

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN

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

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

El tema de mezclas asfálticas con emulsiones en frío, ha cobrado mucho interés en las instituciones de investigación tales como el Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) y la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (Nacional Asphalt Pavement Asociación, NAPA), en las últimas décadas. Debido a las ventajas que presentan para resolver algunos problemas, una línea importante de investigación en materiales

asfálticos consistiría en diseñar un sistema de fácil aplicación de las emulsiones asfálticas.

En esta última década es cuando Bolivia utiliza las dos técnicas en frío y en caliente para conformar los concretos asfálticos, con mayores ventajas unos sobre otros, en especial al utilizar emulsificantes, que puede ser empleado en mezclas en planta como in situ. En algunas carreteras de Tarija se aplicó mezclas asfálticas en frío con emulsiones asfálticas, lo cual permite conocer más a fondo las ventajas y desventajas que acoge esta técnica en nuestro medio, comparado con las mezclas convencionales en caliente que datan de mayor experiencia hace varias décadas atrás.

El autor de este trabajo pretende realizar una comparación técnica de las propiedades del Método Marshall, de las mezclas asfálticas analizadas en caliente y en frío, con cemento asfáltico convencional y emulsiones asfálticas, respectivamente.

Las propiedades del Método Marshall, permiten obtener valores de Estabilidad, Fluencia, Densidad, Porcentaje de Vacíos de la mezcla y del agregado, además de una relación de Emulsión Asfáltica vs. Porcentaje de Vacíos, de tal manera se pueda tener un conjunto de especificaciones que permitan diferenciar claramente la mejor opción con los mejores resultados, y con ello se pueda aplicar a un diseño de carpeta asfáltica para la construcción de carreteras que permitan tener obras con mayor calidad y durabilidad, con beneficios, tanto en lo económicos como sociales.

## **1.2. ANTECEDENTES**

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

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

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

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

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Existen técnicas para realizar las mezclas asfálticas, ya sea en frío o en caliente, utilizando cementos asfálticos, emulsiones asfálticas o rebajados asfálticos, dando lugar a una variedad de resultados, unos con mayor ventaja que otros; es por eso que en este estudio, se hace una investigación dirigida a la resistencia técnica que puedan tener cada una de las mezclas analizadas y para ello se hará uso de las emulsiones asfálticas para mezclas en frío y cemento asfáltico convencional para mezclas en caliente.

Las emulsiones asfálticas no requieren la incorporación de un solvente de petróleo para ser líquidas. Incluso las emulsiones asfálticas pueden utilizarse en la mayoría de los

casos sin necesidad de calentamiento. Ambos factores contribuyen al ahorro de energía y otros factores como son:

- La preocupación por reducir la contaminación atmosférica. Las emulsiones asfálticas eliminan hacia la atmósfera poco o nada de sustancias hidrocarbonadas.
- La capacidad de ciertos tipos de emulsiones de recubrir la superficie de agregados húmedos. Esto reduce las necesidades de combustible para calentar y secar los agregados.
- La disponibilidad de una variedad de tipos de emulsión. Se han desarrollado nuevas formulaciones y técnicas de laboratorio mejoradas con el fin de satisfacer los requerimientos de diseño construcción.
- La posibilidad de utilizar materiales en frío en lugares remotos en condiciones ambientales diversas no inferiores a los 20°C ni superiores a los 40°C.
- La aplicabilidad de emulsiones en mantenimiento preventivo de pavimentos, incrementando la vida útil de pavimentos existentes ligeramente deteriorados.

## **1.4. DISEÑO TEÓRICO**

### **1.4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.4.1.1. Situación Problemática**

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología, por ello surgen nuevas técnicas para crear mezclas asfálticas más resistentes, de elaboración en menor tiempo y con mejores resultados de puesta en obra y su debida compactación.

Una de las líneas importantes de investigación en materiales asfálticos consiste en diseñar un sistema que permita una fácil aplicación del asfalto, además de lograr una

mejor adhesión entre el asfalto (convencional, modificado o emulsión) y el material pétreo que sirve de base para el asfalto.

Una forma de atacar este problema es mediante el uso de las llamadas emulsiones asfálticas. Este tema de las emulsiones asfálticas ha cobrado mucho interés en los últimos años debido a las ventajas que tiene este tipo de emulsiones para resolver los problemas anteriormente planteados, ya que permite su aplicación sobre el agregado pétreo a bajas temperaturas (mezclas en frío), con un control amplio en el tiempo de rompimiento de la emulsión.

Es así que surge el propósito de conocer la forma más conveniente o ideal para realizar una mezcla según su propósito o finalidad, ya sea con cemento convencional o con emulsión asfáltica, haciendo un estudio desde dos puntos de vista, en frío y en caliente, para poder definir cuál de los dos proporciona mayores condiciones de resistencia o mejores propiedades técnicas.

#### **1.4.1.2. Problema**

¿Cuál es la diferencia técnica de las propiedades Marshall, cuando se realiza una comparación técnica entre las mezclas asfálticas en frío y caliente?

#### **1.4.2. HIPÓTESIS**

Si se elaboran especímenes con dos tipos de mezclas asfálticas, en frío y en caliente, entonces se podrá apreciar una diferencia entre sus resistencias técnicas, con la finalidad de obtener resultados que cumplan las especificaciones y permitan ser comparados y analizados, de tal manera que se pueda determinar el tipo de mezcla asfáltica más óptima para su aplicación en carreteras de nuestro entorno.

### **1.4.3. OBJETIVOS**

#### **1.4.3.1. Objetivo General**

Comparar técnicamente las propiedades de las mezclas asfálticas en frío y caliente, según el Método Marshall, con la finalidad de comparar y analizar las mezclas planteadas, y buscar la aplicabilidad más óptima para pavimentos flexibles.

#### **1.4.3.2. Objetivos Específicos**

- Realizar los ensayos de caracterización en laboratorio para determinar las propiedades físicas de los agregados pétreos, del cemento asfáltico y de las emulsiones asfálticas.
- Diseñar mezclas de prueba y determinar la dosificación óptima a través de ensayos de laboratorio según el Método Marshall, aplicando cemento asfáltico para mezclas en caliente y emulsiones asfálticas para mezclas en frío.
- Analizar y comparar los resultados de las propiedades técnicas del Método Marshall, obtenidas de las mezclas asfálticas en estudio.
- Proponer usos y aplicaciones recomendables para cada tipo de mezcla planteado en este estudio, según sus características.

## 1.4.4. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

### 1.4.4.1. Variable Independiente

$X_1$  = Mezclas Asfálticas en Frío

$X_2$  = Mezclas Asfálticas en Caliente

### 1.4.4.2. Variable Dependiente

$Y_1$  = Estabilidad

$Y_2$  = Fluencia

$Y_3$  = Densidad

$Y_4$  = Vacíos de la Mezcla

$Y_5$  = Vacíos de los Agregados

$Y_6$  = Relación Betún - Vacíos

### 1.4.4.3. Conceptualización y Operacionalización de Variables

*Tabla 1.1. Conceptualización y Operacionalización de Variables*

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b> $X_1$ Mezclas Asfálticas en Frío	Se refiere a las mezclas que se elaboran a bajas temperaturas	Contenido de Emulsión Asfáltica	Baja Temperatura ( $T^\circ < 100^\circ\text{C}$ )	Diseño de mezclas asfálticas a $T^\circ < 100^\circ\text{C}$

<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b> <b>X<sub>2</sub></b> Mezclas Asfálticas en Caliente	Se refiere a las mezclas que se elaboran a altas temperaturas	Contenido de Cemento Asfáltico	Alta Temperatura (T° > 100°C)	Diseño de mezclas asfálticas a T° > 100 °C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>1</sub></b> Estabilidad	Se refiere a la resistencia del espécimen de mezcla asfáltica	Método Marshall	Estabilidad	Briquetas con T° < a100°C
				Briquetas con T° > a100°C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>2</sub></b> Fluencia	Se refiere a la deformación del espécimen de mezcla asfáltica	Método Marshall	Fluidez	Briquetas con T° < a100°C
				Briquetas con T° > a100°C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>3</sub></b> Densidad	Se refiere a la solidez del espécimen de mezcla asfáltica	Método Marshall	Densidad	Briquetas con T° < a100°C
				Briquetas con T° > a100°C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>4</sub></b> Vacíos de la Mezcla	Se refiere a la porosidad del espécimen de mezcla asfáltica	Método Marshall	Porcentaje de Vacíos	Briquetas con T° < a100°C
				Briquetas con T° > a100°C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>5</sub></b> Vacíos de los Agregados	Se refiere a los vacíos que tiene el agregado dentro del espécimen de la mezcla asfáltica	Método Marshall	Porcentaje de Vacíos	Briquetas con T° < a100°C
				Briquetas con T° > a100°C
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> <b>Y<sub>6</sub></b>	Se refiere a la cantidad de ligante	Método Marshall	Relación de Porcentajes	Briquetas con T° < a100°C

Relación Betún - Vacíos	necesaria para cubrir los vacíos del agregado dentro del especímen de la mezcla asfáltica			Briquetas con $T^{\circ} > a100^{\circ}C$
----------------------------	---	--	--	--

*Fuente: Elaboración Propia*

## 1.5. DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.5.1. COMPONENTES

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

##### 1.5.1.1.1. Unidad de Estudio

- Mezcla Asfáltica

##### 1.5.1.1.2. Población

- Tipos de Mezclas Asfálticas.



### 1.5.1.1.3. Muestra

- Mezclas Asfálticas en Frío y Caliente.

### 1.5.1.1.4. MUESTREO

#### 1.5.1.1.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

##### ~ Selección de las Técnicas de muestreo

Técnica de muestreo estratificada.

##### ~ Nivel de confianza

Nivel de Confianza (%)	Valor del Nivel de Confianza “Z” (adimensional)
50	0.574
80	1.280
85	1.444
90	1.640
95	1.960
99	2.680

##### ~ Tamaño de la muestra

Primera Población:

$$z = 2.12$$

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

$$e = 0.04$$

Nivel de Confianza = 96%

**Tabla 1.2. Tabla para el cálculo de la muestra**

ENSAYOS	CANTIDAD	pi	qi	pi*qi	Ni*pi*qi	wi	ni
<b>CARACTERIZACION DE LOS AGREGADO</b>							
Desgaste de los Angeles	12	0,5	0,5	0,25	3	0,0147	6
Equivalente de arena	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Granulometria	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Peso Especifico	18	0,5	0,5	0,25	4,5	0,0220	8
<b>CEMENTO ASFALTICO</b>							
Peso Especifico	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Punto Ablandamiento	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Penetracion	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Viscosidad	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Punto de Inflamacion	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Destilacion	4	0,5	0,5	0,25	1	0,0049	2
Ductilidad	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
<b>PROPIEDADES MECANICO RESISTENTES</b>							
Estabilidad	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Fluencia	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
% de Vacios de Aire	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
% de Vacios de Agregado mineral	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Peso Unitario	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Sumatoria =	818				204,5	1	378

Fuente: Elaboración Propia

## POBLACIÓN

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

$$N = \frac{2.12^2 * 0.5 * 0.5}{0.04^2}$$

$$N = 818 \text{ ensayos}$$

**MUESTRA**

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}{N * \frac{e^2}{z^2} + \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}$$

$$n = \frac{204.5}{818 * \frac{0.04^2}{2.12^2} + \frac{1}{818} * 204.5}$$

**n = 378 ensayos**

**Tabla 1.3. Tabla de ensayos realizados con mezclas asfálticas**

<b>ENSAYOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>
MARSHALL CEMENTO ASFÁLTICO 85/100 A 140°C	ESTABILIDAD	3
	FLUENCIA	3
	DENSIDAD	3
	VACIOS DE LA MEZCLA	3
	RELACIÓN BETÚN VACIOS	3
	VACIOS DEL AGREGADO MINERAL	3
SUB TOTAL		18
MARSHALL CEMENTO ASFÁLTICO 85/100 A 160°C	ESTABILIDAD	3
	FLUENCIA	3
	DENSIDAD	3
	VACIOS DE LA MEZCLA	3
	RELACIÓN BETÚN VACIOS	3
	VACIOS DEL AGREGADO MINERAL	3
SUB TOTAL		18
MARSHALL EMULSIÓN ASFÁLTICA CRS-2H	ESTABILIDAD	3
	FLUENCIA	3
	DENSIDAD	3
	VACIOS DE LA MEZCLA	3
	RELACIÓN BETÚN VACIOS	3
	VACIOS DEL AGREGADO MINERAL	3
SUB TOTAL		18
MARSHALL EMULSIÓN	ESTABILIDAD	3
	FLUENCIA	3
	DENSIDAD	3

ASFÁLTICA RR- 2C	VACIOS DE LA MEZCLA	3
	RELACIÓN BETÚN VACIOS	3
	VACIOS DEL AGREGADO MINERAL	3
SUB TOTAL		18
<b>TOTAL</b>		<b>72</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

## **1.5.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **1.5.2.1. Selección de Métodos y Técnicas**

#### **MÉTODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

Este método de diseño está basado en la investigación desarrollada en la universidad de Illinois usando un Método Marshall modificado de diseño de mezcla y un ensayo de durabilidad húmeda.

El método y los criterios de ensayos recomendados, son aplicables para mezclas de agregados para base granular de bajos volúmenes de tráfico, conteniendo cemento asfáltico o emulsión asfáltica y agregados minerales de gradación densa con tamaño máximo de 1" (25 mm) o menos. Este método de diseño es recomendado para mezclas en camino o elaboradas en planta, preparadas a temperatura ambiente.

El método se describe con el siguiente procedimiento de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

- Ensayos de calidad en agregados.
- Ensayos de calidad en cementos asfálticos.
- Ensayos de calidad en emulsiones asfálticas.

- Tipo y cantidad aproximada del material bituminoso.
- Variación del contenido de ligante bituminoso.
- Contenido de agua para la mezcla y compactación para emulsiones asfálticas.
- Selección del contenido óptimo del ligante bituminoso.

### **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**

Estas mezclas constituyen el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante bituminoso como ser el cemento asfáltico, de agregados pétreos e incluyendo el polvo mineral, y según el caso algún aditivo, 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 a una misma temperatura, por lo general mayor a 140°C y menor a 160°C, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

### **MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO**

Las mezclas en frío son mezclas de agregados pétreos no calentados o poco calentados, emulsión asfáltica y agua para mezclado. Por lo general se trabaja a temperatura ambiente estándar igual a 22.5 °C.

La variedad de tipos y grados de emulsión disponibles, es una clara ventaja cuando se usan agregados de canteras o agregados de calidad marginal, o de río.

#### **1.5.2.2. Técnicas de Muestreo**

##### **1.5.2.2.1. Técnica de muestreo No Probabilística**

El muestreo no probabilístico se aplica para la obtención de los materiales pétreos, el cemento asfáltico y la emulsión asfáltica, ya que estos materiales son seleccionados

intencionalmente. Los agregados se obtendrán de la Comunidad de La Pintada a cargo de La Alcaldía Municipal.

El cemento asfáltico tiene procedencia del país de Brasil y será proporcionado también por la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija. Así como las dos Emulsiones Asfálticas también de procedencia del país de Brasil, proporcionado por el Servicio Departamental de Caminos.

### **1.5.2.3. Descripción de Equipos e Instrumentos**

#### **A. Para la caracterización de los agregados**

a. Horno Eléctrico. - El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.

b. Balanza. - La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.

c. Juego de Tamices. - El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40, No. 200, tapa y fondo.

#### **B. Para la caracterización del ligante asfáltico**

a. Penetrómetro de Asfalto. - Que sirve para determinar la penetración del betún en estudio.

b. Viscosímetro del Asphalt Institute y el baño de viscosímetro Saybolt. - Con los cuales se determina la viscosidad del betún en estudio.

c. Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.-

Con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del betún en estudio.

d. Aparato para determinar el Punto de Ablandamiento.- Con este equipo se determina

el punto en que se reblandece el asfalto a temperaturas reales de la puesta en obra.

e. Ductilímetro.- Aparato que permite determinar la ductilidad o estado de alargamiento de los cementos asfálticos.

f. Destilómetro.- Con este equipo se determina el porcentaje de agua que contiene la emulsión asfáltica.

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

a. Moldes Marshall.- En estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa ya sea en frío o en caliente, creando briquetas con distintos porcentajes de emulsión asfáltica.

b. Martillo Marshall.- Este martillo sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

### **D. Para los ensayos de resistencia técnica**

a. Marco de carga multiplex Marshall.- Este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.

b. Cabezal de Rotura Marshall.- Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizar lecturas de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

#### **1.5.2.4. Procedimiento de Aplicación**

##### **a. Caracterización de los agregados**

Para caracterizar los agregados pétreos, se debe realizar el respectivo secado en el horno y luego someterlo a la serie de tamices, con trillado constante en el RopTap por unos quince minutos aproximadamente, luego de este tiempo proceder al pesaje del material que contiene cada tamiz. Con estos valores obtener la curva granulométrica, según especificaciones del Método Marshall.

También se deben realizar los ensayos de Peso Específico, Equivalente de Arena y el Desgaste de los Ángeles, debiendo cumplir las especificaciones para mezclas asfálticas.

#### **b. Caracterización del ligante asfáltico**

En este proyecto la caracterización del cemento asfáltico, se basa en la determinación de la Viscosidad, Penetración, Ductilidad, Densidad, Punto de Ablandamiento, Punto de Inflamación y Peso Específico; la caracterización de la emulsión asfáltica se basa en determinar el porcentaje residual de ligante a través del ensayo de Destilación y con este residuo se procede a realizar los ensayos de Penetración, Ductilidad, Viscosidad y Peso Específico ya que se considera que son los parámetros más importantes para el presente estudio. Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del ligante asfáltico.

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

El diseño de las briquetas se seguirá el Método Marshall.

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le incluirá el ligante asfáltico analizando seis porcentajes (4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%), tanto para el cemento asfáltico para mezclas en caliente como para la emulsión

asfáltica en mezclas en frío; cabe resaltar que para las mezclas con emulsión asfáltica, los porcentajes de uso son diferentes a los porcentajes residuales que quedan en la mezcla después de la evaporación del agua durante el curado, es decir que los porcentajes para realizar las mezclas en frío son mayores y varían de acuerdo al tipo de emulsión.

