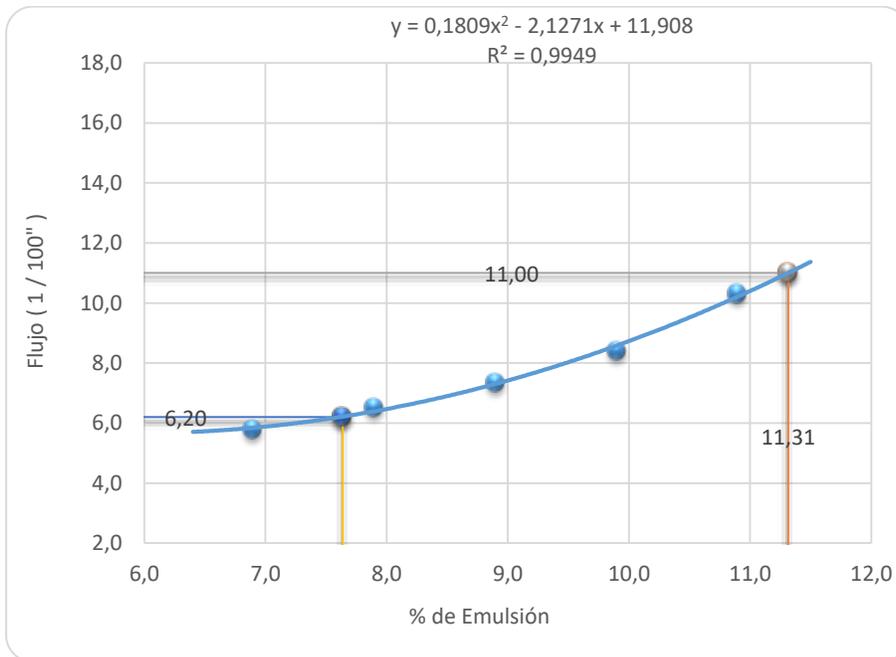
### 4.3.1.4 DENSIDAD DE LA MEZCLA TOTAL VS. % EMULSIÓN

Figura 4.7



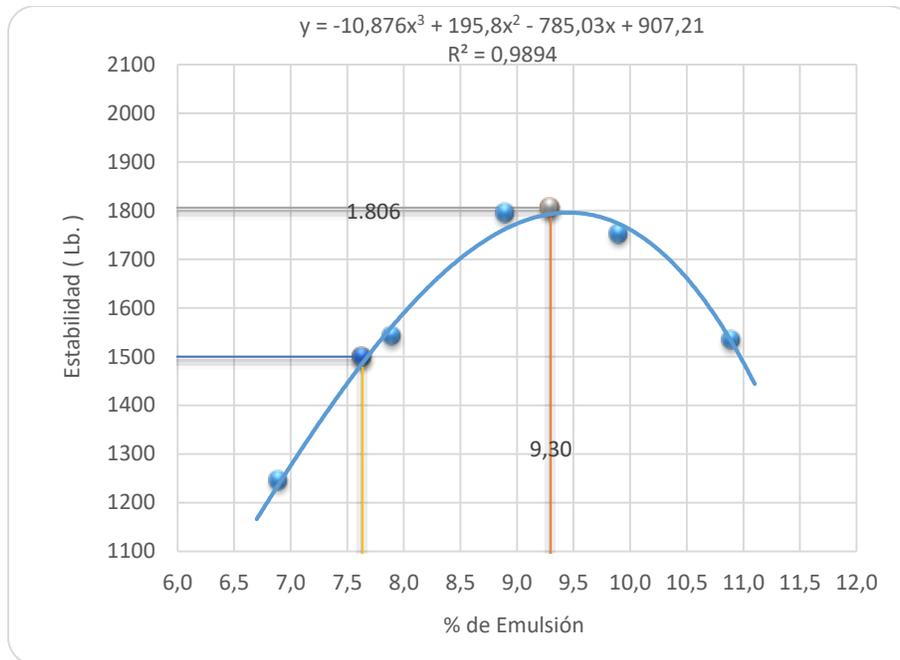
#### 4.3.1.5 FLUENCIA VS. % EMULSIÓN

Figura 4.8



#### 4.3.1.6 ESTABILIDAD VS. % EMULSIÓN

Figura 4.9



#### 4.4 CARACTERÍSTICAS MARSHALL DE LA MEZCLA RECICLADA CON ASFALTO ESPUMADO.

Tabla 4.20

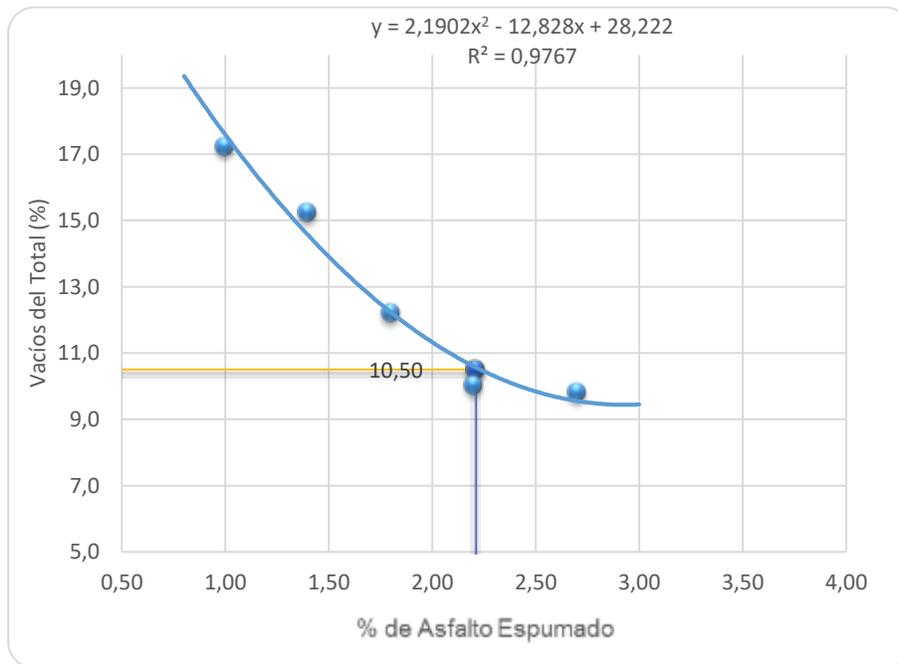


VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL				
CARACTERISTICAS	% DE ASFALTO	VALORES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DENSIDAD	2,21	2,312	-----	-----
% VACIOS	2,21	10,50	3	5
V.A.M.	2,21	14,90	15	
R.B.V.	2,21	32,00		
ESTABILIDAD (Lb)	2,21	1790,0	> 1500 Lb. (50 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	2,21	11,70	8	14
<b>% OPT. DE ASFALTO ESPUMADO PROPUESTO</b>			<b>2,21</b>	