Por lo tanto se analizarán seis porcentajes de ligante asfáltico, cada porcentaje con tres briquetas analizadas, haciendo un total de 18 briquetas en estudio según especificaciones Marshall.

Para las mezclas en calientes se analizarán desde dos puntos de vista, el primero dosificado a 140°C y el segundo a 160°C, haciendo un total de 32 briquetas estudiadas en caliente.

Para las mezclas en frío, también se analizarán dos tipos de mezclas la primera con la emulsión BETUMIX CRS-2H y la segunda EMULEX RR-2C, haciendo un total de 32 briquetas estudiadas en frío.

#### **d. Ensayos de resistencia técnica**

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas que determinen la Densidad, Vacíos de la mezcla, Vacíos del agregado mineral, Relación Ligante Bituminoso-Vacío, Estabilidad y Fluencia según el Método Marshall.

#### **1.5.2.5. Preparación Previa**

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

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

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

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

Con los ensayos de caracterización determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto del ligante y de los agregados.

Con los ensayos de pruebas de propiedades técnicas determinamos las siguientes curvas tanto para las mezclas en frío como para las mezclas en caliente:

- a.1. % de Cemento Asfáltico vs. Estabilidad
- a.2. % de Cemento Asfáltico vs. Fluencia
- a.3. % de Cemento Asfáltico vs. Densidad
- a.4. % de Cemento Asfáltico vs. % de Vacíos de la Mezcla
- a.5. % de Cemento Asfáltico vs. % de Vacíos del Agregado
- a.6. % de Cemento Asfáltico vs. Relación Betún–Vacíos
  
- b.1. % de Emulsión Asfáltica vs. Estabilidad
- b.2. % de Emulsión Asfáltica vs. Fluencia
- b.3. % de Emulsión Asfáltica vs. Densidad
- b.4. % de Emulsión Asfáltica vs. % de Vacíos de la Mezcla
- b.5. % de Emulsión Asfáltica vs. % de Vacíos del Agregado
- b.6. % de Emulsión Asfáltica vs. Relación Emulsión–Vacíos

De cada curva (1, 2, 3, 4, 5 y 6), se selecciona el valor del porcentaje de emulsión asfáltica más adecuado con previo análisis. El valor del porcentaje óptimo de betún adicional para la mezcla, es el promedio de la mayor Estabilidad, de la mayor Densidad y del porcentaje de ligante que sea igual al 4% de Vacíos de la Mezcla.

Tomando en cuenta que las propiedades técnicas mejoran cuando hay un mayor porcentaje de material bituminoso, pero cuando se exagera dicho porcentaje, también los valores decaen; sin embargo se eligen cuyos valores sean superiores a los mínimos según especificaciones técnicas del Método Marshall.

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

En síntesis el alcance que tendrá este trabajo es la Comparación Técnica de las Propiedades Marshall entre mezclas asfálticas en frío y caliente.

En el primer capítulo, se describe de manera general de que trata la investigación sobre la diferencia entre las mezclas asfálticas en frío y en caliente, donde se presenta un resumen teórico de lo que trata el proyecto, la situación problemática, los objetivos y el diseño metodológico a seguir.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es la ubicación, antecedentes, conceptos fundamentales, todo lo referente a los cementos asfálticos, las emulsiones asfálticas y los agregados a utilizar, diseño de mezclas por el método Marshall, dosificaciones, normas, etc.

El tercer capítulo, se describe los medios y criterios para obtener los datos de los materiales en estudio como son los agregados, el cemento asfáltico y la emulsión asfáltica, que luego son procesados y analizados según normas, para ser aplicados en mezclas en caliente y en frío respectivamente.

El cuarto capítulo, comprende todo el diseño de briquetas a partir de un análisis final de datos, también establece la forma de determinar el porcentaje más adecuado de emulsión, según curvas de correlación. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

En quinto capítulo, se verifica si se cumplió o no con los objetivos planteados en el presente perfil, y las recomendaciones para la correcta ejecución de este trabajo.

## **CAPÍTULO II**

### **MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO Y EN CALIENTE**

#### **2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

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

Por lo general el concreto asfáltico utilizado es el concreto hecho con mezclas asfálticas en caliente cuyos materiales constituyentes son agregados pétreos y cemento asfáltico, para poder realizar esta mezcla ambos materiales son calentados a una temperatura adecuada para mezclarse y posteriormente colocarse y compactarse. Con el pasar de los años apareció las mezclas en frío en donde el concreto asfáltico es obtenido utilizando emulsión asfáltica como ligante y los materiales pétreos al igual que la emulsión asfáltica no se han tenido que calentar a

temperaturas altas, trayendo consigo un ahorro económico significativo en comparación a las mezclas en caliente ya que con este concreto se necesita menor consumo de combustible y ahorro de energía para su elaboración.

## **2.2. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

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

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

### **2.2.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas por la Temperatura de puesta en obra**

- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

#### **2.2.1.1. Mezcla Asfáltica 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. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que

consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

Esta ventaja disminuye cuando se escogen mezclas de alta resistencia y alta calidad, donde los controles de calidad requeridos son similares a los de la mezclas de concreto asfáltico en caliente. Pero aún en estas situaciones, las mezclas en frío con emulsión ofrecen algunas ventajas sobre las calientes tales como:

- ~ Economía - Altas tasas de producción combinadas con movilidad y bajo costo de inversiones en equipo. Ideal para proyectos en áreas remotas.
- ~ No Polucionante.- Con la excepción del polvo proveniente de los montones de material, no existen virtualmente emisiones contaminantes en la producción, acarreo y colocación en frío.
- ~ Seguridad.- En áreas con peligro de incendio, por ejemplo en bosques, se reducen los peligros de incendio por no existir resecamiento, ni mezclas, ni cemento asfáltico a alta temperatura usados en la construcción.

#### **2.2.1.2. Mezcla Asfáltica 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, 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 betún asfáltico en volumen de agregados pétreos.

Estas mezclas en caliente, tienen buen comportamiento en servicio cuando son proyectadas, construidas y apoyadas correctamente. Se deben tener en cuenta para este fin, las siguientes exigencias de servicio:

- a) **Durabilidad:** La mezcla debe ser resistente a los agentes climáticos, particularmente a la acción desintegrante del agua y al alto tránsito. Depende fundamentalmente de la utilización de agregados pétreos sanos, y duros, de un adecuado contenido de cemento asfáltico, de la compactación relativa de la mezcla, del contenido de vacíos, de la calidad del filler en el caso de usarse y de que el material que pasa el tamiz N°40 de la mezcla no tenga plasticidad.
- b) **Resistencia al deslizamiento:** Es necesario contar con un porcentaje de cemento asfáltico óptimo y con un porcentaje de vacíos adecuado. Un exceso de cemento asfáltico en la capa de rodamiento es la causa más común de deslizamiento; Bajo contenido de cemento asfáltico (o una falta de adherencia) y agregados que se pulan con el tránsito, originan una falta de fricción entre los neumáticos y el pavimento durante la acción del frenado, sobre todo en períodos de lluvia o alta humedad. Es necesario contar con un porcentaje de vacíos suficientes, como para el aumento de densidad de la mezcla por la reiteración de cargas, no sea motivo de afloración del cemento asfáltico.
- c) **Flexibilidad:** Es la capacidad de deformarse elásticamente que tiene la mezcla asfáltica, para acompañar sin agrietamientos, ni roturas, las pequeñas deflexiones que sufre la base bajo cargas, por otra parte debe tener cierto carácter plástico que le permita relajar las tensiones provocadas por las diferencias de temperatura y adaptarse al movimiento de las estructuras viales

manteniendo uniforme e íntimo contacto con las capas de apoyo no asfálticas. Está influenciada por la rigidez del cemento asfáltico usado (medido por la penetración o la viscosidad y su susceptibilidad térmica), por un adecuado porcentaje de cemento asfáltico óptimo; por la relación filler-betún y por la relación estabilidad-fluencia.

- d) Estabilidad:** Puede definirse como la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bajo la acción del tránsito. La mezcla asfáltica compactada es sometida en estado de compresión semi-confinada a esfuerzos de corte. Depende su comportamiento de la forma, tamaño y textura superficial de los agregados; dureza y cubicidad de los mismos; características del cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo; relación filler-betún y grado de compactación.
  
- e) Compactabilidad:** La mezcla debe permitir una fácil distribución y una correcta densificación. Los factores que influyen son: tipo de cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo; granulometría; textura y rugosidad del agregado y muy particularmente la forma de las partículas del agregado mineral y la relación filler-betún. Un adecuado porcentaje de arena natural redondeada, asegura una buena trabajabilidad.

El cumplimiento de estas cinco exigencias mencionadas, involucra además de los factores mencionados para cada una de ellas, el especial cuidado de las temperaturas y procesos de mezclado, aplicación y compactación.

### **2.3. PRODUCTOS BITUMINOSOS**

Los ligantes asfálticos se definen como productos derivados del petróleo de aspecto oscuro y viscoso, con características aglomerantes y propiedades termoplásticas

que hacen apropiado su empleo de firmes. También reciben el nombre de betunes de penetración, ya que es el ensayo de penetración quien los caracteriza y clasifica.

En general, todos los ligantes asfálticos presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facilidad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmiscibilidad con el agua, a excepción del uso de emulsificantes.

Sus propiedades más destacables de los ligantes asfálticos, desde el punto de vista de la técnica de construcción de carreteras son las siguientes:

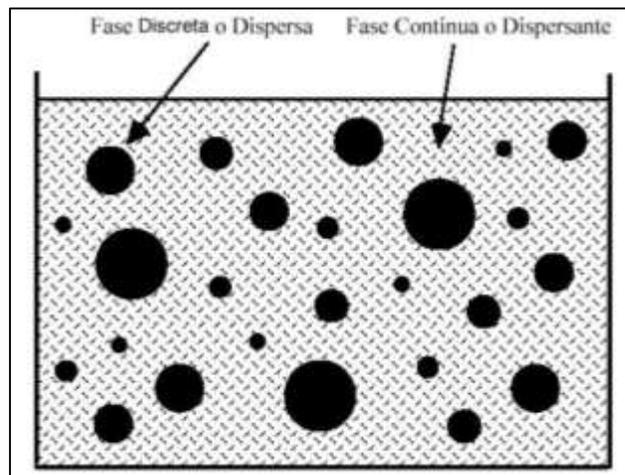
- 1) Adhesividad.- Facilidad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral.
- 2) Viscosidad.- Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. En el caso de los betunes, varía con la temperatura, lo que da una idea de susceptibilidad térmica.
- 3) Susceptibilidad Térmica.- Indica la propensión que presenta el betún a variar ciertas propiedades reológicas con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.
- 4) Plasticidad.- Define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no soportará deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas o desconchamientos.
- 5) Envejecimiento.- Fenómeno de degradación y transformación química de los componentes del betún debido a la acción oxidante del aire y la presencia de

humedad y radiaciones solares, haciendo que el betún pierda sus propiedades reológicas y adhesivas.

#### **2.4. EMULSIÓN ASFÁLTICA**

La palabra emulsión tiene su origen en el verbo latino emulgere, que significa ordeñar, por eso se considera como el prototipo de emulsión natural a la leche de los mamíferos. Para nuestro caso podemos definir de una manera técnica las emulsiones asfálticas como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro (o sea dispersión de asfalto en agua), con interrelación de partículas del tamaño de 1 a 20 micras u otro tamaño según la necesidad, los cuales son no se combinan entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. 1. Esto puede apreciarse en la figura 1, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión asfáltica.

*Figura 2.1. Diagrama Esquemático de una Emulsión*



*Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011*

#### **2.4.1. Componentes de las Emulsiones Asfálticas**

Son tres los componentes básicos de una emulsión asfáltica, estos son: asfalto, agua y un agente emulsivo. También podrían ser parte de estos componentes aditivos como estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento, o agentes de control de rotura. Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Como el caso de lavarse las manos llenas de grasa con un jabón. Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezclada. Más aún, la emulsión deberá romper rápidamente tras entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o tras ser distribuida sobre la cancha.

La rotura es la separación, del agua del asfalto, al curar el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la resistencia al agua propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

### 2.4.2. Teoría de las Emulsiones Asfálticas

En cuanto a las emulsiones asfálticas, éstas se obtienen cuando el asfalto es mecánicamente separado en partículas microscópicas y dispersadas en agua con un agente emulsivo. Las pequeñas gotas del asfalto se mantienen uniformemente dispersas en la emulsión hasta el momento en que ésta es utilizada. En la emulsión las moléculas del agente emulsivo se orientan rodeando a las gotitas de asfalto. La naturaleza química del sistema emulsivo (asfalto/agua) determina las características de la dispersión y la estabilidad de la emulsión, cuando se utilizan las emulsiones en una obra, el agua se evapora, quedando el agente emulsivo retenido en el asfalto.

Como ya se había mencionado dentro de una emulsión los líquidos que la forman representan dos fases, la fase dispersa o discontinua y la fase dispersante o continúa. A partir de estas fases tenemos que mencionar que existen dos tipos de emulsión según la concentración de cada una de esas fases:

- Las emulsiones directas: son aquellas en las que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa.
- Las emulsiones inversas: son aquellas en las que la fase acuosa está dispersa en la fase hidrocarbonada.

Las emulsiones que utilizamos en la industria de las carreteras son las directas. Y es preferible su utilización debido a su baja viscosidad a temperatura ambiente.

Por razones de simetría en la acción capilar, los glóbulos de asfalto de la emulsión son de forma esférica. El tamaño promedio del glóbulo de asfalto es de 2 a 6 micras, tan pequeño que hace aumentar la superficie de contacto del asfalto. Favoreciendo el humedecimiento, distribución y cohesión con el material pétreo.

De aquí que entre más pequeña sea el tamaño de la partícula, mayor será se capacidad para cubrir los materiales pétreos, en comparación con los rebajados o cementos asfálticos.

### **2.4.3. Clasificación de las Emulsiones Asfálticas.**

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte hidrofílica (generalmente es un grupo polar de tipo orgánico o inorgánico), soluble en el medio acuoso.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de tres tipos, aniónicas, catiónicas, y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente usadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Estas denominaciones aniónicas y catiónicas se refieren a las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto.

Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad, que las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

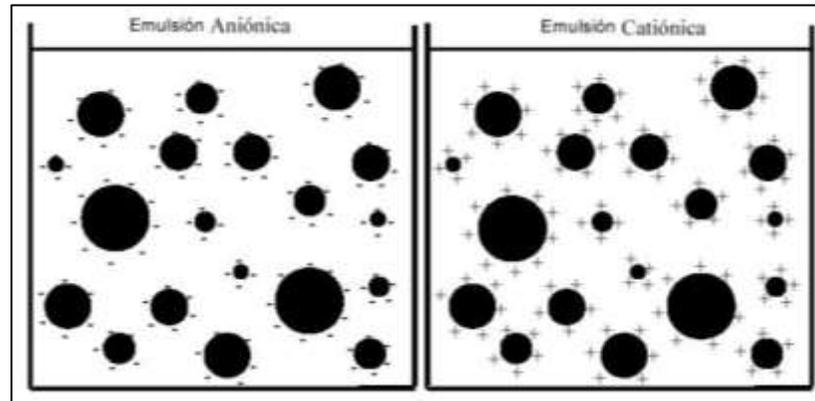
#### **a) Emulsiones Aniónicas**

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro negativamente.

#### **b) Emulsiones Catiónicas**

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro positivamente.

**Figura 2.2. Presentación Esquemática de una Emulsión Aniónica y Catiónica**



*Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011*

#### **2.4.4. Elaboración de Emulsión**

##### **a) Equipo de Emulsión**

El equipo básico para preparar emulsiones incluye un dispositivo mecánico de alta velocidad de altas tensiones de corte (Usualmente un molino coloidal) para dividir el asfalto en pequeñas gotitas. Un diagrama de una típica planta de elaboración de emulsiones asfálticas se muestra en la figura 3. También se necesita un tanque para la solución del emulsivo y un tanque para el asfalto caliente, bombas, y medidores de caudal.

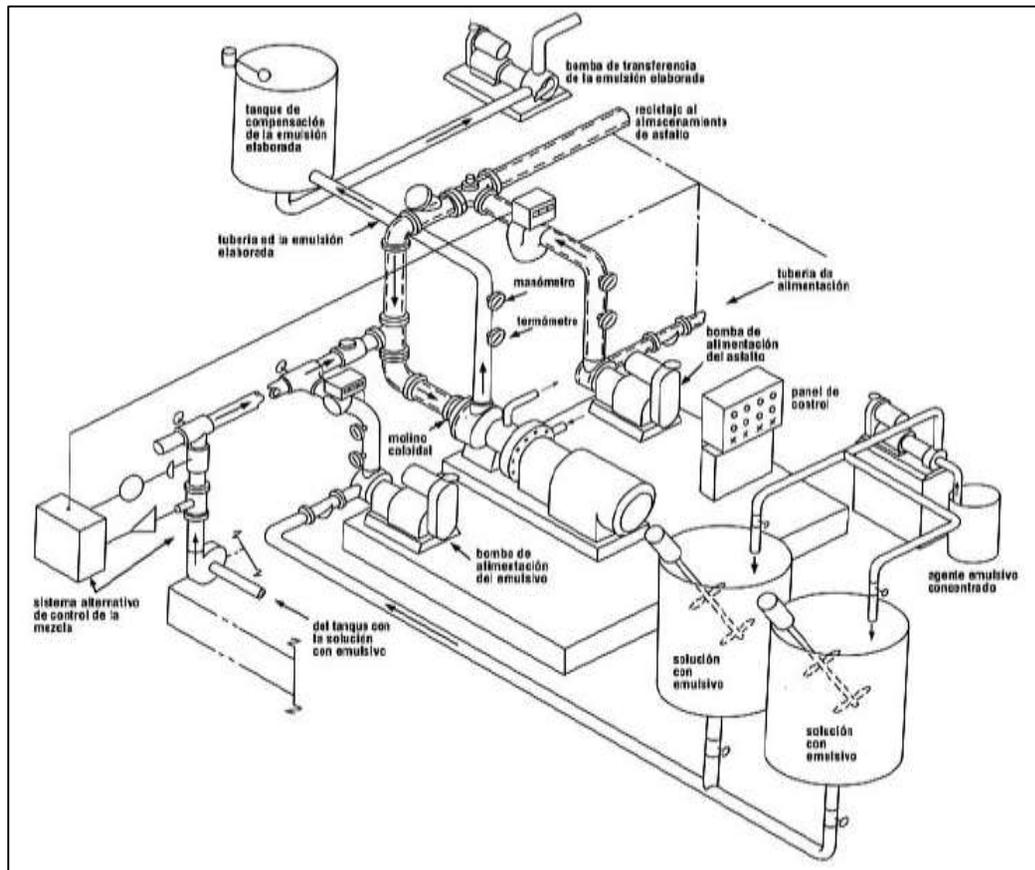
El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz ó 1000-6000 RPM) con gálipos de paso en el orden de 0.25 a 0.50 mm. Típicamente, las gotitas de las emulsiones asfálticas tienen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano

esto es alrededor de 0.001 a 0.010 mm. Comúnmente se emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de la emulsión.

El tamaño de las gotas de asfalto depende la energía mecánica unitaria aplicada por el molino.

Para medir las cantidades de asfalto y de solución emulsiva que ingresan en el molino coloidal se utilizan sendas bombas. Debido a que la solución emulsiva puede ser altamente corrosiva puede ser necesario emplear equipos construidos con materiales resistentes a la corrosión.

***Figura 2.3. Diagrama de una Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica***



Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011

## b) Proceso de Emulsificación

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñas gotitas. Al mismo tiempo, se ingresa en el molino coloidal el agua conteniendo el agente emulsivo. El asfalto que ingresa en el molino coloidal se calienta para alcanzar una baja viscosidad; la temperatura del agua se ajusta para optimizar el proceso de emulsificación. Estas temperaturas varían, dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y de la compatibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo.

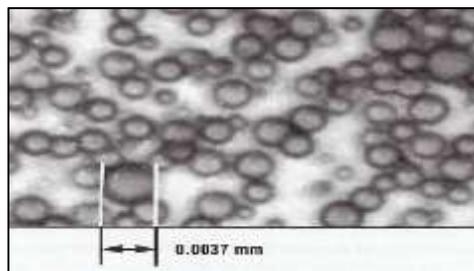
Debido a que la temperatura de la emulsión al abandonar el molino debe ser inferior al punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas

extremadamente altas, al menos que se emplee un enfriador. Luego, la emulsión es usualmente bombeada a tanques de almacenamiento a granel. Estos tanques pueden estar equipados con agitadores mecánicos para mantener la uniformidad de la emulsión.

El método de incorporación del emulsivo al agua varía de acuerdo con el procedimiento empleado por el fabricante. Para ser solubles en agua, algunos emulsivos, como las aminas, deben mezclarse y reaccionar con el ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. La mezcla de emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente al agua caliente que contiene ácidos o álcali, y es agitado hasta su completa disolución.

Las proporciones de asfalto y de solución emulsificante deben medirse con exactitud. Esto se hace normalmente con medidores de caudal; pero también pueden controlarse las proporciones verificando la temperatura de cada fase y la descarga del molino. Si se usa el método de regulación de temperatura, a partir de los componentes se calcula la temperatura deseada de salida de la emulsión ya elaborada; así se controla el porcentaje de contenido de asfalto.

***Figura 2.4. Tamaños relativos y distribución de las partículas de asfalto en una emulsión***



*Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011*

#### **2.4.5. Uso generales de las emulsiones**

Cada grado de emulsión asfáltica ha sido diseñado para usos específicos, usado ampliamente en la construcción, entre los que destacan:

- Juntas para pavimentos hidráulicos.
- Adhesivos.
- Selladores.
- Impermeabilizantes.
- Para tratamientos superficiales, para pavimentos asfálticos, en carreteras y
- Aeropistas:
  - Riegos de impregnación.
  - Riegos de imprimación o penetración.
  - Riegos negros con emulsión diluida.
  - Riegos de liga.
  - Riegos de sello con arena o gravilla seleccionada.
- Lechada asfáltica o slurry seal (sólo con emulsiones asfálticas).
- Bacheo.
- Mezcla cerrada y mezcla abierta.
- Grava - emulsión y arena – emulsión.

#### **2.4.6. Rompimiento de las Emulsiones Asfálticas**

Cuando uno usa emulsiones asfálticas, es necesario tener control sobre la estabilidad de la emulsión, o sea, se tiene que poder controlar el rompimiento de la misma. Pasado un tiempo determinado, el cual depende de la situación en particular que se esté trabajando, las emulsiones tienen que desestabilizarse para que el asfalto se deposite como una capa sobre el material pétreo.

Este fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene el material pétreo. La carga que tiene el material pétreo neutraliza

la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran tamaño; estos agregados son los que se depositan sobre el material pétreo formando una capa asfáltica.

Durante este proceso el agua es eliminada del sistema asfalto-pétreo. En el proceso de desestabilización, la emulsión como va perdiendo agua, pasa por una emulsión inversa en donde el asfalto forma la fase continua y el agua la fase discreta, o sea que se forman pequeñas gotas de agua en el interior del asfalto, las cuales posteriormente, cuando se deposita la capa de asfalto, son eliminadas.

En general, los factores que influyen en la ruptura de la emulsión aniónica son la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo. La ruptura de la emulsión catiónica se produce por la absorción de la parte polar del emulgente por los agregados, provocando la ruptura de la emulsión y haciendo que las partículas del asfalto se adhieran inmediatamente a las partículas del material pétreo, aun en presencia de humedad. En la figura 6 podemos observar el proceso de ruptura de una emulsión en tres pasos: primero se observa la emulsión, enseguida cuando se inicia el rompimiento y después cuando se produce la ruptura completa y queda el material pétreo cubierto por el asfalto.

La forma de rompimiento de las emulsiones asfálticas catiónicas, en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa del agregado pétreo; adicionalmente permite proseguir los trabajos de asfaltado en regiones con climas húmedos o durante una temporada de lluvias, garantizando la apertura de caminos al tránsito en un corto período de tiempo.

### **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.

### **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.

### **De Rompimiento Lento**

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

## **2.5. MATERIALES PÉTREOS**

### **2.5.1. DEFINICIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS**

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc) o con ligantes asfálticos (cementos asfálticos y emulsiones).

Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso, y entre el 75 y 85%, en volumen de la mayoría de estructuras de pavimentos.

El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante de la estructura de pavimento.

### **2.5.2. TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS**

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

#### **a) Agregados naturales**

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y la arena.

La grava se define usualmente, como partículas de tamaño igual o mayor que 4.75 mm (N°4). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 4.75 mm (N°4) pero mayor que 0.075 mm (No 200). Las partículas menores de 0.075 mm (No 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de cantera de ríos.

Los depósitos de grava varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente alguna cantidad de arcilla y limo.

## **b) Agregados de trituración**

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Aquí se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Existen dos fuentes principales de agregados procesados o de trituración; estas son: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable; sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste principalmente en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones de economía, el material triturado es utilizado tal como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado.

Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin

embargo es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores a 6.35 mm (1/4 pulg), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (No 30).

### **c) Agregados sintéticos o artificiales**

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el caso del refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o triturarla una vez se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación, ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y presentan una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

#### **d) Agregados marginales**

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

### **2.5.3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS**

Las propiedades de los agregados pétreos se pueden conceptualizar bajo dos puntos de vista; uno como elementos aislados o individuales, y otro como conjunto.

#### **Propiedades individuales**

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, modulo elástico, conductividad térmica, etc. Así mismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.

#### **Propiedades de conjunto**

Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto va influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

#### **2.5.4. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS AGREGADOS PETREOS PARA PAVIMENTOS**

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad.

Las propiedades más relevantes, consideradas para un agregado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad son las siguientes:

- Graduación y tamaño máximo de partícula.
- Textura superficial
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Dureza
- Afinidad con el asfalto
- Forma de la partícula
- Peso específico

Cada una de estas propiedades importantes que debe poseer un agregado que será utilizado en pavimentación, se describen a continuación.

##### **Graduación**

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado, estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado, es comúnmente llamada graduación del agregado o gradación del agregado.

Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

### **Tamaño máximo de partícula**

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas, estos se describen a continuación:

- ✓ **Tamaño máximo nominal de partícula**, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- ✓ **Tamaño máximo de partícula**, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

Una mezcla de pavimentación, se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregados. El análisis de tamices, consiste en pasar

la muestra por una serie de tamices (ver figura 2.1), cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico.

### **Textura superficial**

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

### **Limpieza**

Las especificaciones de la obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales extraños que adulteran el agregado, generalmente estos materiales extraños los constituyen: vegetación, arcilla esquistosa, partículas

blandas, terrones de arcilla, etc. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregados antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

El ensayo "Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena" (AASHTO T 176), es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción (proporción) de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

### **Capacidad de absorción**

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto, es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado.

Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables para su utilización en mezclas asfálticas, a pesar de su alta capacidad de absorción.

## **Dureza**

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie, deben ser más duros, es decir deben tener más resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Resistencia al Desgaste de Agregado Grueso de Tamaño Pequeño por Impacto y Abrasión en la Máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96), es la medida más común de la dureza en los agregados.

Este ensayo nos permite tener una idea, de la forma en que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causados por el tráfico, además nos proporciona una idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.

Los agregados intemperizados, tendrán valores de desgaste elevados, por lo que su uso será limitado o nulo dentro de un proyecto de pavimentación. Por lo tanto, este valor, es muy utilizado como un indicador de la relativa calidad de los agregados a utilizarse en pavimentación.

## **Afinidad con el asfalto**

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son conocidos como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución.

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua, posteriormente ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo a la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

### **Forma de la partícula**

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida, la forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de una muestra de agregados pétreos.

### **Peso específico**

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa un mayor espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por consiguiente para poder cubrir todas las partículas de agregado, mas asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado

La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación, es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego, restando de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformara la mezcla, el resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra. Todos los agregados son hasta cierto punto porosos.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

- Peso específico bulk.
- Peso específico aparente.
- Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Especifica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

### **2.5.5. CONCEPTOS MÁS FRECUENTES RELACIONADOS A LOS AGREGADOS.**

- **Agregado Grueso:** Agregado que pasa el tamiz de 3'' y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- **Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200)
- **Polvo Mineral:** La porción de agregado fino que pasa el tamiz No. 200
- **Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200).
- **Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- **Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.

- **Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- **Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ningún ligante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.

### **CAPÍTULO III**

## **DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO Y EN CALIENTE**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El diseño de mezclas asfálticas en frío y en caliente se basa en el Método Marshall, manteniendo la granulometría propuesta, para ambos tipos de mezclas.

Las mezclas asfálticas en caliente serán analizadas desde dos puntos de vista, la primera a una temperatura de preparación de la mezcla igual a 140 °C y la segunda a 160°C, para poder ver la incidencia del sobrecalentamiento del cemento asfáltico.

Las mezclas asfálticas en frío serán analizadas también de dos formas, la primera haciendo uso de la Emulsión BETUMIX CR -2H y la segunda con la Emulsión EMULEX RR-2C, para poder analizar y comparar sus propiedades.

### 3.2. CRITERIOS NORMALIZADOS ESTABLECIDOS

Para llevar a cabo este trabajo de investigación, es necesario establecer criterios basados en diferentes normas. Por ello a continuación se detallan los ensayos de laboratorio a realizar para los ligantes asfálticos como para los agregados pétreos.

#### 3.2.1. REQUISITOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO

*Tabla 3.1. Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos*

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 60°. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en cona abierta Cleveland

*Fuente: The Asphalt Institute.*

*Fuente: SCT, 2005.*

**Tabla 3.2. Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.**

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

*Fuente: SCT, 2005.*

### 3.2.2. REQUISITOS DEL AGREGADO PÉTREO

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

**Tabla 3.3. Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados**

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.
Equivalente de	AASHTO T 176	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para

*Fuente: The Asphalt Institute.*

**Tabla 3.4. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.**

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

*Fuente: SCT, 2003.*

**Tabla 3.5. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.**

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

*Fuente: SCT, 2003.*

### **3.2.3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

### **3.2.3.1. MÉTODO MARSHALL**

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estado Unidos en los años 40. Después se hicieron avances y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Instituto del Asfalto.

Como cualquier otro método de diseño de pavimentos, el punto de partida es obtener muestras de materiales representativos de aquellos que serán usados para el proyecto. Este método usa unas muestras estándar de 2 ½ pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de las mezclas de agregado y asfalto. Las dos características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad y vacíos en la mezcla y los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas.

### **3.2.3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA**

#### **Densidad**

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb/pe}^3$ ), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1,000 \text{ kg/m}^3$  o  $62.416 \text{ lb/pe}^3$ ). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

#### **Vacíos de aire**

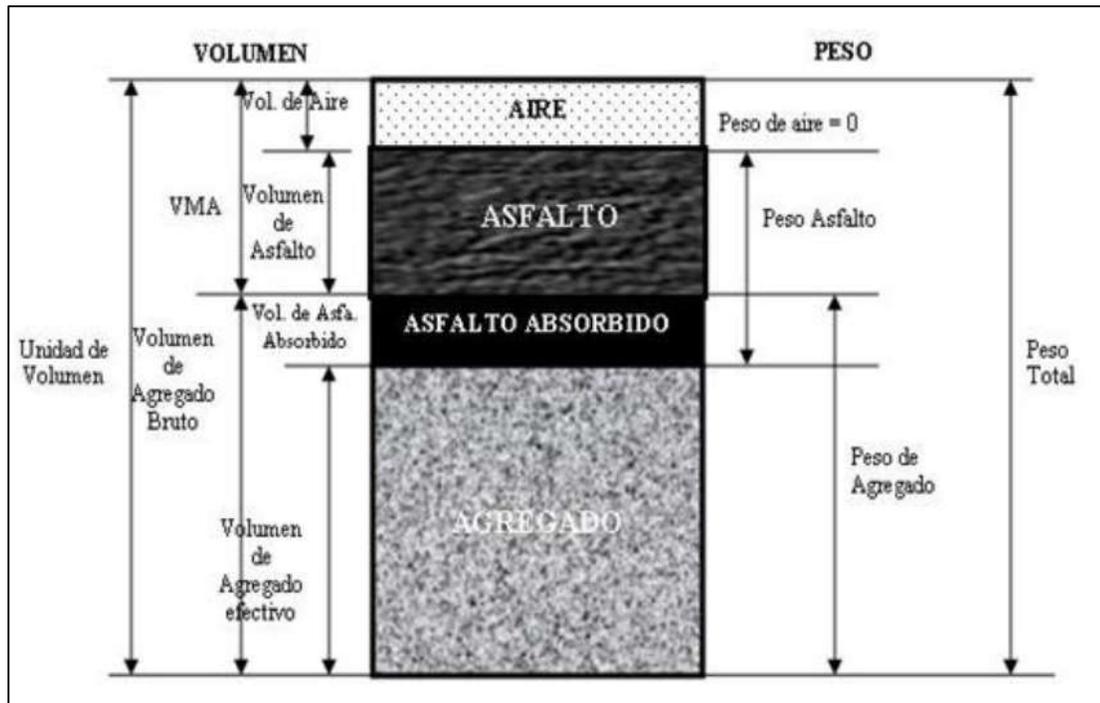
Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que

estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

### **Contenido de asfalto**

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

**Figura 3.1. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica en caliente**



*Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011*

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

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

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

Definidas las características de la mezcla, conviene aclarar qué nos brinda el Método Marshall. Para una mezcla de áridos, que cumpla una especificación determinada con un tamaño máximo igual o menor a 25 mm, según sea usada para base o carpeta y según el tránsito que la solicitará, nos permitirá determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico. La energía de compactación de acuerdo al tránsito será de 50 ó 75 golpes normalizados por cara.

El porcentaje de cemento asfáltico elegido será el que nos dé una mayor densidad de mezcla compactada; es decir la densidad máxima que se obtendrá en servicio, después de la compactación en la etapa constructiva y la producida por el tránsito. Es el porcentaje que corresponde a una máxima estabilidad y con un porcentaje de vacíos que representa el valor medio de los determinados en las especificaciones para el concreto asfáltico en estudio. Determinado el promedio de estos tres porcentajes de

cemento asfáltico, se verifica si con dicho por ciento el valor de fluencia cae dentro de los límites establecidos y si los V.A.M. para el tamaño máximo nominal del agregado pétreo usado son mayores que los mínimos indicados en el siguiente cuadro:

Se considera tamaño máximo nominal del agregado, el tamiz (o abertura en mm) que sigue en la serie al que permite pasar el 100%.

Si los V.A.M. no superan los valores establecidos, se deberá variar los porcentajes de los áridos utilizados o incorporar nuevos agregados para lograr una mezcla adecuada.

**Tabla 3.6. Valores mínimos V.A.M. según el tamaño máximo nominal**

Tamices	Tamaño máximo nominal [mm]	Mínimos V.A.M. [%]
Nº16	1.18	23.5
Nº8	2.36	21.0
Nº4	4.75	18.0
3/8"	9.50	16.0
1/2"	12.50	15.0
3/4"	19.00	14.0
1"	25.00	13.0
1 ½"	37.50	12.0
2"	50.00	11.5

*Fuente: The Asphalt Institute*

### **Vacíos Llenos de Asfalto VFA**

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

### **Estabilidad Marshall**

Es la carga máxima expresada en kg que puede resistir sin que se produzca falla una probeta preparada y ensayada en condiciones normalizadas.

### **Fluencia Marshall**

Es la reducción del diámetro de la probeta, expresada en cm, en el momento de alcanzar la carga máxima y en la dirección de ésta.

### **Relación betún-vacíos**

Expresa el porcentaje de los vacíos de los agregados minerales compactados, ocupados por el cemento asfáltico en la probeta.

### **Relación Estabilidad-Fluencia**

Razón entre la carga máxima en kg y la deformación en cm.

### **Relación filler-betún**

Es la relación en volumen del pasa tamiz N°200 del agregado sobre ese mismo pasa tamiz N°200, más el volumen de cemento asfáltico.