CURVAS MARSHALL PARA DETERMINAR EL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO

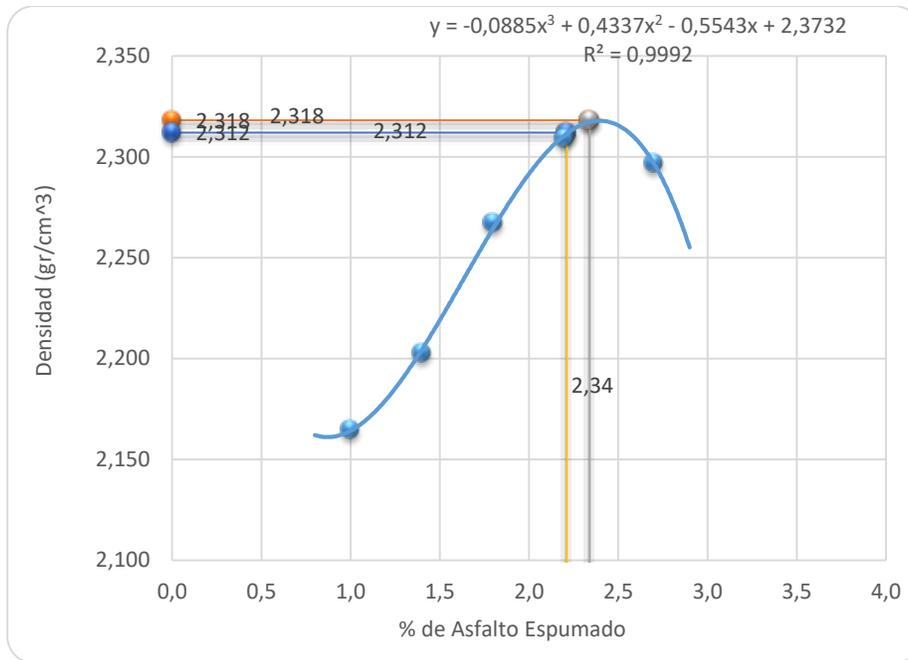
#### 4.4.1.1 VACÍOS DE LA MEZCLA TOTAL VS. % ASF – ESPUMADO

Figura 4.10



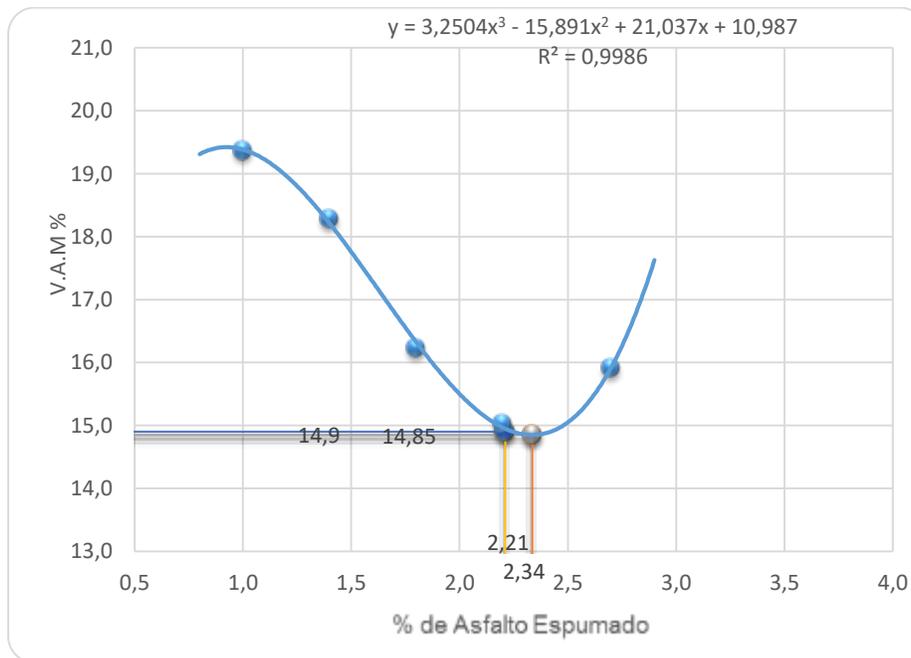
#### 4.4.1.2 DENSIDAD DE LA MEZCLA TOTAL VS. %ASF – ESPUMADO

Figura 4.11



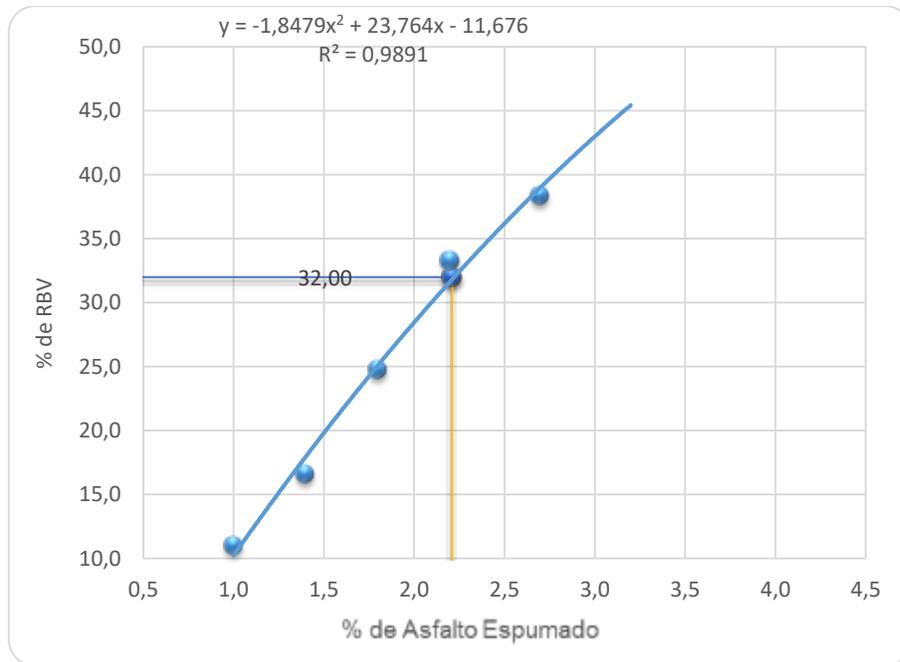
#### 4.4.1.3 VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL VS. %ASF – ESPUMADO