#### **3.2.3.1.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido 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 del análisis granulométrico.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- a) El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- b) Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de mezcla al golpearla.
- c) Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes; una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos y una probeta de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

### **3.2.3.1.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO**

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

#### **3.2.3.1.3.1. Ensayos de Estabilidad y Fluencia**

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

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- a) Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60 ° C (140 ° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- b) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- c) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 in) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta pueda resistir.
- d) La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

### 3.2.3.2. CRITERIOS PARA EL DISEÑO MARSHALL

*Tabla 3.7. Requerimiento para mezclas con Cemento Asfáltico diseñadas con el Método Marshall*

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla 4.2					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: The Asphalt Institute

**Tabla 3.8. Porcentaje mínimo de V.M.A.**

TAMANO MAXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de Diseño, por ciento <sup>2</sup>		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: The Asphalt Institute

**Tabla 3.9. Requerimiento para mezclas con Emulsión Asfáltica diseñadas con el  
Método Marshall**

Propiedad a Evaluar	Mínimo	Máximo
Estabilidad N (lb) a 22,2 °C (72°F)	2224 (500)	-
Porcentaje de pérdida de Estabilidad <sup>1</sup>	-	50
Recubrimiento del Agregado (%)	50	-
1. Luego de saturar los vacíos y sumergir en agua el espécimen		

Fuente: The Asphalt Institute

### **3.2.3.3. PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE LIGANTE**

Existen cuatro procedimientos en el desarrollo del método de Marshall que conllevan a la obtención del porcentaje óptimo de ligante de la mezcla:

- Determinación de la densidad aparente o peso específico total de probetas
- Determinación del contenido de vacíos de las probetas de cada serie del ensayo
- Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall
- Aplicación de criterios para determinar el porcentaje óptimo de ligante

La base del método es, como ya se dijo, el ensayo Marshall, que implica el moldeo y ensayo de probetas y la evaluación de los resultados obtenidos.

Las probetas de ensayo de las distintas series tentativas son preparadas con cantidades diferentes de asfalto. Como en las mezclas densas y semidensas el tenor de asfalto suele rondar el 5% en peso de la mezcla total, es común emplear 6 series de probetas que abarquen un abanico de porcentajes alrededor de este 6%. Una práctica habitual es fabricar probetas con 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, aunque el rango de pruebas estará finalmente determinado en base a la experiencia previa que se tenga con los agregados disponibles y el tipo de mezcla a formular.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y la composición de los agregados se calientan por separado, a una temperatura similar, definida por la viscosidad del ligante que, para mezclas densas y semidensas, se sugiere que sea de 1,8 poise para el mezclado y cuyo valor surge del nomograma de Heukelom de viscosidades vs. temperaturas. Algunos investigadores aconsejan que la temperatura de áridos esté unos grados centígrados por debajo de la correspondiente al asfalto, más que nada para evitar el posible “choque térmico” que se daría si las partículas inertes tuviesen mayor energía calórica que el ligante y que derivaría en un envejecimiento prematuro de éste.

2. Luego se procede al mezclado en el laboratorio, que puede ser manual o, preferentemente, mecánico, hasta que todas las partículas de agregados estén recubiertas de asfalto. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
3. Se coloca la mezcla asfáltica caliente en un molde Marshall pre-calentado como preparación para la compactación. La cantidad de mezcla a colocar será tal que se asegure una altura final compactada de alrededor de 63.5 mm. Como el volumen de la probeta una vez desmoldada es de poco más de 500 cm<sup>3</sup>, conociendo las densidades individuales de los materiales y el valor medio de los límites de porcentaje de vacíos totales especificado es posible estimar esa cantidad de mezcla, el cual en general suele rondar los 1200 gramos.
4. Usando el dispositivo compactador Marshall (una especie de maza cilíndrica o martillo que se desliza por una guía y que se deja caer sobre la mezcla contenida en el molde), las probetas son compactadas mediante 50 o 75 golpes por cara, dependiendo de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Después de completada la compactación, las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

#### **3.2.3.4. DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES APARENTES O PESOS ESPECÍFICOS DE LAS PROBETAS**

La densidad aparente de cada probeta se determina con las probetas compactadas ya desmoldadas estacionadas a temperatura ambiente.

Se trata de una medición de peso específico de un sólido, la “probeta”. Tal determinación es esencial para un análisis preciso de todos los parámetros volumétricos de interés.

El peso específico total o densidad aparente de cada probeta se obtiene con el peso de la misma en estado seco y calculando su volumen sumergiéndola en agua (previamente acondicionándola para alcanzar un estado de “saturado y a superficie seca”) y pesándola en tal condición, aplicando el Principio de Arquímedes.

Este dato constituye el primer parámetro volumétrico a obtener, que es en sí mismo una característica de la mezcla que se diseña pero que, además, sirve como dato necesario para el cálculo de los porcentajes de Vacíos Totales de la Mezcla, de los Vacíos del Agregado Mineral (VAM) y de la Relación Betún-Vacíos (RBV).

### 3.2.3.5. DETERMINACIÓN DE LOS VACÍOS DE LAS SERIES DE MEZCLAS DE PRUEBA

Para obtener los parámetros volumétricos de la mezcla compactada se debe primeramente determinar la Densidad Máxima de la mezcla. Hay dos maneras de lograr esa Densidad Máxima. La primera, mediante la llamada “Densidad Máxima Teórica”, (Dmt), suponiendo que que en la probeta compactada no existieran vacíos, se calcula por la fórmula siguiente:

$$Dm_t = \frac{100}{\frac{P_1}{Peas_1} + \frac{P_2}{Peas_2} + \frac{P_3}{Peas_3} + \frac{P_4}{Pea_4} + \frac{P_5}{Pea_5}}$$

donde:

$P_1, P_2 \dots P_5$  son porcentajes en peso de los materiales que intervienen en la mezcla total.  $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 100$

$Peas_1, Peas_2, Peas_3$  = Peso específico del agregado seco (bulk) de cada uno de los agregados indicados.

$Pea_4$  = Peso específico aparente del relleno mineral

$Pea_5$  = Peso específico absoluto del asfalto (en general, se utiliza 1,000 gr/cm<sup>3</sup>)

La otra manera de determinar la Densidad Máxima es mediante el denominado “Ensayo Rice”, que consiste en pesar una cierta cantidad de mezcla y determinar su volumen sumergiéndola en agua y aplicando vacío con una bomba para retirar todo el aire de sus huecos. Esta “Densidad Máxima Rice”,  $D_{mr}$ , es de empleo habitual en los laboratorios de obra.

Con una u otra densidad máxima, se determinan los Vacíos Totales de la mezcla compactada. Para los Vacíos del Agregado Mineral (VAM) y la Relación Betún-Vacíos (RBV) se necesita, además, conocer el porcentaje de ligante de la mezcla.

Las probetas contienen vacíos en su interior, que son los huecos de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Al respecto, pueden diferenciarse tres parámetros:

### **3.2.3.6. DETERMINACIÓN DE LOS VACÍOS TOTALES DE LA MEZCLA COMPACTADA**

El porcentaje de vacíos de la mezcla compactada,  $V[\%]$  (o “vacíos totales”, para diferenciarlos de los otros parámetros volumétricos que se detallarán posteriormente), se calcula a partir de la densidad aparente de cada probeta compactada y de la densidad máxima o peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Se expresa en porcentaje del volumen total e indica la diferencia relativa entre la densidad máxima ( $D_m$ ) y la densidad de la probeta ( $d$ ).

$$V [\%] = 100 \left( 1 - \frac{d}{D_m} \right)$$

### **3.2.3.7. DETERMINACIÓN DE LOS VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM)**

Los vacíos en el agregado mineral, VAM, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada.

Es, en rigor, una especie “abstracción”, no un estado real. Representa a la mezcla compactada pero considerando como “vacíos” no sólo a los huecos de aire sino también al espacio ocupado en ella por el contenido efectivo de asfalto.

Los VAM se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Es determinado con base en el peso específico total del agregado; puede ser calculado como la suma de los vacíos totales y los vacíos que dejaría el asfalto si pudiese ser quitado de la probeta compactada sin que ésta modificara su apariencia externa.

$$\text{V.A.M. [\%]} = V + (d \times \text{CA})$$

V = vacíos de la mezcla compactada (en %)

d = densidad de la probeta

CA = porcentaje en peso del cemento asfáltico total: considerando el peso específico del mismo a 1,000 gr/cm<sup>3</sup>

Es un parámetro muy importante. Los Pliegos suelen fijar su valor mínimo, pues de los VAM depende la capacidad de la mezcla de incorporar asfalto y de mantener un tenor mínimo necesario de vacíos totales.

### **3.2.3.8. DETERMINACIÓN DE LOS VACÍOS OCUPADOS POR EL LIGANTE O RELACIÓN BETÚN/VACÍOS**

Los vacíos ocupados por el ligante son denominados en nuestra lengua, habitualmente, “Vacíos Ocupados por Betún, VOB”.

Significan, precisamente, el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por asfalto en la mezcla compactada.

Es decir: los VMA abarcan asfalto y aire, y por lo tanto, los VOB se calculan como la proporción porcentual de los VMA que están efectivamente ocupados por el asfalto, y

por eso a este valor se lo llama también como “Relación Betún/Vacíos” que, más adecuadamente, debería llamarse “relación entre el volumen ocupado efectivamente por el asfalto y el volumen de los VAM”.

Hay dos formas de calcularlo, que son equivalentes en cuanto a su resultado final:

$$\text{VOB o RBV [\%]} = \frac{100 \times d \times CA}{V.A.M.} = \frac{(VAM - V)}{VAM} \times 100$$

### 3.2.3.9. ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA MARSHALL

El ensayo mecánico Marshall simula la resistencia de la mezcla compactada a soportar cargas y su comportamiento plástico ante las solicitaciones.

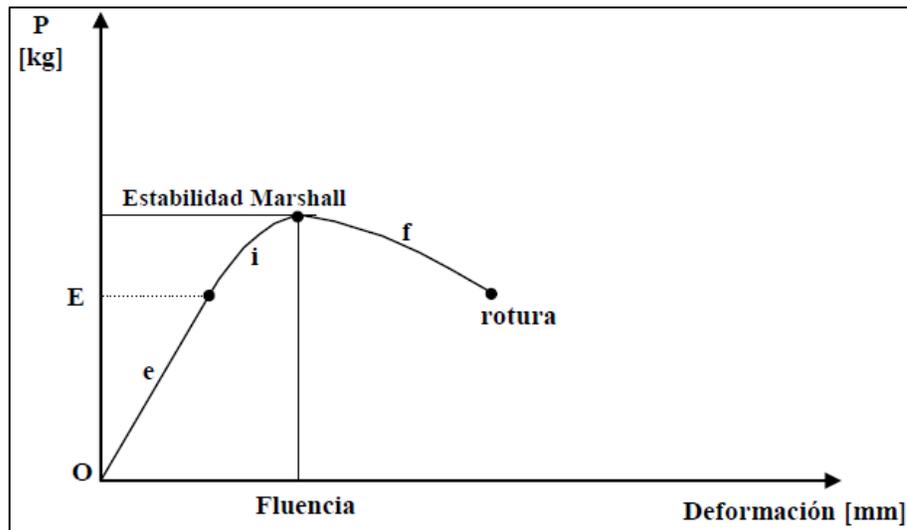
Los parámetros que se obtienen son dos: la “estabilidad” [kg o libras] y la “fluencia” [mm o centésimas de pulgada]; un valor complementario es la razón “estabilidad/fluencia” [kg/cm o libras/centésimas de pulgada]. Los Pliegos exigen valores límites a cumplir de estas tres medidas.

Para el ensayo, las probetas Marshall, previamente desmoldadas y estacionadas a temperatura ambiente, se mantienen durante 24 horas en un baño de agua a 60 °C el tiempo necesario para que la mezcla alcance dicha temperatura (las normativas suelen especificar entre 30 y 60 minutos). Inmediatamente después y sin dejar que la probeta se enfríe, se realiza el ensayo aplicando compresión diametral sobre una mordaza perimetral entre la cual se coloca la probeta, imponiéndose así condiciones de semiconfinamiento, con una velocidad de deformación lenta, cuasi-estática, de 50,8 mm/min.

Se define a la Estabilidad como la carga máxima que soporta la probeta, en tanto que la Fluencia es la lectura de deformación diametral vertical que se registra en el mismo instante en que se alcanza la carga máxima.

La curva de carga–deformación en el ensayo Marshall se observa en el gráfico de la figura. En la misma se ve que, antes de alcanzarse la carga máxima, aparecen deformaciones plásticas (irrecuperables) con expansión lateral y la falla se produce al vencerse la resistencia cohesiva y friccional que ofrece la probeta.

**Figura 3.2. Gráfico del ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall**



Fuente: The Asphalt Institute

Se nota un periodo de comportamiento cuasi-elástico  $e$ , existiendo proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones hasta el punto indicado como  $E$ . Puede considerarse que en el segmento  $O-E$  las deformaciones son recuperables por elasticidad instantánea y/o retardada. Luego a partir del punto  $E$  y hasta alcanzar la carga máxima indicada en el gráfico como Estabilidad Marshall, la curva toma la forma de una parábola presentando un período elasto-plástico  $i$ ; las deformaciones son mayores en este período en relación al periodo elástico para iguales incrementos de carga con una pérdida de la reacción elástica, dado por la diferencia entre la curva real y la prolongación del segmento  $O-E$ . El momento en que se llega al máximo es aquel en que se destruye la estructura granular; la mezcla aquí ya se ha dislocado, o sea se ha producido la falla de la misma llegando al máximo valor de corte que puede resistir. Por último la curva presenta un período en que la mezcla fluye plásticamente  $f$ , con una

deformación de mayor magnitud en la parte descendente de la curva antes de la falla total. La Fluencia Marshall es la deformación en correspondencia con la Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que es deseable un valor de estabilidad muy alto; esto se debe a que para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad, pero sin embargo éste no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas, corrientemente, se obtienen a costa de durabilidad (envejecimiento prematuro) y/o de flexibilidad. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio; mientras que aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse excesivamente bajo las cargas del tránsito. Por todo lo antedicho cobra relevancia la relación estabilidad/fluencia.

Con todos los datos se generan curvas que representan:

- 1.- Estabilidad vs. % Contenido de Ligante
- 2.- Fluencia vs. % Contenido de Ligante
- 3.- Densidad vs. % Contenido de Ligante
- 4.- Vacíos vs. % Contenido de Ligante
- 5.- V.A.M. vs. % Contenido de Ligante
- 6.- R. B.V. vs. % Contenido de Ligante

Se observan las siguientes tendencias:

- 1.- La estabilidad aumenta con el tenor cemento asfáltico, hasta un cierto máximo y luego decrece.

2.- La fluencia aumenta con mayores porcentajes de CA, observándose que una vez alcanzado el óptimo, crece más marcadamente.

3.- La curva de densidad vs. % CA es similar a la correspondiente a la estabilidad; observándose en general que la máxima densidad corresponde a un tenor de CA un poco mayor que el de la mayor estabilidad.

4.- El porcentaje de vacíos decrece con el aumento del porcentaje del CA. En la gráfica se ven dos curvas, una con valores calculados a partir de la densidad máxima Rice y la otra con la densidad máxima teórica.

5.- El porcentaje de V.A.M. decrece hasta un mínimo y luego aumenta para mayores tenores de C.A.

6.- La relación Betún-Vacíos crece con el aumento del porcentaje de C.A.

Con los datos obtenidos en los gráficos anteriores, se calcula el contenido óptimo de asfalto aplicando alguno de los criterios de dosificación. El más utilizado en nuestro medio es el que promedia los siguientes valores:

- a) El porcentaje de asfalto que corresponda a la mayor densidad.
- b) El contenido de asfalto que corresponda a la mayor estabilidad.
- c) El porcentaje de asfalto que corresponda al valor medio de los vacíos totales fijados como límites en las especificaciones de la mezcla en estudio (usualmente se exige entre 3% y 5%, por lo tanto, el valor medio sería de 4%).

Determinado el promedio de estos tres porcentajes de cemento asfáltico, se verifica si con dicho porcentaje los valores de Fluencia, VAM y RBV se ubican dentro de los límites establecidos por las especificaciones. Por ejemplo, suele exigirse una Fluencia entre 2 mm y 4,5 mm, V.A.M. mayores que 14% y RBV entre 75% y 85%. Si los

resultados no se encuadran dentro de lo establecido, se deberá variar los porcentajes de los áridos utilizados o incorporar nuevos agregados para lograr una mezcla adecuada.

### **3.3. SELECCIÓN DE MATERIALES**

#### **3.3.1. AGREGADOS PÉTREOS**

El material pétreo, está situado en la comunidad de San Mateo, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provisión de material para la Alcaldía del Municipio de Tarija de la Provincia Cercado y que es almacenado en la comunidad de La Pintada. Para la obtención de los agregados pétreos, se procedió a pedir autorización a la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija, quienes proporcionaron muestras de grava, gravilla y arena, con un tamaño máximo de 1” necesario para diseñar las mezclas con el método Marshall.

#### **3.3.2. MATERIALES BITUMINOSOS**

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

El cemento asfáltico C.A. 85-100 con nombre Betunel, de procedencia Brasileira, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos analizados en laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

*Imagen 3.1. Muestra de Cemento Asfáltico 85/100*



*Fuente: Elaboración Propia*

Las emulsiones asfálticas CRS-2H y RR-2C son de procedencia Brasileira, proporcionado por el Servicio Departamental de Caminos SE.DE.CA; siendo los mismos analizados en laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

***Imagen 3.2. Muestra de las Emulsiones Asfáltica empleadas***



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

#### **3.4.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PÉTREOS**

##### **3.4.1.1. GRANULOMETRÍA**

Se procedió a realizar el análisis granulométrico por el método de la vía húmeda, porque los agregados tenían material fino.

*Imagen 3.3. Lavado de la muestra para granulometría*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.4. Juego de tamices para granulometría*



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 3.5. Obtención de pesos retenidos en cada tamiz**



Fuente: Elaboración Propia

**RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

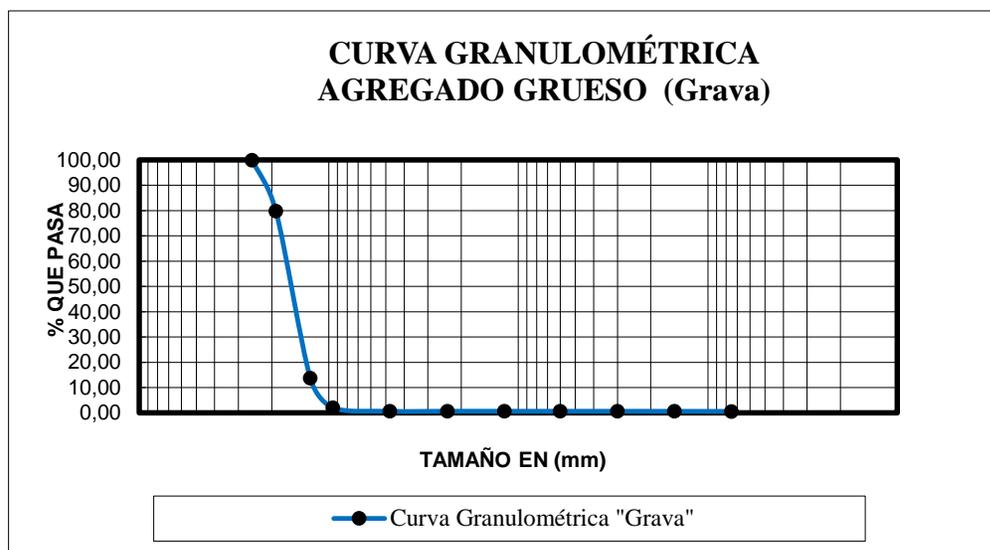
**Tabla 3.10. Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Grava)**

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,0	1004,30	1004,30	20,09	<b>79,91</b>
1/2"	12,5	3306,40	4310,70	86,21	<b>13,79</b>
3/8"	9,50	583,40	4894,10	97,88	<b>2,12</b>
Nº4	4,75	70,50	4964,60	99,29	<b>0,71</b>
Nº8	2,36	0,10	4964,70	99,29	<b>0,71</b>
Nº16	1,18	0,50	4965,20	99,30	<b>0,70</b>
Nº30	0,60	0,30	4965,50	99,31	<b>0,69</b>
Nº50	0,30	0,20	4965,70	99,31	<b>0,69</b>
Nº100	0,15	0,70	4966,40	99,33	<b>0,67</b>
Nº200	0,075	1,80	4968,20	99,36	<b>0,64</b>

BASE	-	30,90	4999,10	99,98	0,02
	<b>SUMA</b>	4999,1			
	<b>PÉRDIDAS</b>	0,9			

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.1. Curva Granulométrica del agregado grueso (Grava)**



Fuente: Elaboración Propia

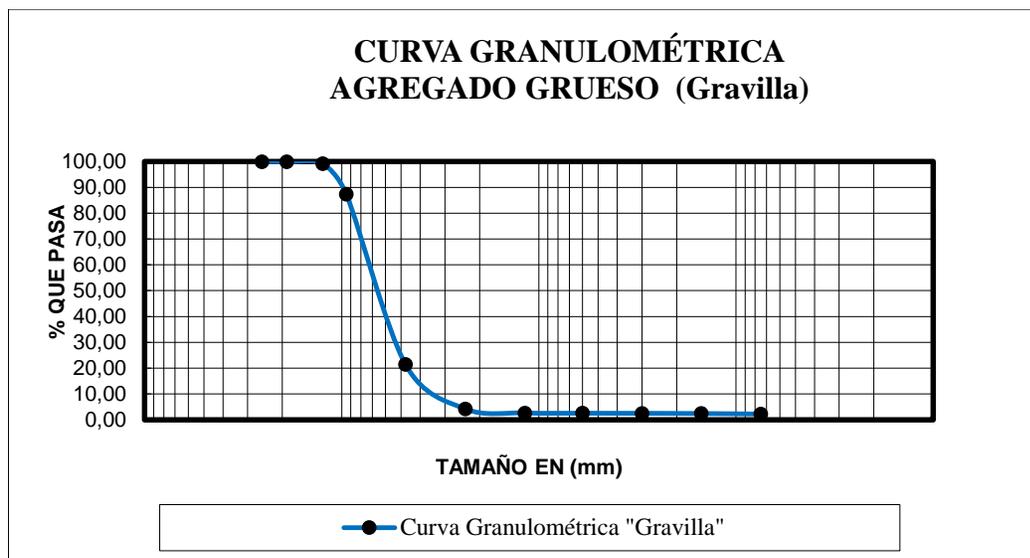
**Tabla 3.11. Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Gravilla)**

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	40,60	40,60	0,81	99,19
3/8"	9,50	587,10	627,70	12,55	87,45
Nº4	4,75	3302,40	3930,10	78,60	21,40
Nº8	2,36	859,50	4789,60	95,79	4,21
Nº16	1,18	77,80	4867,40	97,35	2,65
Nº30	0,60	5,60	4873,00	97,46	2,54
Nº50	0,30	2,10	4875,10	97,50	2,50
Nº100	0,15	3,90	4879,00	97,58	2,42
Nº200	0,075	9,90	4888,90	97,78	2,22
BASE	-	109,70	4998,60	99,97	0,03

<b>SUMA</b>	4998,6
<b>PÉRDIDAS</b>	1,4

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.2. Curva Granulométrica del agregado grueso (Gravilla)**



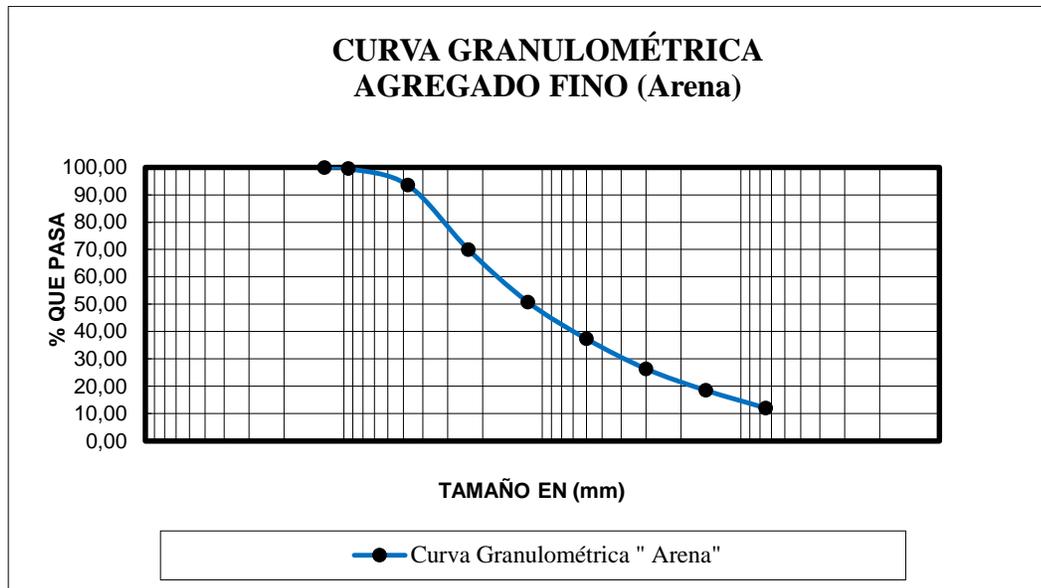
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.12. Tabla de resultados de la granulometría del agregado fino (Arena)**

Peso Total (gr.)			3000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/8	9,50	13,00	13,00	0,43	<b>99,57</b>
Nº4	4,75	181,70	194,70	6,49	<b>93,51</b>
Nº8	2,36	705,80	900,50	30,02	<b>69,98</b>
Nº16	1,18	577,70	1478,20	49,27	<b>50,73</b>
Nº30	0,60	401,50	1879,70	62,66	<b>37,34</b>
Nº50	0,30	330,00	2209,70	73,66	<b>26,34</b>
Nº100	0,15	235,90	2445,60	81,52	<b>18,48</b>
Nº200	0,075	193,00	2638,60	87,95	<b>12,05</b>
BASE	-	360,20	2998,80	99,96	<b>0,04</b>
<b>SUMA</b>		2998,8			
<b>PÉRDIDAS</b>		1,2			

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.3. Curva Granulométrica del agregado fino (Arena)**



*Fuente: Elaboración Propia*

#### **3.4.1.2. PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO**

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

**Imagen 3.6. Secado superficial con secadora**



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 3.7. Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca**



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.13. Tabla de resultados del peso específico del agregado fino (Arena)**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRÁZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRAN EL (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	500	177,4	989,2	311,80	494,50	500,00	2,63	2,66	2,71	1,10
2	500	177,4	988,3	310,90	498,20	500,00	2,63	2,64	2,66	0,36
3	500	177,4	987,4	310,00	498,10	500,00	2,62	2,63	2,65	0,38
PROMEDIO							<b>2,63</b>	<b>2,64</b>	<b>2,67</b>	<b>0,61</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1.3. PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVILLA Y GRAVA)

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

*Imagen 3.8. Pesaje del material retenido en el tamiz N° 4*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.9. Secado superficial de la muestra saturada 24 hrs. antes*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.10. Obtención del peso sumergido*



*Fuente: Elaboración Propia*

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

*Tabla 3.14. Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Gravilla)*

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	4935,90	5051,70	3043,00	2,46	2,51	2,61	2,35
2	4930,10	5046,20	3041,00	2,46	2,52	2,61	2,35
3	4928,50	5046,10	3040,00	2,46	2,52	2,61	2,39
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,46</b>	<b>2,52</b>	<b>2,61</b>	<b>2,36</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.15. Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Grava)**

MUESTRA	PESO MUESTRA	PESO MUESTRA	PESO MUESTRA	PESO ESPECÍFICO	PESO ESPECÍFICO	PESO ESPECÍFICO	%
Nº	SECADA "A" (gr)	SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	A GRANEL (gr/cm3)	SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	APARENTE (gr/cm3)	DE ABSORCIÓN
1	4964,30	5046,20	3050,00	2,49	2,53	2,59	1,65
2	4570,80	4648,40	2797,00	2,47	2,51	2,58	1,70
3	4972,20	5045,30	3047,00	2,49	2,52	2,58	1,47
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,48</b>	<b>2,52</b>	<b>2,58</b>	<b>1,61</b>

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.1.4. DESGASTE DE LOS ÁNGELES

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

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

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

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

**Tabla 3.16. Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.**

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10

<b>PESO TOTAL</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
NUMERO DE ESFERAS	12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES	500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION	30	15	15	15

*Fuente: Norma ASTM, C131.*

***Imagen 3.11. Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles con el N° de esferas correspondiente***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.12. Pesaje de la muestra retenida en el tamiz N°12, después del lavado y secado en el horno***



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.17. Tabla de datos del Desgaste de los Ángeles**

### DATOS DE LABORATORIO

GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO						
1"	-	1/2"	-	1/4"	-	N°8	-
3/4"	1251,5	3/8"	-	N°4	-		
1/2"	1251,3						
3/8"	1251,8						

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.18. Tabla de resultados del Desgaste de los Ángeles**

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	3754,6	2698,4	28,13	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1.5. EQUIVALENTE DE ARENA

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

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se

pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

***Imagen 3.13. Colocado de la muestra con solución dentro de la probeta***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.14. Obtención de las lecturas  $H_1$  y  $H_2$***



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.19. Tabla de datos y resultados de Equivalente de Arena**

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,9	10,60	93,40
2	11,3	12,15	93,00
3	10,8	11,70	92,31
<b>Promedio</b>			<b>92,90</b>

Equivalente de Arena (%)	NORMA
<b>92,90</b>	> 50%

*Fuente: Elaboración Propia*

## 3.4.2. CARACTERIZACIÓN MATERIALES BITUMINOSOS

### 3.4.2.1. PENETRACIÓN

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos. Los materiales que tienen penetraciones debajo de 350 pueden ser probados por el aparato normal y con el siguiente procedimiento. Para materiales que tienen penetraciones entre 350 y 500, se debe usar un aparato especial.

La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja normalizada penetra verticalmente bajo las condiciones fijas de temperatura, carga y tiempo.

***Imagen 3.15. Realización del ensayo de penetración***



*Fuente: Elaboración Propia*

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

***Tabla 3.20. Tabla de datos y resultados del ensayo de Penetración del Cemento  
Asfáltico 85/100***

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.( 0.1mm)	Lectura N°1	mm	92	94	98	95	85	100
	Lectura N°2		97	93	95			
	Lectura N°3		91	99	92			
	Promedio		93	95	95			

AASHTO T-49								
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.21. Tabla de datos y resultados del ensayo de Penetración de la Emulsión CRS-2H**

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	58	-	-	95	50	250
	Lectura N°2		62	-	-			
	Lectura N°3		51	-	-			
	Promedio		57	-	-			

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.22. Tabla de datos y resultados del ensayo de Penetración de la Emulsión RR-2C**

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	59	-	-	62	50	250
	Lectura N°2		65	-	-			
	Lectura N°3		62	-	-			
	Promedio		62	-	-			

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.2. VISCOSIDAD

Este método cubre los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad cinemática de productos de petróleo a temperaturas especificadas de 135°C. Un procedimiento especial para los productos cerosos es incluido.

**Imagen 3.16. Calentado del aceite y colocado del viscosímetro con el material bituminoso**



Fuente: Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.23. Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad del Cemento  
Asfáltico 85/100**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	325	297	318	313	250	-

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.24. Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad de la Emulsión  
CRS-2H**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	s	271	-	-	271	100	400

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.25. Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad de la Emulsión RR-2C**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	s	299	-	-	299	100	400

Fuente: *Elaboración Propia*

### 3.4.2.3. DUCTILIDAD

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. A menos que por otra parte se especifique, el ensayo se hará a una temperatura de  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  ( $77 \pm 0.2^\circ\text{F}$ ) y con una velocidad de 50 mm por minuto  $\pm 2.5$  mm por minuto. A otras temperaturas la velocidad debe especificarse.

**Imagen 3.17. Colocado de la muestra en moldes**



Fuente: *Elaboración Propia*

**Imagen 3.18. Muestra en ensayo de ductilidad**



Fuente: Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.26. Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad del Cemento  
Asfáltico 85/100**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad 25°C	cm	115	105	107	109	100	-

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.27. Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad de la Emulsión  
CRS-2H**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad 25°C	cm	106	94	111	104	100	-

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.28. Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad de la Emulsión  
RR-2C**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad 25°C	cm	119	132	130	127	125	-

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.4. PUNTO DE INFLAMACIÓN

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

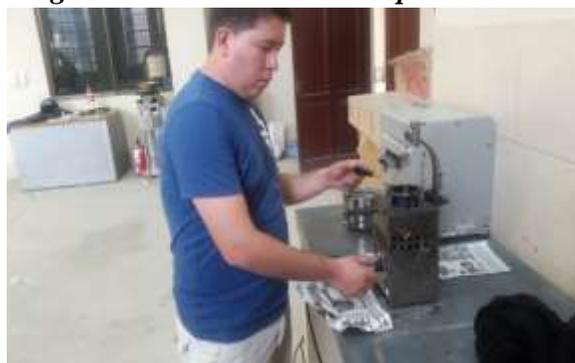
### Punto de destello

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

### Punto de inflamación

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

**Imagen 3.19. Muestra en la copa de Cleveland**



*Fuente: Elaboración Propia*

### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Tabla 3.29. Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Inflamación del Cemento Asfáltico 85/100**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación	°C	>280	>290	>295	<b>&gt;288</b>	>232	-



Punto de ablandamiento	°C	44,0	47,0	43,0	45	42	53
------------------------	----	------	------	------	----	----	----

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.4.2.6. PESO ESPECÍFICO

La gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves se expresarán como la relación de la masa de un volumen dado del material a 25°C (77°F) o a 15.6°C (60°F) al que es igual de un volumen de agua a la misma temperatura.

*Imagen 3.21. Ensayo de peso específico de ligantes asfálticos*



*Fuente: Elaboración Propia*

### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

*Tabla 3.31. Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico del Cemento Asfáltico 85/100*

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,0	36,9	38,0			

Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,7	62,0	62,7			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	55,8	56,5	56,2			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,8	62,3	62,9			
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,003</b>	<b>1,013</b>	<b>1,008</b>	<b>1,008</b>	1	1,05

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.32. Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico de la Emulsión CRS-2H**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,0	-	-			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,7	-	-			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	53,9	-	-			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,8	-	-			
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,003</b>	-	-	<b>1,003</b>	1	1,01

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.33. Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico de la Emulsión RR-2C**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	37,0	-	-			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,8	-	-			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	60,1	-	-			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,9	-	-			
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,001</b>	-	-	<b>1,001</b>	1	1,01

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.7. DESTILACIÓN

Aplicado para obtener el residuo de material bituminoso de las emulsiones asfálticas propuestas.

**Imagen 3.22. Ensayo de destilación de emulsiones asfálticas**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.34. Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación de la Emulsión Asfáltica CRS-2H**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Residuo de Destilación	%	69	-	-	69	65	

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.35. Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación de la Emulsión Asfáltica RR-2C**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Residuo de Destilación	%	70,9	-	-	70,9	65	

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5. DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA POR EL MÉTODO MARSHALL

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2.54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101.6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2.5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152.4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

1. *Molde de Compactación.* Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura

aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

2. *Martillo de compactación* con base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").

3. *Extractor de Muestras de Asfaltos*. Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.

4. *Soporte para molde o portamolde*. Dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

5. *Mordaza*. Consiste de dos semi-cilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.

6. *Medidor de deformación*. Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

7. *Prensa*. Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min.

8. *Medidor de Estabilidad*. La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

9. *Discos de Papel Filtrante de 4 pulg.*

10. *Horno.* Horno capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5 °F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.

11. *Baño.* El baño de agua con 150mm (6”) de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$  ( $140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{F}$ ), deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2”) sobre el fondo del tanque.

12. *2 Recipientes* de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

13. *Tamices.* De 50 mm (2”), 37.5 mm (1 1/2”), 25 mm (1”), 19.0 mm (3/4”), 12.5 mm (1/2”), 9.5 mm (3/8”), 4.75 mm (N° 4), 2.36 mm (N° 8), 300  $\mu\text{m}$  (N° 50) y 75  $\mu\text{m}$  (N° 200).