Figura 4.12



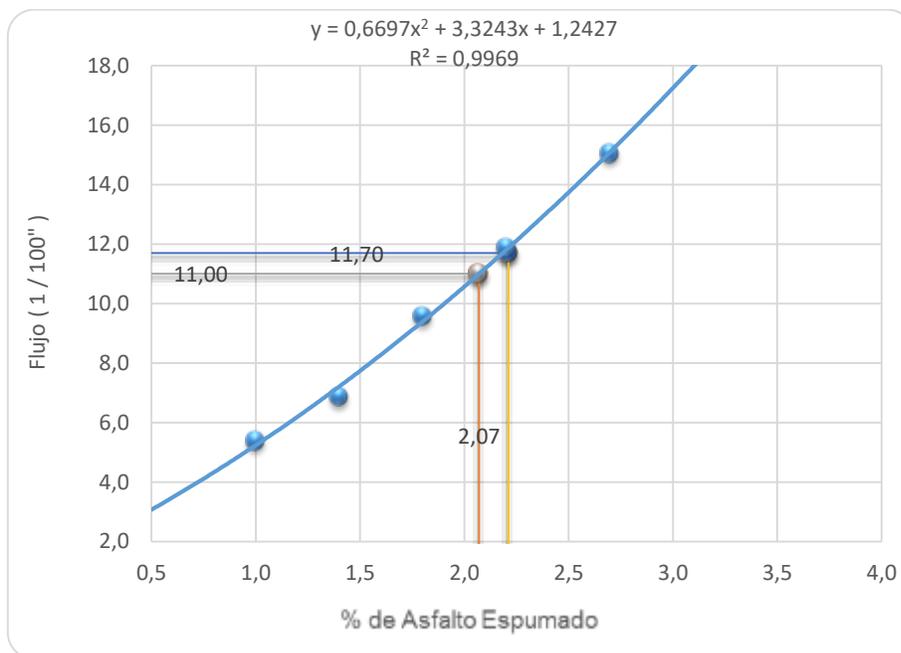
#### 4.4.1.4 RELACIÓN BETUMEN VACÍOS VS. %ASF – ESPUMADO

Figura 4.13



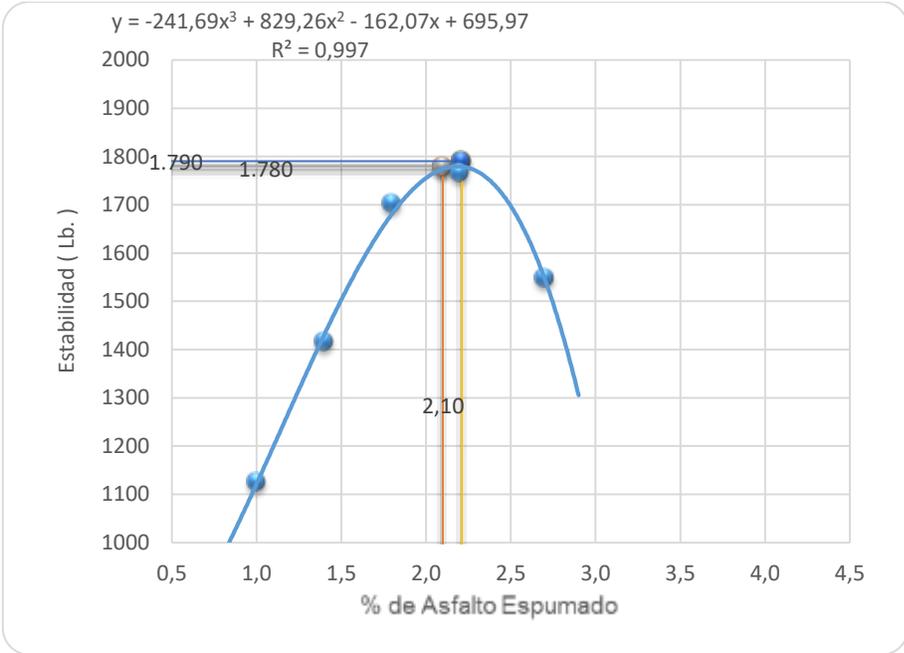
#### 4.4.1.5 FLUENCIA VS. %ASF – ESPUMADO

Figura 4.14



#### 4.4.1.6 ESTABILIDAD VS. %ASF – ESPUMADO

Figura 4.15



**4.5 ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS**

**4.5.1 RESULTADOS DE LABORATORIO CEMENTO ASFÁLTICO**

El cemento asfáltico cumple con las especificaciones requeridas para la elaboración de una mezcla asfáltica. Estas se verificaron realizando los ensayos de:

**Tabla 4.22**

ENSAYOS	85-100		RESULTADO	NORMA
	Mínimo	Máximo		
Viscosidad Saybolt-Furol a 135C, °C (seg)	85		<b>131</b>	ASTM D-102
Penetración muestra original (25 °C, 100gr, 5s)mm/10	85	100	<b>90,22</b>	ASTM D-5
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 (cm)	100		<b>129</b>	ASTM D-113
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	232		<b>257</b>	ASTM D-92
Ensayo de peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )			<b>1,016</b>	ASTM D-70

En los que se determinó las características básicas exigidas en las especificaciones del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos y las normas AASHTO, adoptadas en nuestro medio por ausencia de especificaciones propias.

#### 4.5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO EMULSIÓN ASFALTICA

La emulsión asfáltica cumple con las especificaciones solicitadas para el diseño de mezclas asfálticas en frío, a continuación se muestra el sig. Detalle de los resultados.

**Tabla 4.23**

ENSAIO	MÉTODO	UNID.	ESPECIF.	RESULTADO	
				STRAT.	CLIENTE
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C	AASHTO T 59' Seção 08	Seg	100 - 400	<b>341</b>	
Estabilidade 24 hrs	AASHTO T 59' Seção 17	% massa	1 máx.	<b>0,9</b>	
Desemulsibilidade	AASHTO T 59' Seção 09	% massa	40 min	<b>55</b>	
Carga da partícula	AASHTO T 59' Seção 07		Positiva	<b>POS</b>	
Penetração 0,84mm	AASHTO T 59' Seção 12	% massa	0,1 máx.	<b>0,0</b>	
<b>Destilação</b>					
Solvente destilado	AASHTO T 59' Seção 05	% volume	3 máx.	<b>0,0</b>	
Resíduo		% massa	65 min	<b>69,8</b>	
<b>Ensaio sobre o resíduo seco</b>					
Penetração (100g, 5s, 25°C)	AASHTO T 49	0,1mm	50 - 250	<b>58</b>	
Ductidade 25°C, 5 cm/min	AASHTO T 51	Cm	100 min	<b>&gt;100</b>	
Solubilidade em tricloretileno	AASHTO T 44	%	97,5 min	<b>98,2</b>	
<b>Ensaio da mancha</b>					
95% heptano + 5% xileno	AASHTO T 102		Negativo	<b>NEG</b>	
90% heptano + 10% xileno			Negativo		
85% heptano + 15% xileno			Negativo		
80% heptano + 20% xileno			Negativo		

#### 4.5.3 RESULTADO AGREGADOS

Los agregados, por ser utilizados por una institución pública como materia prima en la pavimentación de calles y avenidas, cumple con todas las características exigidas para este fin, en características requeridas para el diseño, como granulometría y peso específico.