14. *Termómetros blindados.* De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0.2°C (68°F a 158°F + 0.4°F).

15. *Balanza.* Para pesar agregado y asfalto de 5 kg. De capacidad, y sensibilidad de un 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg. De capacidad y sensibilidad de 0.1 gr.

### **3.5.1. CONFORMACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS MEZCLAS**

El diseño de mezclas por el método Marshall requiere de ciertos requisitos en la gradación de los agregaos, como muestra el capítulo II, a partir de esas especificaciones

se juega con los porcentajes de grava, gravilla y arena, hasta entrar en medio de las curvas mínimas y máximas normadas por Marshall, y el resultado fue el siguiente:

**Tabla 3.36. Tabla de contenido de agregados en granulometría formada**

Tamices	tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0,3	al 0,2	al 0,5	Peso Ret. 1
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0,00
3/4"	19,0	1004,30	0,00	0,00	301,29	0	0	301,29
1/2"	12,5	3306,40	40,60	0,00	991,92	8,12	0	1000,04
3/8"	9,50	583,40	587,10	21,67	175,02	117,42	10,83	303,27
Nº4	4,75	70,50	3302,40	302,83	21,15	660,48	151,42	833,05
Nº8	2,36	0,10	859,50	1176,33	0,03	171,9	588,17	760,10
Nº16	1,18	0,50	77,80	962,83	0,15	15,56	481,42	497,13
Nº30	0,60	0,30	5,60	669,17	0,09	1,12	334,58	335,79
Nº50	0,30	0,20	2,10	550,00	0,06	0,42	275,00	275,48
Nº100	0,15	0,70	3,90	393,17	0,21	0,78	196,58	197,57
Nº200	0,075	1,80	9,90	321,67	0,54	1,98	160,83	163,35
BASE	-	30,90	109,70	600,33	9,27	21,94	300,17	331,38
<b>SUMA</b>		4999,1	4998,6	4998,0	1499,73	999,72	2499	4998,5
<b>PÉRDIDAS</b>		0,9	1,4	2,0				

Fuente: Elaboración Propia

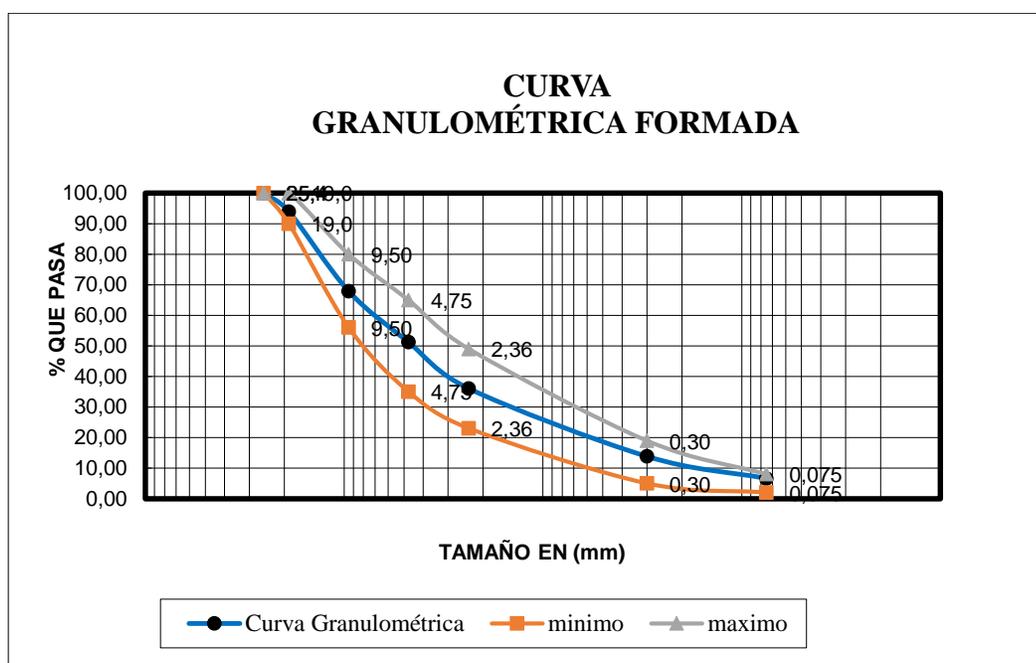
**Tabla 3.37. Tabla de la granulometría formada**

Tamices	tamaño (mm)	TOTAL			% que pasa del total	Especificaciones	
		Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret		Mínimo	Máximo
		1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	301,29	301,29	6,03	93,97	90	100
1/2"	12,5	1000,04	1301,33	26,03	73,97	-	-
3/8"	9,50	303,27	1604,60	32,10	67,90	56	80,00
Nº4	4,75	833,05	2437,65	48,77	51,23	35	65,00
Nº8	2,36	760,10	3197,75	63,97	36,03	23,00	49,00

N°16	1,18	497,13	3694,87	73,92	26,08	-	-
N°30	0,60	335,79	4030,67	80,64	19,36	-	-
N°50	0,30	275,48	4306,15	86,15	13,85	5,00	19,00
N°100	0,15	197,57	4503,72	90,10	9,90	-	-
N°200	0,075	163,35	4667,07	93,37	6,63	2,00	8,00
BASE	-	331,38	4998,45	100,00	0,00	-	-
		4998,45					

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.4. Curva de la granulometría formada Marshall**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE Y AGREGADOS DE CADA PORCENTAJE MARSHALL

#### 3.5.2.1. PARA MEZCLAS EN CALIENTE

Datos Básicos:

$Peso\ Briqueta = 1200\ gr$

$$\% \text{ Briqueta} = 100\%$$

$$\% \text{ Asfalto} = 4.00\% ; 4.50\% ; 5.00\% ; 5.50\% ; 6.00\% ; 6.50\%$$

$$\text{Ponderación Grava} = 0.3$$

$$\text{Ponderación Gravilla} = 0.2$$

$$\text{Ponderación Arena} = 0.5$$

Cálculos aplicando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Agregado} = \% \text{ Briqueta} - \% \text{ Asfalto}$$

$$\text{Peso Asfalto} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Asfalto}$$

$$\text{Peso Grava} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Agregado} * \text{Ponderación Grava}$$

$$\text{Peso Gravilla} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Agregado} * \text{Ponderación Gravilla}$$

$$\text{Peso Arena} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Agregado} * \text{Ponderación Arena}$$

Tabla de Resultados:

**Tabla 3.38. Tabla de Contenido de Asfalto y Agregados de las mezclas en Caliente a 140°C y 160°C**

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA						
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de Agregado (%)	96,0%	95,5%	95,0%	94,5%	94,0%	93,5%

Peso del Cemento Asfáltico (gr)	48,00	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (gr)	345,60	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (gr)	230,40	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40
Peso de Arena (gr)	576,00	573,00	570,00	567,00	564,00	561,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2.2. PARA MEZCLAS EN FRÍO

Datos Básicos:

$$\text{Peso Briqueta} = 1200 \text{ gr}$$

$$\% \text{ Briqueta} = 100\%$$

$$\text{Residuo Destilación Emulsión} = 69.0\%_{\text{CRS-2H}} \text{ ó } 70.9\%_{\text{RR-2C}}$$

$$\% \text{ Emulsión Residual} = 4.00\% ; 4.50\% ; 5.00\% ; 5.50\% ; 6.00\% ; 6.50\%$$

$$\text{Ponderación Grava} = 0.3$$

$$\text{Ponderación Gravilla} = 0.2$$

$$\text{Ponderación Arena} = 0.5$$

$$\% \text{ Agua Adicional} = 3\%$$

Cálculos:

$$\% \text{ Emulsión} = \% \text{ Emulsión Residual} * \frac{\% \text{ Briqueta}}{\text{Residuo Destilación Emulsión}}$$

$$\% \text{ Agregado} = \% \text{ Briqueta} - \% \text{ Emulsión}$$

$$\text{Peso Emulsión} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Emulsión}$$

$$\text{Peso Grava} = \text{Peso Briqueta} * \% \text{ Agregado} * \text{Ponderación Grava}$$

$$Peso_{Gravilla} = Peso_{Briqueta} * \%_{Agregado} * Ponderación_{Gravilla}$$

$$Peso_{Arena} = Peso_{Briqueta} * \%_{Agregado} * Ponderación_{Arena}$$

$$Peso_{Agua\ Adicional} = Peso_{Briqueta} * \%_{Agua\ Adicional}$$

Tabla de Resultados:

**Tabla 3.39. Tabla de Contenido de Asfalto y Agregados de la mezcla en Frío  
BETUMIX CRS-2H**

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de Emulsión (%)	5,8%	6,5%	7,2%	8,0%	8,7%	9,4%
Porcentaje de Agregado (%)	94,2%	93,5%	92,8%	92,0%	91,3%	90,6%
Peso de la Emulsión (gr)	69,57	78,26	86,96	95,65	104,35	113,04
Peso de Grava (gr)	339,13	336,52	333,91	331,30	328,70	326,09
Peso de Gravilla (gr)	226,09	224,35	222,61	220,87	219,13	217,39
Peso de Arena (gr)	565,22	560,87	556,52	552,17	547,83	543,48
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.40. Tabla de Contenido de Asfalto y Agregados de la mezcla en Frío  
EMULEX RR-2C**

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de Emulsión (%)	5,6%	6,3%	7,1%	7,8%	8,5%	9,2%
Porcentaje de Agregado (%)	94,4%	93,7%	92,9%	92,2%	91,5%	90,8%
Peso de la Emulsión (gr)	67,70	76,16	84,63	93,09	101,55	110,01

Peso de Grava (gr)	339,69	337,15	334,61	332,07	329,53	327,00
Peso de Gravilla (gr)	226,46	224,77	223,07	221,38	219,69	218,00
Peso de Arena (gr)	566,15	561,92	557,69	553,46	549,22	544,99
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.5.3. ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **3.5.3.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

Para este caso se trabajó con cemento asfáltico 85/100 y con los temperaturas de mezclado 140°C y 160°C

*Imagen 3.23. Mezclado constante hasta alcanzar la temperatura deseada*



*Fuente: Elaboración Propia*

Verter la mezcla en los moldes Marshall, en tres capas, las dos primeras con 25 varillas para el acomodo y la tercera con 75 golpes con el martillo; dar la vuelta de cara y aplicar otros 75 golpes.

*Imagen 3.24. Compactación de Briquetas en caliente con martillo Marshall*



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.25. Muestras de briquetas de mezclas en caliente***



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.5.3.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO**

Se trabajó con dos emulsiones BETUMIX CRS-2H y EMULEX RR-2C, en ambas preparaciones se adicionó el 3% de agua para cubrir la superficie de los agregados.

***Imagen 3.26. Armado de briquetas en frío***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.27. Compactación de Briquetas en frio con martillo Marshall***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.28. Muestras de briquetas de mezclas en frio***



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.5.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUENCIA MARSHALL**

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de tres alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

#### **3.5.4.1. DETERMINACIÓN DE LAS ALTURAS DE LAS BRIQUETAS**

Para determinar las alturas se hizo uso de un Vernier, como muestra la imagen.

*Imagen 3.29. Dedición de las alturas de las briquetas*



*Fuente: Elaboración Propia*

#### **3.5.4.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD**

*Imagen 3.30. Pesaje de cada briqueta en su estado seco al aire libre*



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.31. Briquetas en Baño María a 25°C por 5 min.***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.32. Determinación del peso sumergido en el agua***



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.5.4.3. DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y FLUENCIA**

***Imagen 3.33. Briquetas en baño María a 60°C por 25 min para cada una***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.34. Extracción de las briquetas del molde Marshall***



*Fuente: Elaboración Propia*

***Imagen 3.35. Lectura del dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo***



*Fuente: Elaboración Propia*

**Imagen 3.36. Briqueta ensayada (rota)**



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.6. CÁLCULOS PARCIALES DE LAS PROPIEDADES TÉCNICAS MARSHALL**

#### **3.6.1. CÁLCULO DE LA DENSIDAD Y % VACÍOS**

$$Densidad_{real} = \frac{P_{seco}}{P_{saturado\ sup.seca} - P_{sumergido}}$$

$$Densidad_{real_1} = \frac{1305.3 \text{ gr}}{1308.1 \text{ gr} - 762 \text{ gr}} = 2.39 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{real_2} = \frac{1281.1 \text{ gr}}{1283.6 \text{ gr} - 765 \text{ gr}} = 2.47 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{real_3} = \frac{1290.7 \text{ gr}}{1294.2 \text{ gr} - 760 \text{ gr}} = 2.42 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{real \text{ Prom}} = \frac{2.39 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} + 2.47 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} + 2.42 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}{3} = 2.43 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{real \text{ Prom}} = 2.43 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{teórica} = \frac{100}{\frac{\%ligante}{P.E.ligante} + \frac{\%agregado}{P.E.agregado}}$$

$$Densidad_{teórica} = \frac{100}{\frac{4\%}{1.008 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} + \frac{96\%}{2.87 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}} = 2.67 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Densidad_{teórica} = 2.67 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Vacíos_{mezcla} = \frac{Densidad_{teórica} - Densidad_{real \text{ Prom}}}{Densidad_{teórica}} * 100$$

$$Vacíos_{mezcla} = \frac{2.67 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} - 2.43 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}{2.67 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} * 100 = 9.28 \%$$

$$Vacíos_{mezcla} = 9.28 \%$$

$$V.A.M. = Vacíos_{mezcla} + \frac{\%ligante * Densidad_{real Prom}}{P.E.ligante}$$

$$V.A.M. = 9.28\% + \frac{4\% * 2.43 \frac{gr}{cm^3}}{1.008 \frac{gr}{cm^3}} = 18.90 \%$$

$$V.A.M. = 18.90 \%$$

$$R.B.V. = \frac{V.A.M. - Vacíos_{mezcla}}{V.A.M.}$$

$$R.B.V. = \frac{18.90\% - 9.28\%}{18.90\%} * 100 = 50.92 \%$$

$$R.B.V. = 50.92 \%$$

### 3.6.2. CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD

$$Estabilidad = Carga_{anillo} * Factor_{corrección altura}$$

$$Carga_{anillo} MARSHALL = (0.012 * Lectura_{Dial Estabilidad} - 0.0812) * 102 * 202$$

$$Factor_{corrección altura} = según tabla:$$

Altura aproximada de la muestra cm	Factor de corrección	Altura aproximada de la muestra cm	Factor de corrección
2.54	5.56	5.08	1.47
2.70	5.00	5.24	1.39
2.86	4.55	5.40	1.32
3.02	4.17	5.56	1.25
3.18	3.85	5.72	1.19
3.34	3.57	5.87	1.14
3.49	3.33	6.03	1.09
3.65	3.03	6.19	1.04
3.81	2.78	6.35	1.00
3.97	2.50	6.51	0.96
4.13	2.27	6.67	0.93
4.29	2.08	6.83	0.89
4.45	1.92	6.99	0.86
4.61	1.79	7.14	0.83
4.76	1.67	7.30	0.81
4.92	1.56	7.46	0.78
5.08	1.47	7.62	0.76

$$Lectura_{dial\ Estabilidad_1} = 568\ mm$$

$$Carga_{anillo\ MARSHALL_1} = (0.012 * 568 - 0.0812) * 102 * 2.2 = 1511.289\ libras$$

$$Factor_{corrección\ altura_1} = 0.825$$

$$Estabilidad_1 = 1511.289\ libras * 0.825 = 1246.8135\ libras$$

$$Lectura_{dial\ Estabilidad_2} = 582\ mm$$

$$Carga_{anillo\ MARSHALL_2} = (0.012 * 582 - 0.0812) * 102 * 2.2 = 1548.988\ libras$$

$$Factor_{corrección\ altura_2} = 0.838$$

$$Estabilidad_2 = 1548.988\ libras * 0.838 = 1297.4326\ libras$$

$$Lectura_{dial\ Estabilidad_3} = 540\ mm$$

$$Carga_{anillo\ MARSHALL_3} = (0.012 * 540 - 0.0812) * 102 * 2.2 = 1435.891\ libras$$

$$Factor_{corrección\ altura_3} = 0.830$$

$$Estabilidad_3 = 1435.891\ libras * 0.830 = 1191.7893\ libras$$

$$Estabilidad_{promedio} = \frac{1246.8135\ lb + 1297.4326\ lb + 1191.7893\ lb}{3}$$

$$Estabilidad_{promedio} = 1245.35\ libras$$

### 3.6.3. CÁLCULO DE LA FLUENCIA

$$Fluencia = \frac{Lectura_{dial\ Fluencia} * 0.01}{25.4}$$

$$\text{Lectura}_{\text{dial Fluencia}_1} = 150$$

$$\text{Fluencia}_1 = \frac{150 * 0.01}{25.4}$$

$$\boxed{\text{Fluencia}_1 = 0.059 \text{ pulg}}$$

$$\text{Lectura}_{\text{dial Fluencia}_2} = 170$$

$$\text{Fluencia}_2 = \frac{170 * 0.01}{25.4}$$

$$\boxed{\text{Fluencia}_2 = 0.067 \text{ pulg}}$$

$$\text{Lectura}_{\text{dial Fluencia}_3} = 170$$

$$\text{Fluencia}_3 = \frac{170 * 0.01}{25.4}$$

$$\boxed{\text{Fluencia}_3 = 0.067 \text{ pulg}}$$

$$\text{Fluencia}_{\text{promedio}} = \frac{0.059 \text{ pulg} + 0.067 \text{ pulg} + 0.067 \text{ pulg}}{3} = 0.0643 \text{ pulg}$$

$$\boxed{\text{Fluencia}_{\text{promedio}} = 0.0643 \text{ pulg}}$$

### 3.7. RESULTADOS DE LAS MEZCLAS EN CALIENTE

#### 3.7.1. RESULTADOS DE LA MEZCLA EN CALIENTE A 140°C

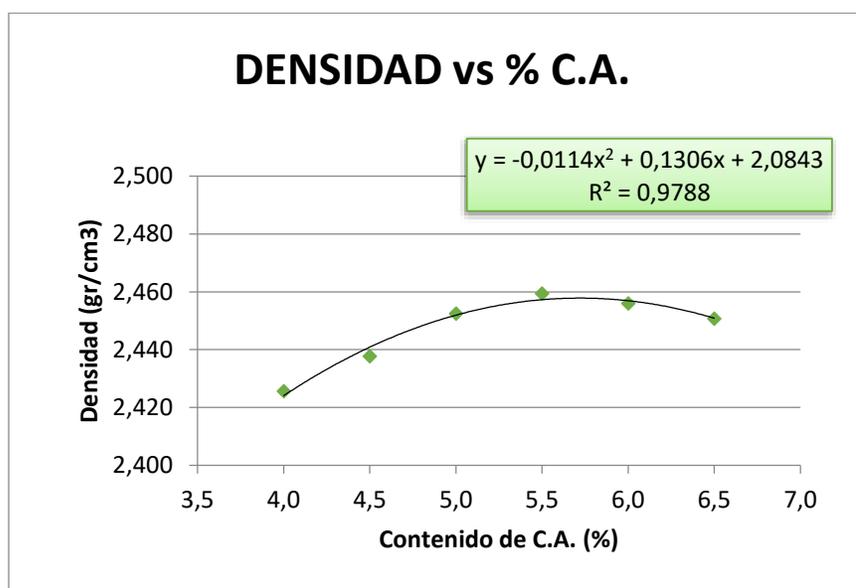
*Tabla 3.41. Tabla de resultados del ensayo Marshall para mezclas a 140 °C*

CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
--------------------------------	---	---------------------	-----------------	---------------------------------	------------------------------------	---

<b>4,0</b>	2,426	1245,35	6,43	9,28	50,92	18,90
<b>4,5</b>	2,438	1666,90	6,76	8,04	57,52	18,92
<b>5,0</b>	2,452	2022,11	7,41	6,69	64,52	18,85
<b>5,5</b>	2,459	2156,45	8,20	5,64	70,42	19,06
<b>6,0</b>	2,456	1964,36	8,79	4,97	74,61	19,59
<b>6,5</b>	2,451	1523,76	9,65	4,39	78,26	20,19

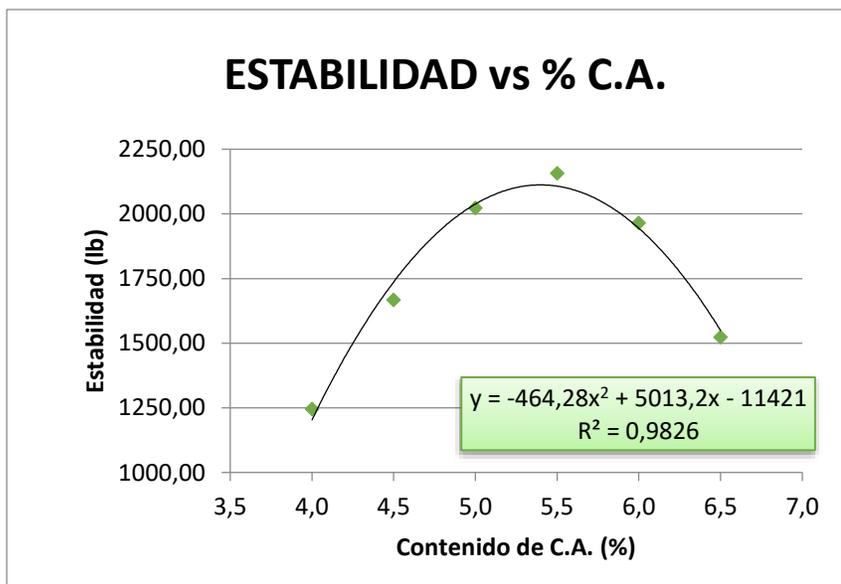
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.5. Curva Densidad vs. % C.A. a 140°C**



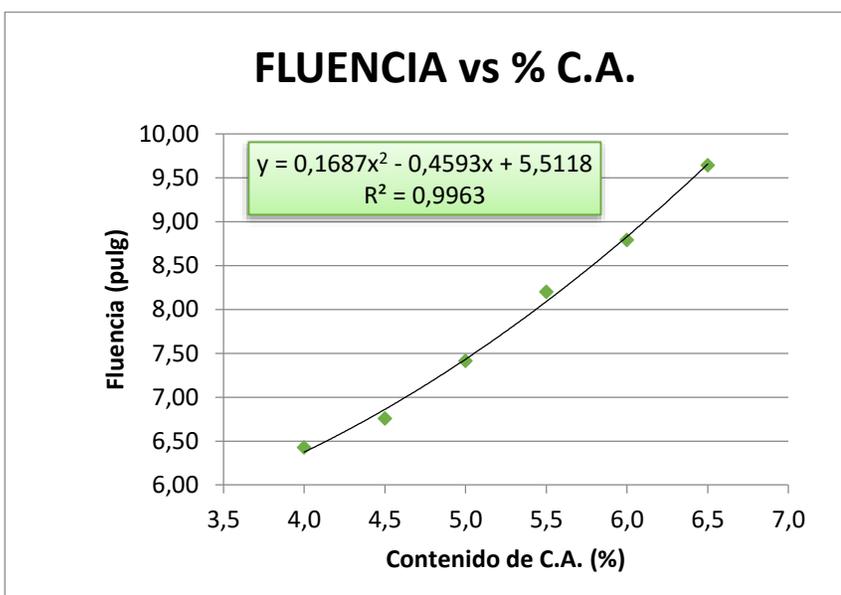
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.6. Curva Estabilidad vs. % C.A. a 140°C**



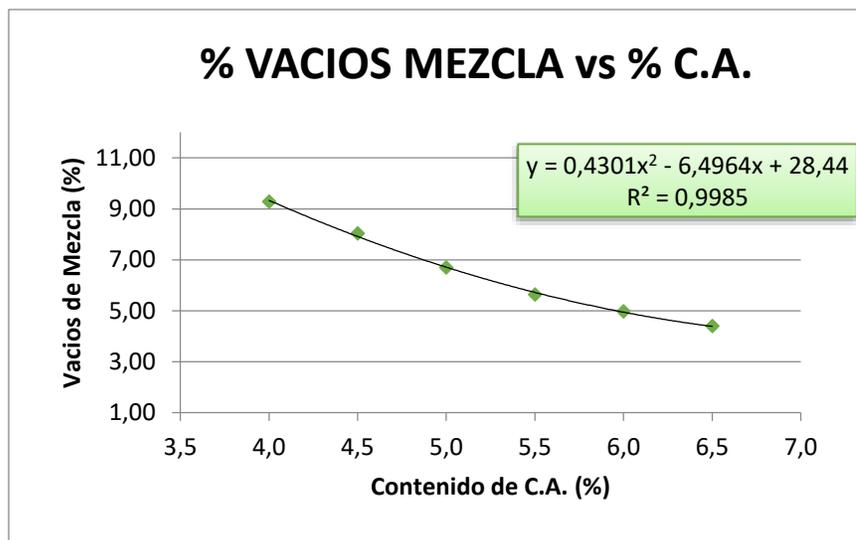
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.7. Curva Flujo vs. % C.A. a 140°C**



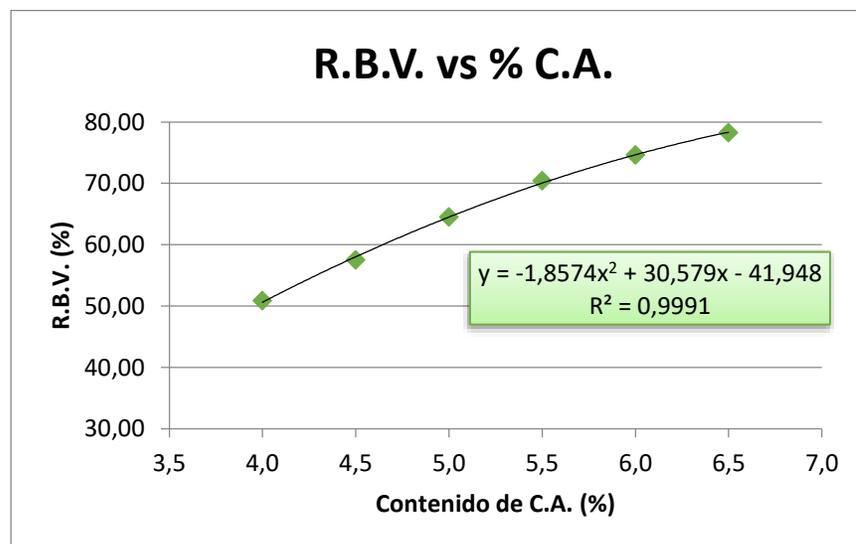
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.8. Curva % Vacíos vs. % C.A. a 140°C**



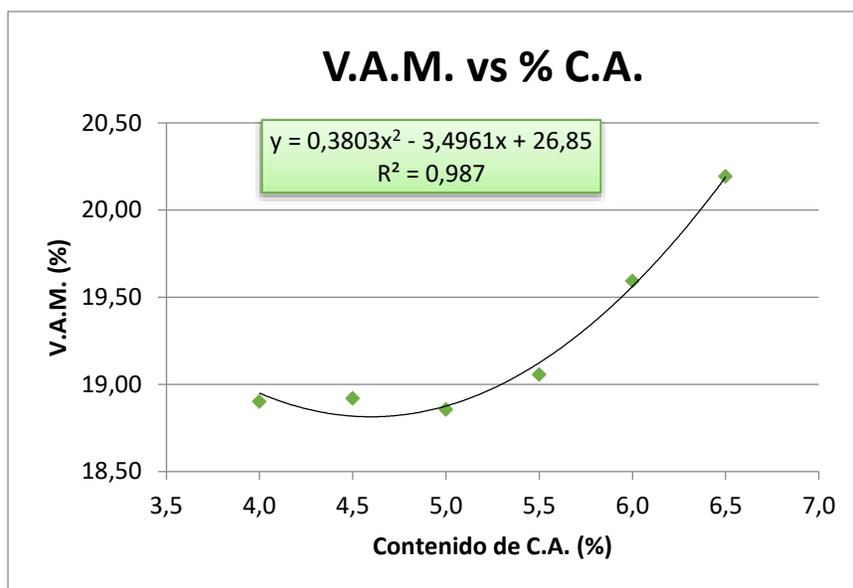
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.9. Curva Relación Betún - Vacíos vs. % C.A. a 140°C**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.10. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % C.A. a 140°C**



Fuente: Elaboración Propia

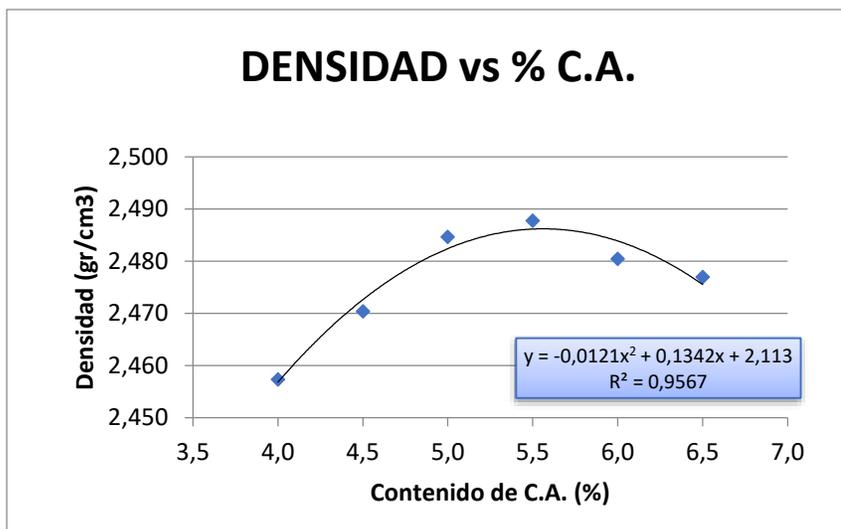
### 3.7.2. RESULTADOS DE LA MEZCLA EN CALIENTE A 160°C

*Tabla 3.42. Tabla de resultados del ensayo Marshall para mezclas a 160 °C*

CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,0	2,457	1265,38	5,25	8,09	54,67	17,84
4,5	2,470	1606,31	5,58	6,80	61,85	17,83
5,0	2,485	1905,53	6,17	5,47	69,28	17,79
5,5	2,488	2131,16	6,82	4,55	74,91	18,12
6,0	2,480	1931,72	7,94	4,03	78,56	18,79
6,5	2,477	1531,77	8,92	3,37	82,59	19,34

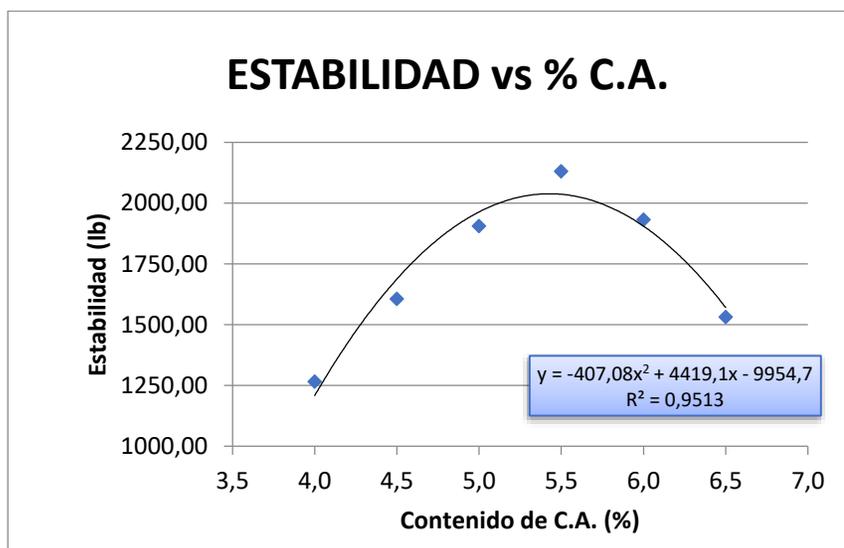
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.11. Curva Densidad vs. % C.A. a 160°C**



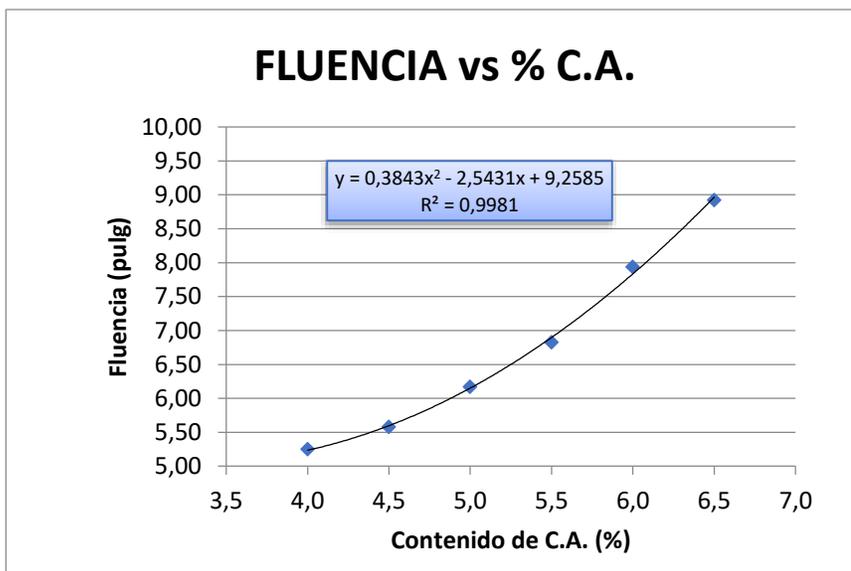
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.12. Curva Estabilidad vs. % C.A. a 160°C**



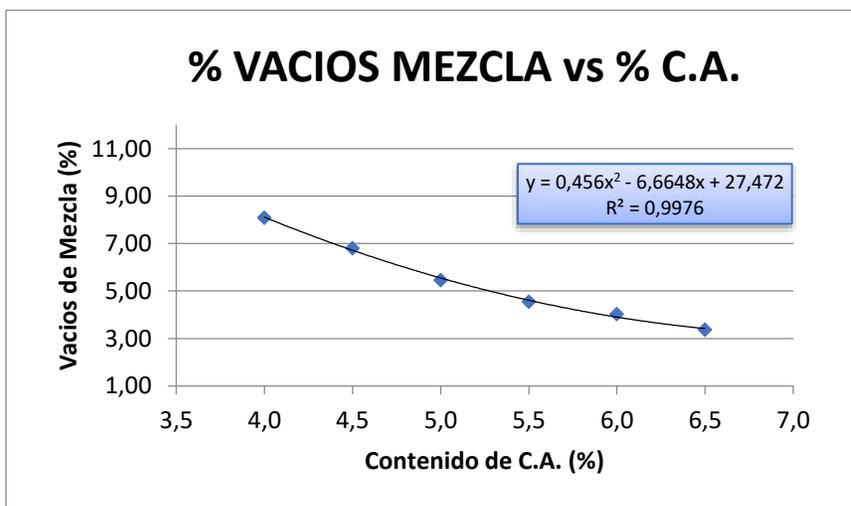
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.13. Curva Flujo vs. % C.A. a 160°C**



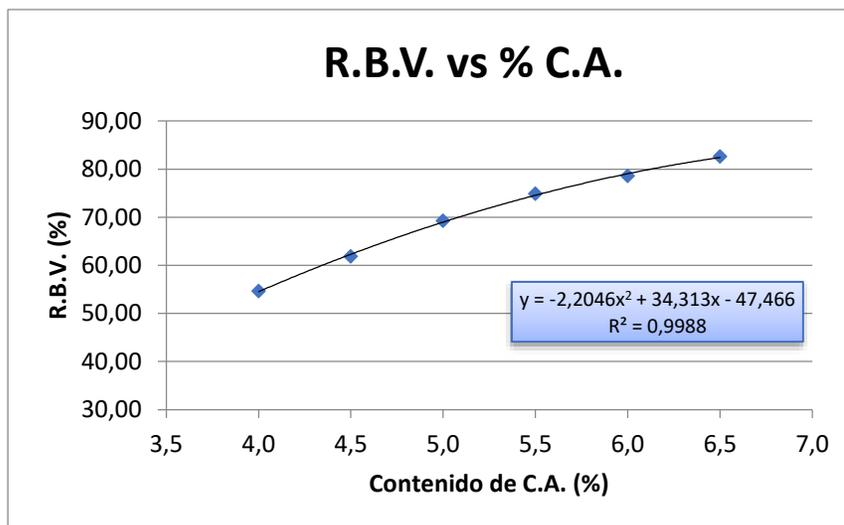
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.14. Curva % Vacíos vs. % C.A. a 160°C