**Tabla 4.24**

ENSAYOS	ESPECIFICACION		RESULTADO	NORMA
	Mínimo	Máximo		
% de caras Fracturadas en grueso	80	–		ASTM D 5821-95
Equivalente de la arena (%)	50	–	<b>52,4</b>	ASTM D-2419
Abrasión de gruesos 3/4 (%)		40	<b>27,9</b>	ASTM C-131
Abrasión de gruesos 3/8 (%)		40	<b>25,88</b>	ASTM C-131
Peso específico de finos (Tn/m3)		–	<b>2,602</b>	ASTM D-128
Peso específico de agregado grueso 3/4 (Tn/m3)		–	<b>2,576</b>	ASTM D-127
Peso específico de agregado grueso 3/8 (Tn/m3)		–	<b>2,563</b>	ASTM D-127
Absorción de agregado Fino (%)		–	<b>1,874</b>	ASTM D-128
Absorción de agregado grueso 3/4 (%)		–	<b>1,273</b>	ASTM D-127
Absorción de agregado grueso 3/8 (%)		–	<b>1,163</b>	ASTM D-127
Partículas alargadas y planas (%)	–	10		ASTM D-4791

#### **4.5.4 RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA DEL ASFALTO ESPUMADO**

Se realizaron en total 25 ensayos, separados en 5 grupos de temperaturas, cada uno con cinco porcentajes de agua de inyección en la mezcla, para determinar, en función de la relación de expansión y vida media, la temperatura y la cantidad de agua necesaria para generar un espumado óptimo que cumpla con las sugerencias de diseño (RE entre 12 – 20 y VM > 15s).

- **1<sup>er</sup> Ensayo.-** En el primer ensayo, se definió una temperatura de 140°C, y posteriormente un rango de agua de inyección entre 2 y 4 %.

Todos los resultados obtenidos para la Vida Media se encuentran ampliamente dentro de los parámetros sugeridos, esto notablemente a costa de la Relación de

Expansión, debido a que con ningún porcentaje de agua de inyección se alcanza el parámetro mínimo sugerido.

- **2<sup>do</sup> Ensayo.-** En el segundo ensayo, se definió una temperatura de 150°C, y un rango de agua de inyección igual al del anterior ensayo.

Nuevamente, todos los resultados de Vida Media están dentro de los rangos y sugerencias mínimas para el diseño, a diferencia de esta característica, no se obtuvieron resultados satisfactorios para la relación de expansión, que estén dentro de las sugerencias bibliográficas.

- **3<sup>er</sup> Ensayo.-** En el tercer ensayo se definió una temperatura de 160°C, y un rango de inyección de agua igual al anterior.

Para este ensayo se obtuvieron resultados satisfactorios para la Vida Media, salvo para el porcentaje de 4% de agua de inyección que generó una Vida Media de 13,8 seg. La relación de expansión se vio considerablemente afectada para porcentajes de agua por encima de 2.5% de agua de inyección, solo se obtuvo un resultado satisfactorio para el porcentaje de 4% de agua con una relación de expansión de 12,34.

- **4<sup>to</sup> Ensayo.-** En el cuarto ensayo, se definió una temperatura de 170°C, y un rango de agua de inyección igual al del anterior ensayo.

En esta oportunidad los ensayos de vida media cumplen la especificación los porcentajes de 2%, 2,5% y 3%, sin embargo la relación de expansión cumple en los rangos de agua de 3,5 y 4%.

- **5<sup>to</sup> Ensayo.-** En el tercer ensayo se definió una temperatura de 180°C, y un rango de inyección de agua igual al anterior.

Para este ensayo se obtuvieron resultados satisfactorios para la Vida Media, salvo para el porcentaje de 3,5 y 4% de agua de inyección que generó una Vida Media de 14,5 y 11,6 seg. Respectivamente

La relación de expansión se vio afectada para porcentajes de agua por encima de 2% de agua de inyección, ninguna relación de expansión obtuvo un resultado satisfactorio el mayor resultado se obtuvo para 3,5% de agua con 11,91 veces.

En base al criterio que se sugiere favorecer la Vida Media en desmedro de la Razón de Expansión, y considerando que los 180°C están muy próximos a la temperatura máxima sugerida por el fabricante del cemento asfáltico, es que se escogió un porcentaje de 3% de agua de inyección y una temperatura de 170°C, como punto de partida para la elaboración de mezclas asfálticas recicladas con asfalto espumado.

Posteriormente, como consecuencia de los resultados obtenidos durante la elaboración de la mezcla, se optó por incrementar la temperatura a 165°C con la que se obtuvieron mejores resultados y una mayor facilidad a la hora de mezclar el cemento asfáltico con el RAP húmedo y frío más filler en 1%

#### **4.5.5 DOSIFICACION POR EL MÉTODO DE TANTEOS**

Para la dosificación por método de tanteos, se obtuvo una curva granulométrica que se ajustó adecuadamente a la faja de trabajo para *GRADACIONES DENSAS TIPO IV*, sub tipo c. El agregado utilizado en el diseño de la mezcla fue provisto por el Gobierno Municipal de la Provincia Cercado, con autorización de la Oficialía Mayor Técnica. El agregado es proveniente del río Santa Ana, actualmente utilizado para las obras de pavimentación de dicha institución, razón por la que se afirma que cumple con los requisitos técnicos necesarios para la finalidad propuesta.

Posteriormente se definió un rango de control en obra, equivalente a un 2,5% menor que el límite superior, y 2,5% mayor al límite menor de la faja de trabajo. Como un rango de control en obra, requerido por el Instituto de Asfalto (EEUU).

La curva granulométrica que mejor se adaptó, fue la correspondiente a una dosificación de 18% de Grava de 3/4", 34% de Gravilla de 3/8" y 47% de Arena y 1% de material filler, esta dosificación tentativa es para la mezcla en frío con emulsión.

Para la dosificación tentativa del reciclado de pavimento flexible se utiliza una granulometría de 98% de materia frezado y 2% de material filler para poder cumplir con las especificaciones de la faja de trabajo.

Para determinar los porcentajes de material que pasa los tamices que no fueron utilizados para generar la curva granulométrica inicial, (#50) de cada material, se proyectó una línea de tendencia de la curva granulométrica final, y por medio de esta una ecuación que relacione la apertura de tamiz en mm con la cantidad de material pasante a través de

este. Sustituyendo el valor de la apertura de tamiz en la ecuación se obtuvo la cantidad de material pasante y se verificó que estas cantidades estén dentro de las especificaciones dadas para cada tamiz en la faja de trabajo.

Establecidos los porcentajes de material pasante de material, se procedió a realizar las dosificaciones para cada una de las briquetas. Con este objetivo, se calculó nuevamente el porcentaje de material retenido para cada uno de los tamices que conforman un juego completo, utilizado en la dosificación de briquetas para mezclas asfálticas.

- **Mezcla asfáltica en frío con emulsión.**

Para calcular el peso de agregado por briketa, se partió de 1000grs. Haciendo un ajuste volumétrico para poder cumplir las especificaciones del ensayo de Marshall, (diámetro=102mm y altura: 63.5mm) sobre la base de 1200 gr. Las briquetas obtenidas con 1100gr y 1050 gr de material pétreo no cumplen con las dimensiones Marshall exigidas.

Para cada uno de los 5 puntos escogidos en el diseño Marshall Modificado. Valga aclarar que el punto con un contenido de emulsión más bajo contenía una cantidad de 6,9% y el más alto un 10,9%, con incrementos parciales de 1 %, en base a las experiencias de la institución donde se realizaron los ensayos (SEDECA).

Se calcularon los pesos retenidos de material obteniendo resultados razonables para cada tamiz y se prepararon 3 muestras de agregado para cada punto.

Se completó el peso del agua de compactación óptimo faltante de la diferencia entre el contenido óptimo de compactación menos el contenido de agua de la emulsión en este caso 30,2% de agua contaba la emulsión Betumix CRS-2H.

Después de realizar el mezclado de la briketa se procedió a quitar 1% de humedad para realizar la compactación, esto se realizó por sugerencia del manual de carreteras.

El curado de estas briquetas se realizó un día a temperatura ambiente sin desmoldar, después de 24 horas se desmoldo y coloco al horno a 60°C por 24 horas.

- **Mezcla asfáltica reciclada en frío con espuma expansiva.**

Para calcular el peso del RAP por briqueta, se descontó el peso del asfalto espumado, sobre la base de 1200 gr. para cada uno de los 6 puntos escogidos en el diseño Marshall. Valga aclarar que el punto con un contenido de asfalto más bajo contenía una cantidad de 1% y el más alto un 3%, (valores de referencia obtenidos a través de la investigación) con incrementos parciales de 0.4%, pero una vez obtenidos los pesos de material necesarios por tamiz, se les descontó el peso del agua necesaria para la compactación de la mezcla, un equivalente a un 75% del contenido óptimo de humedad obtenida por el ensayo de proctor modificado T180 en peso de la muestra final. Esto con la finalidad de llevar el conjunto de materiales a un peso final de 1200 gr. Exigido por el método Marshall.

Posteriormente se verificó que la cantidad de agua adicionada a la mezcla, tiene un efecto netamente constructivo, debido a que el agua extra adicionada al sistema agregado – cemento asfáltico, se evapora, por consecuencia del método de curado de las briquetas elaboradas con asfalto espumado. Razón por la cual se puede apreciar una diferencia de los volúmenes de briquetas con Emulsión asfáltica.

El curado de las briquetas con espuma expansiva se realizó un día a temperatura ambiente y 3 días en el horno de secado a 60<sup>a</sup> C con fines constructivos.

#### 4.6 CARACTERÍSTICAS MARSHALL DE UNA MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN VS. CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA EN FRÍO RECICLADA CON ESPUMA EXPANSIVA

Con la finalidad de hacer un análisis comparativo entre las propiedades de ambas mezclas, a continuación se desglosa cada una en orden secuencial:

- **Densidad real.**

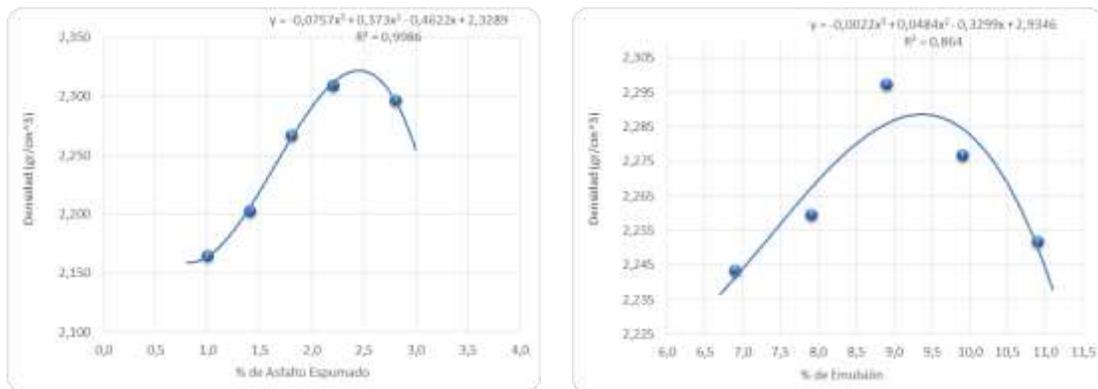
#### Comparación de densidad real

Tabla 4.25

MEZCLA ESPUMA EXPANSIVA		MEZCLA CON EMULSION	
Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Real	Densidad Promedio
(kg/cm <sup>3</sup> )	(kg/cm <sup>3</sup> )	(kg/cm <sup>3</sup> )	(kg/cm <sup>3</sup> )
2,245	2,243	2,159	2,165
2,247		2,166	
2,239		2,169	
2,256	2,260	2,199	2,203
2,265		2,200	
2,258		2,209	
2,301	2,297	2,261	2,267
2,297		2,261	
2,294		2,279	
2,273	2,277	2,314	2,309
2,283		2,313	
2,275		2,301	
2,247	2,252	2,308	2,297
2,254		2,278	
2,255		2,305	

## Comparativa de Densidad Real

Figura 4.16



**Observaciones.-** Si se compara el promedio de densidades reales de cada método, se puede apreciar una variación entre la mezcla reciclada con asfalto espumado, de la elaborada con una mezcla con emulsión, sin embargo en 2 de 5 puntos, la densidad de las muestras elaboradas con asfalto espumado son mayores, esto es considerado un aporte del agua que no se evapora del todo, debido al curado en el horno.

Para la gráfica de esta propiedad se hizo necesaria la depuración de datos que no eran representativos, considerando que la tendencia de esta es alcanzar un máximo a medida que el contenido de asfalto aumenta, y después bajar. Similar al ensayo de contenido de humedad óptimo para un suelo cualquiera.

De la ecuación resultante de las líneas de tendencia, se obtiene por tanteos, el contenido óptimo de asfalto que cumpla de mejor manera con todas las especificaciones.

- **Densidad Máxima Teórica.**

**Observaciones.-** La densidad máxima teórica es una característica que está en función del peso específico del asfalto y del peso específico total de la mezcla de agregados, que a su vez es función de los porcentajes de la dosificación.

Esta propiedad, representa, la densidad máxima que debería alcanzar la mezcla bajo condiciones ideales.

Considerando que las variables de los pesos específicos no son las mismas para ambos métodos.

- **Porcentaje de Vacíos de la Mezcla Total.**

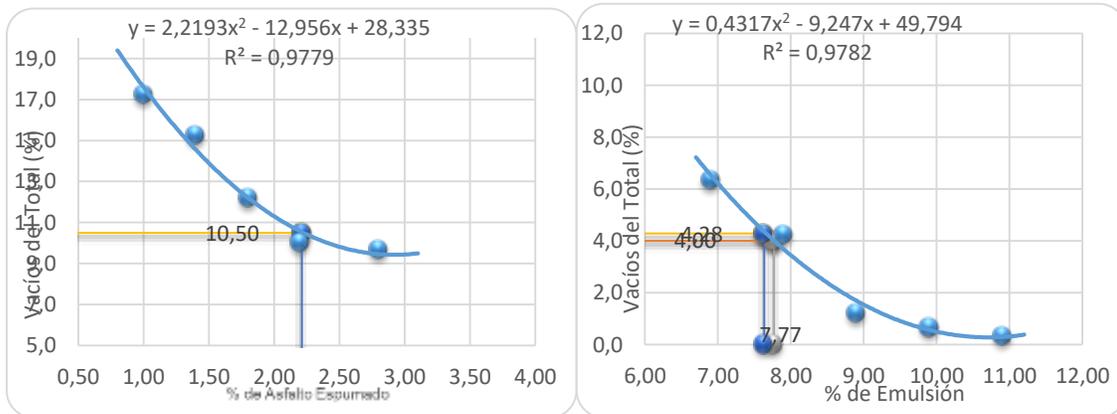
**Comparativa de porcentaje de vacíos de la mezcla total**

Tabla 4.26

MEZCLA ESPUMA EXPANSIVA	MEZCLA CON EMULSION
% de Vacíos Mezcla Total	% de Vacíos Mezcla Total
%	%
17,236	6,346
15,246	4,249
12,208	1,207
10,027	0,653
9,666	0,334

**Comparativa de Porcentaje de vacíos de la mezcla total**

Figura 3.21



**Observaciones.-** Si se presta atención detallada a los valores de vacíos del agregado RAP, presentes en la mezcla con asfalto espumado, se observa un porcentaje mucho mayor con respecto a la mezcla con emulsión, esto, es atribuible a la humedad contenida en el interior de las partículas del agregado, consecuencia del proceso de curado, en el que el agregado pierde humedad gradualmente, liberando los espacios del agregado. Los vacíos de la mezcla total, es la representación relativa de la diferencia entre la densidad máxima teórica y la densidad real de la mezcla, esta condición hace que los vacíos sea una representación directa de lo que ocurre con la densidad de la mezcla, También se puede observar las características parabólicas de la línea de tendencia de la mezcla con emulsión, esta característica se repetirse más claramente en la gráfica de la mezcla con asfalto espumado. Aclarar sin embargo que ambas ecuaciones pertenecen al mismo tipo de parábola. Este una deshidratación total del agregado en la mezcla tradicional.

También se puede observar en la mezcla con emulsión que el porcentaje de vacíos es muy pequeño, a medida que se incrementa el contenido de emulsión.

A mayor contenido de asfalto espumado disminución del porcentaje de vacíos a la mezcla.

- **Estabilidad Marshall**

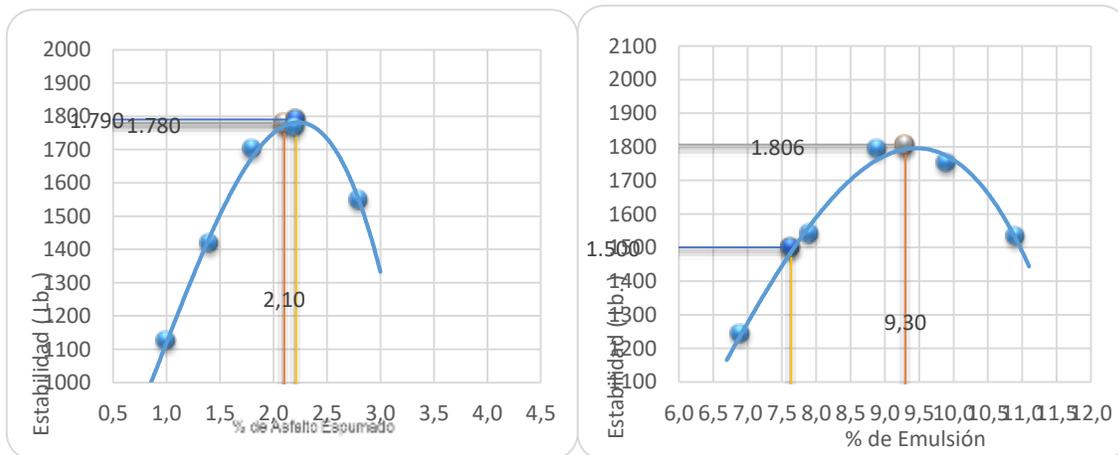
### Comparativa de estabilidad Marshall

Tabla 4.27

MEZCLA ESPUMA EXPANSIVA	MEZCLA CON EMULSION
estabilidad corregida	estabilidad corregida
libras	libras
1125,086	1245,072
1417,021	1541,573
1702,000	1794,875
1767,186	1751,394
1548,820	1534,206

### Comparativa de estabilidad Marshall

Figura 4,17



**Observaciones.-** La estabilidad de una mezcla asfáltica es la medida de su resistencia a sufrir una deformación, una elevada estabilidad no es un sinónimo de calidad y durabilidad de la mezcla. Analizando los resultados obtenidos, se puede verificar que la mezcla asfáltica con emulsión alcanzo valores más elevados para 3 de 5 puntos en la curva de estabilidad Marshall, reflejando una mayor estabilidad en algunos puntos que la mezcla asfáltica con asfalto espumado. Sin embargo, estos resultados son muy similares siendo diferentes los la emulsión con el asfalto espumado utilizados es importante mencionar, que los no todos valores de este tipo de mezcla no están dentro de las especificaciones sugeridas por el Instituto de Asfalto para una mezcla en frío de pavimentación para vías con trafico liviano (1500 lb). Característica que momentáneamente, hace aplicable el método.

Cabe resaltar que influye mucho en la estabilidad los tipos de materiales a utilizar ya que para las mezclas con asfalto espumado el material es envejecido y reutilizado y cuenta con mayores contenido de vacíos.

- **Fluencia Marshall**

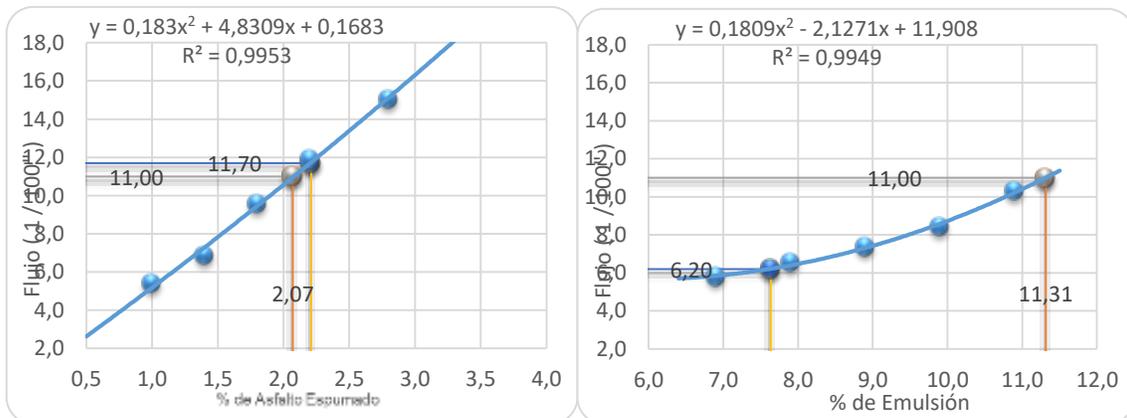
### Comparativa de fluencia Marshall

Tabla 4.28

MEZCLA ESPUMA EXPANSIVA		MEZCLA CON EMULSION	
fluencia	fluencia promedio	Densidad Real	Densidad Promedio
1/100"	1/100"	1/100"	1/100"
5,1	5,381	5,9	5,774
5,9		5,5	
5,1		5,9	
7,3	6,864	6,8	6,522
6,8		6,1	
6,5		6,7	
10,0	9,580	7,5	7,349
9,3		6,9	
9,4		7,7	
11,8	11,877	8,5	8,399
11,6		8,7	
12,2		8,1	
15,2	15,039	10,2	10,302
14,6		10,8	
15,4		9,8	

### Comparativa de fluencia Marshall

Figura 4.18



**Observaciones.-** La fluencia de una mezcla es la medida de la deformación, hasta el punto de ruptura o falla. Detallando las características observadas en ambas mezclas, es llamativo que ambas alcanzan una fluencia permitida por las especificaciones.

Es evidente también, que la tendencia de esta característica es a aumentar en proporción al incremento en el contenido de asfalto espumado o emulsión de la mezcla. Siendo el límite superior de las especificaciones 14 plg/100 y el inferior 8 plg/100, se confirma que ambas mezclas con los porcentajes máximos de asfalto aún permanecen dentro de estos límites.

Es apreciable también, que los valores de flujo más elevados corresponden a la mezcla con asfalto espumado, es razonable pensar, que esta condición está presente por el mismo motivo que se estuvo señalando a lo largo del análisis de resultados, cual es la presencia de agua en la mezcla, que puede actuar como un agente lubricante, permitiendo el desplazamiento entre las partículas de agregado con mayor facilidad que con una mezcla con emulsión.

- **Contenido óptimo de asfalto espumado y emulsión**

Como se puede observar en los gráficos de las características analizadas, todas las líneas de tendencia tienen una ecuación que define la trayectoria de los puntos correspondientes a la característica “y”, para un rango “x” de alternativas. Habiendo definido las ecuaciones, y siendo conscientes de las especificaciones para la mezcla en diseño, se juega con el porcentaje de asfalto hasta encontrar un valor que satisfaga todos los parámetros de diseño.

El contenido óptimo de asfalto será el que satisfaga los parámetros principales del menor contenido de vacíos posible, y la menor relación Betunen Vacíos posible en un rango establecido por las especificaciones propias para la mezcla en diseño, lógicamente, cuidando que los demás parámetros se encuentren dentro del rango admisible.

De preferencia se ajustará el contenido óptimo de asfalto espumado al menor valor que cumpla con todas las especificaciones, por fines económicos.

## Comparativa de contenido óptimo de asfalto

Tabla 4.29

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL			
CARACTERISTICAS	VALOR ES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DENSIDAD	2,312	-----	-----
% VACIOS	10,50	<b>3</b>	<b>5</b>
V.A.M.	14,90	<b>15</b>	
R.B.V.	32,00		
ESTABILIDAD (Lb)	1790,0	> 1500 Lb. (50 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	11,70	<b>8</b>	<b>16</b>
<b>% OPT. DE ASFALTO ESPUMADO PROPUESTO</b>		<b>2,21</b>	

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL			
CARACTERISTICAS	VALOR ES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DENSIDAD	2,262	-----	-----
% VACIOS	4,28	<b>3</b>	<b>5</b>
V.A.M.	21,8	<b>15</b>	
R.B.V.	80,50		
ESTABILIDAD (Lb)	1500,0	> 1500 Lb. (50 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	6,20	<b>8</b>	<b>16</b>
<b>% OPT. DE EMULSIÓN PROPUESTO</b>		<b>7,64</b>	

Es apreciable en el cuadro resumen, que para la mezcla asfáltica con asfalto espumado, con un contenido óptimo de asfalto, menor al de la mezcla con emulsión, se cumple con todas las especificaciones, sin embargo el valor de estabilidad es más bajo para la mezcla con emulsión.

Las diferencias en las otras características, son mínimas y dentro de los parámetros exigidos por las normas se cumple satisfactoriamente.

Es de hacer notar, que el asfalto espumado, además de cumplir con las especificaciones, tiene un porcentaje de mejoría sobre la mezcla con emulsión en un 19,34%, número que aparentemente puede parecer insignificante, pero que traducido en volúmenes de mezcla total puede ser equivalente a una gran suma de dinero.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Se demostró con el desarrollo del trabajo de investigación, la hipótesis formulada del análisis de la técnica de la espuma expansiva, se logró alterar temporalmente la estructura del asfalto reduciendo su viscosidad, se pudo mezclar el material a re utilizar de carpeta asfáltica con espuma expansiva produciendo mezclas asfálticas en frío mejorando sus propiedades mecánicas se obtuvo mejoras en su resistencia.
- Se demostró con la ejecución del presente proyecto de investigación, la reproductibilidad del método de la espuma expansiva, verificando la mejora en el comportamiento de la resistencia del pavimento re utilizado para así poder aplicar este método en el diseño de pavimento flexible obteniendo mejores resultados que una mezcla en frío con emulsión.
- Se verifico con este estudio que este meto es aplicable para todos los cementos asfálticos producidos considerando las variaciones de sus características tanto del cemento asfáltico como en los agregados a utilizar o el pavimento reciclado, con este método se procederá a alterar la estructura del cemento asfáltico pero los resultados dependerán del tipo de cemento asfáltico y sus características, así poder producir mezclas asfálticas convencionales modificadas, los valores de la resistencia no tendrán la misma resistencia pero el meto es aplicable.
- Como consecuencia de una correcta elección de la emulsión Betumix CRS-2H, y gracias a una recopilación de amplia información sobre las características necesarias para la elaboración de una mezcla asfáltica en frío como para una con asfalto espumado, se consiguió caracterizar el asfalto y la emulsión como útil para el desarrollo de la investigación y dentro de las especificaciones provistas por el fabricante.
- Se comprobó que los agregados empleados en la elaboración de mezcla asfáltica por el Municipio de la Provincia Cercado, cumplen con las características necesarias para este fin, por consecuencia de esto, se llevó adelante la investigación, sin complicaciones por deficiencias en el agregado.

- Se reutilizó la carpeta asfáltica que no cumplía con el aporte estructural necesario obteniendo la caracterización del materia frezado y a través del ensayo de proctor modificado T-180 un dato importante para la fabricación de las briquetas como ser el contenido óptimo de humedad de la mezcla.
- Se pudo medir la temperatura del asfalto, poder inyectar agua con precisión en el núcleo del asfalto caliente, y a través de un dosificador nos permitimos cortar el flujo del asfalto espumado cuando se haya vertido la cantidad suficiente de asfalto.
- Los criterios empleados actualmente para la caracterización del asfalto espumado, corresponden al volumen que puede alcanzar la espuma (Razón de Expansión) y al tiempo disponible para el mezclado antes del colapso de la espuma (Vida Media). Ambos criterios son ampliamente reconocidos como los más importantes en el proceso de producción de la espuma, sin embargo la forma en que son medidos y analizados no permite la obtención de valores precisos, sino más bien órdenes de magnitud. Por esta razón se propone investigar nuevas formas para medir estas propiedades y de este modo obtener una caracterización más precisa de la espuma y su habilidad para mezclarse con los agregados.
- Se elaboraron briquetas de mezcla en frío con emulsión, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, y se realizó el mismo procedimiento con briquetas de material reciclado con asfalto espumado, para poder comparar detalladamente cada una de sus características.

Las conclusiones que se destacan de este análisis son:

- El agua adicionada al agregado para alcanzar el “Contenido Óptimo de Humedad de Compactación” tiene que ser descontado del peso del agregado, restado a los 1200 gr de la mezcla final, puesto que el agua de compactación es adicionada a la mezcla con fines puramente constructivos, no siendo parte permanente del sistema “Agregado – Cemento asfáltico” y desapareciendo por evaporación en el proceso de curado de la mezcla.
- Las propiedades de las mezclas en frío, siguen las tendencias establecidas en la bibliografía, obedeciendo a un comportamiento en función únicamente del contenido de emulsión y asfalto espumado adicionado a la mezcla.

- La mezclas reciclada con asfalto espumado, por su condición de mezclas en frío y húmedo, contienen una cierta cantidad de agua, ya sea proveniente de su estado natural, o remanente del agua de mezclado adicionada, que desaparece gradualmente, fortaleciendo la unión entre partículas de agregado. Se puede plantear una nueva hipótesis a raíz de los resultados encontrados, donde pueda verificarse que la tendencia de las características mecánicas de la mezcla son: “aumenta la estabilidad y se reduce la fluencia, con la evaporación del agregado”.
- El asfalto espumado es una tecnología en proceso de investigación, sin embargo, se han efectuado estudios alrededor del mundo en los que se ha demostrado su aplicabilidad como alternativa para mejorar la capacidad estructural. Con la realización del presente proyecto de investigación, se consiguió demostrar la validar de la tecnología técnicamente que un reciclado con asfalto espumado reúne las características físicas y mecánicas requeridas por las entidades encargadas de la construcción de vías a nivel nacional e internacional.
- Se pudo evidenciar que el método de reciclado reduce le impacto ambiental, al aprovechar material in situ reduciendo la explotación de los bancos de materiales, reducir las emisiones volátiles a la atmósfera y una disminución significativa de los olores que producen las mezclas en caliente.
- Finalmente se ha demostrado que es posible investigar sobre tecnologías nuevas utilizando el ingenio, para transformar problemas complicados en soluciones simples, ecológicas y eficientes.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- La determinación de una temperatura y cantidad de agua de inyección, no definen exactamente las características que tendrá el asfalto espumado, siendo necesario, el uso del criterio a momento de producir las mezclas para incrementar el porcentaje de agua o la temperatura del asfalto para obtener los mejores resultados.
- Para realizar los ensayos de Relación de Expansión y Vida media, es necesario añadir directamente al asfalto caliente cantidades medidas de agua, que al entrar en contacto, generan una reacción explosiva, lastimosamente para definir estas características se tiene que poder observar el volumen final que alcanza el asfalto y el tiempo que dura

la espuma, lo que expone al observador a posibles quemaduras haciendo indispensable un equipo mínimo de seguridad como:

- Guantes para manipular cosas calientes, o guantes de cuero.
- Gafas de seguridad.
- De preferencia ropa vieja, o si es posible un overol que cubra los brazos.
- Para las muestras listas para compactar en laboratorio, no se debe permitir que se reduzca el contenido de humedad ya que es un factor importante constructivamente.
- El tiempo de curado de las briquetas debe ser 24 horas a temperatura ambiente y extender de 48 horas a 72 dentro del horno a 60°C, con la finalidad de eliminar toda el agua adicional en la mezcla, que pueda distorsionar los valores de las características Marshall.
- Darle continuidad a esta investigación a través de la realización de tramos de prueba, que permitan medir el desempeño de las mezclas en frío con el método de la espuma expansiva.
- Realizar diseños de mezclas asfálticas con asfalto espumado, considerando diferentes agregados y distintos cementos asfálticos para espumar y evaluar su comportamiento.
- En caso de una quemadura con asfalto, aplicar agua o hielo inmediatamente, no remover el asfalto de la piel y tampoco cubrir con una venda, recurrir inmediatamente a un médico.
- El sulfuro de hidrógeno es un producto de la reacción entre el hidrógeno y el azufre presentes naturalmente en el asfalto. Con concentraciones bajas no es peligroso, sin embargo en concentraciones altas, o en tiempos de exposición prolongados y en ambientes cerrados como los que se pueden presentar en laboratorios, o tanques de almacenamiento puede llegar a ser letal. Por esta razón es recomendable mantener la cara lo más alejada posible de calderos de asfalto, o escotillas de depósitos de almacenamiento, mantener los ambientes de trabajo lo más ventilados posible, o trabajar con la cara en dirección del viento.