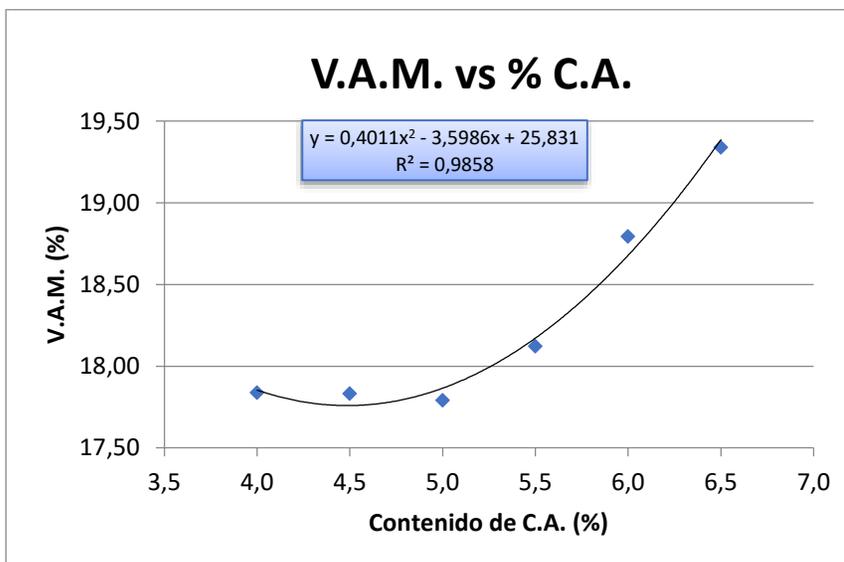


Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.15. Curva Relación Betún - Vacíos vs. % C.A. a 160°C



**Gráfico 3.16. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % C.A. a 160°C**



### 3.8. RESULTADOS DE LA MEZCLA EN FRÍO

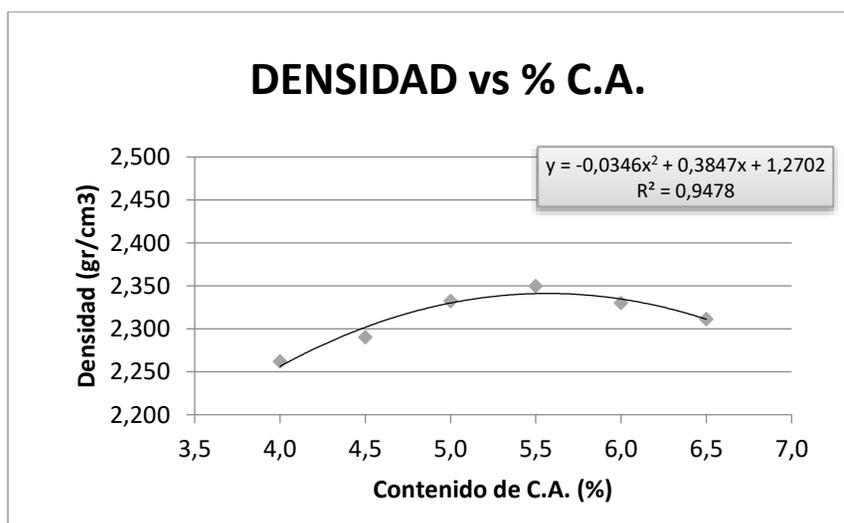
### 3.8.1. MEZCLAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRS-2H

**Tabla 3.43. Tabla de resultados del ensayo Marshall para mezclas CRS-2H**

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA RESIDUAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,0	2,262	1118,09	8,14	15,36	37,00	24,38
4,5	2,290	1226,79	8,46	13,55	43,13	23,83
5,0	2,332	1391,14	8,96	11,21	50,92	22,83
5,5	2,350	1463,45	9,91	9,78	56,86	22,66
6,0	2,330	1380,10	10,89	9,79	58,75	23,72
6,5	2,311	1277,05	11,48	9,76	60,55	24,74

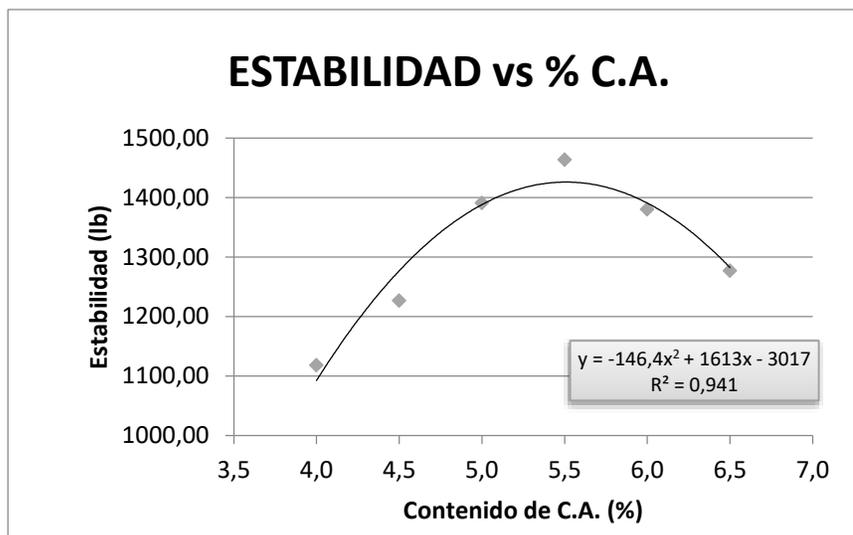
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.17. Curva Densidad vs. % Emulsión CRS-2H**



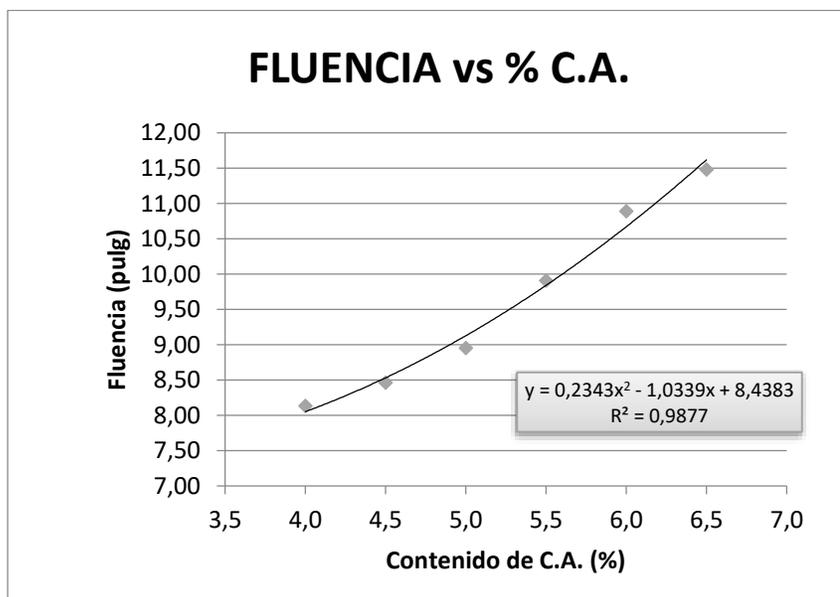
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.18. Curva Estabilidad vs. % Emulsión CRS-2H**



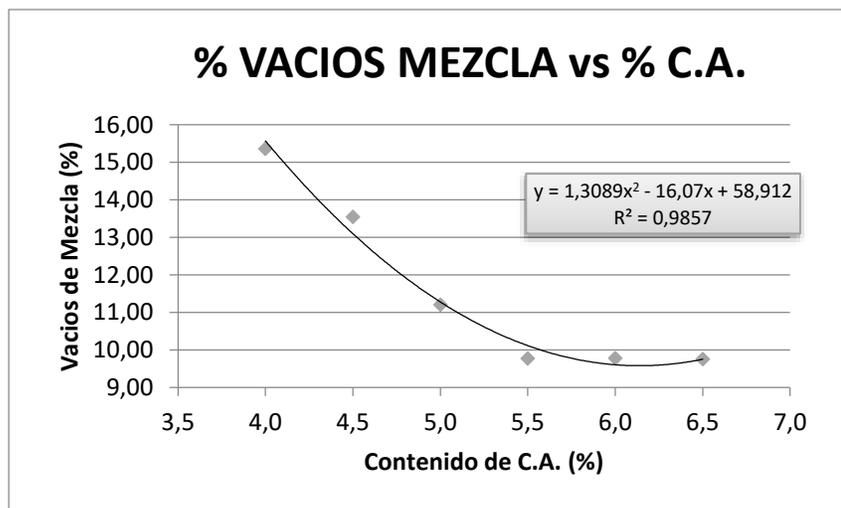
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.19. Curva Flujo vs. % Emulsión CRS-2H**

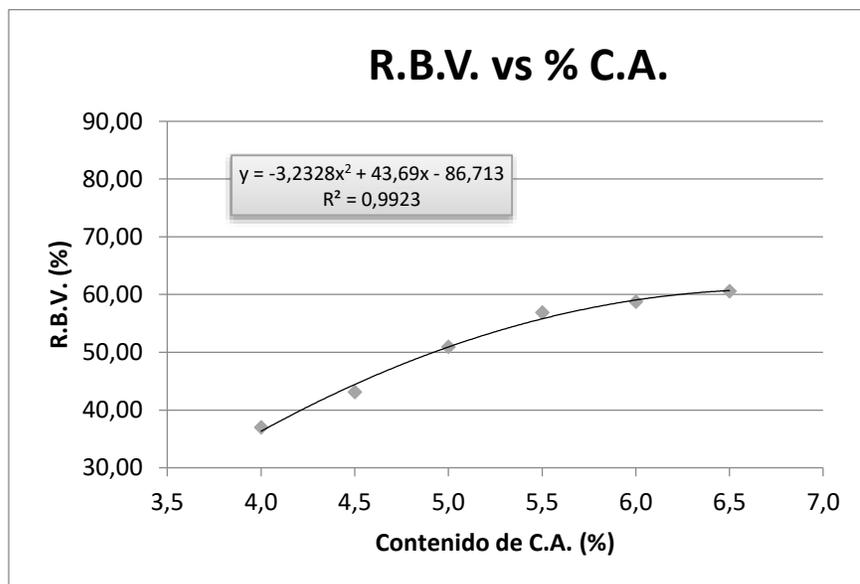


Fuente: Elaboración Propia

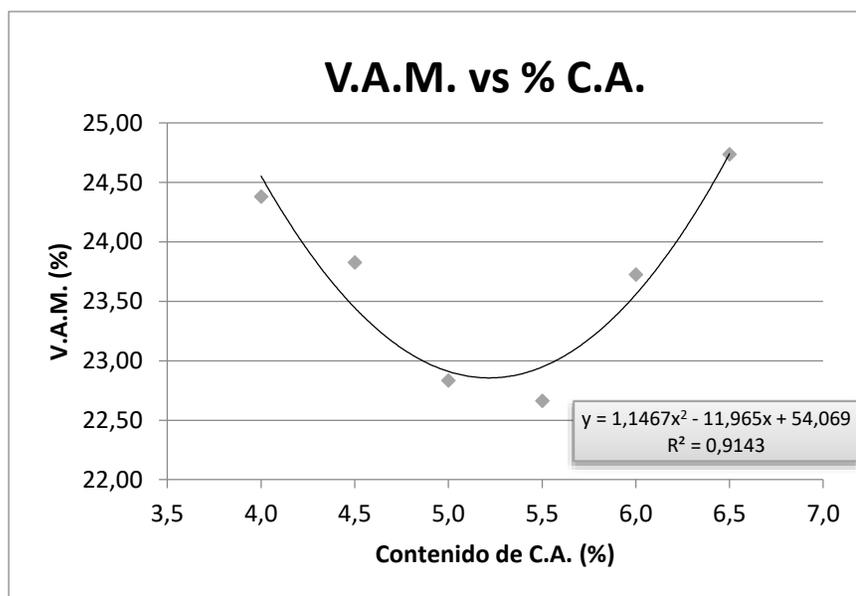
**Gráfico 3.20. Curva % Vacíos vs. % Emulsión CRS-2H**



**Gráfico 3.21. Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Emulsión CRS-2H**



**Gráfico 3.22. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión CRS-2H**



Fuente: Elaboración Propia

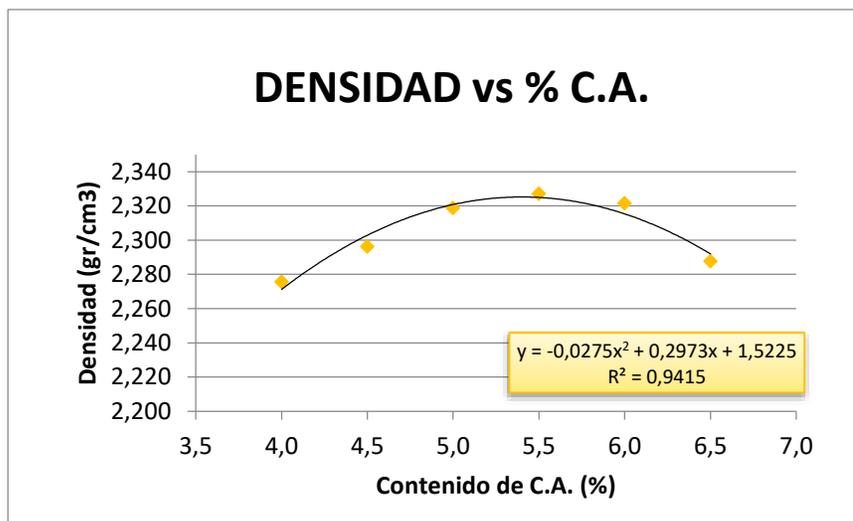
### 3.8.2. MEZCLAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA RR-2C

**Tabla 3.44. Tabla de resultados del ensayo Marshall para mezclas RR-2C**

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA RESIDUAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,0	2,276	1852,09	8,27	14,82	38,02	23,92
4,5	2,296	2059,98	8,40	13,30	43,70	23,62
5,0	2,319	2304,43	8,66	11,70	49,75	23,28
5,5	2,327	2340,47	10,04	10,62	54,63	23,41
6,0	2,322	2249,58	10,96	10,08	58,00	23,99
6,5	2,288	1933,61	11,75	10,65	58,25	25,50

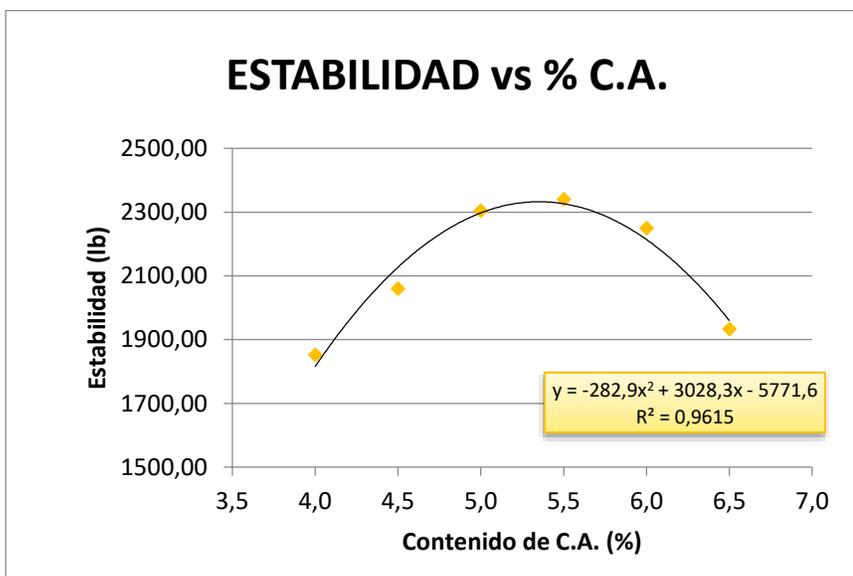
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.23. Curva Densidad vs. % Emulsión RR-2C**



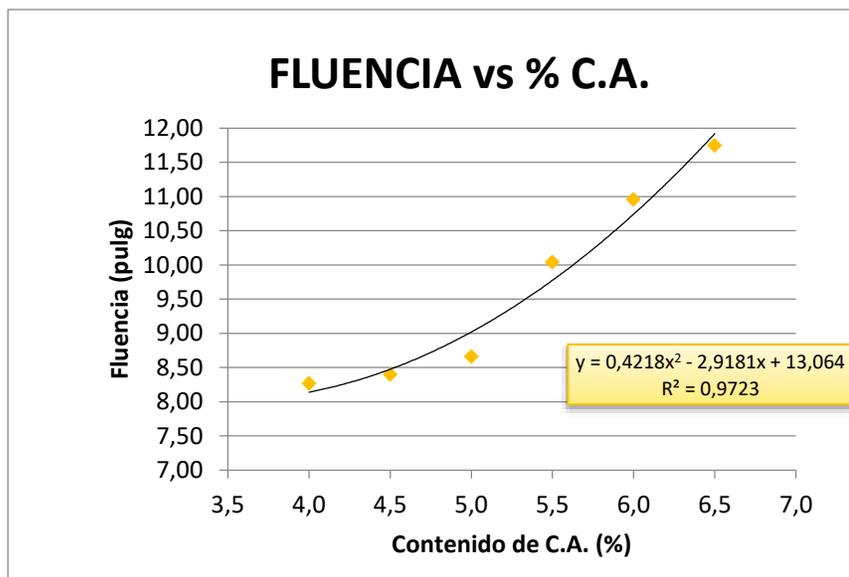
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.24. Curva Estabilidad vs. % Emulsión RR-2C**



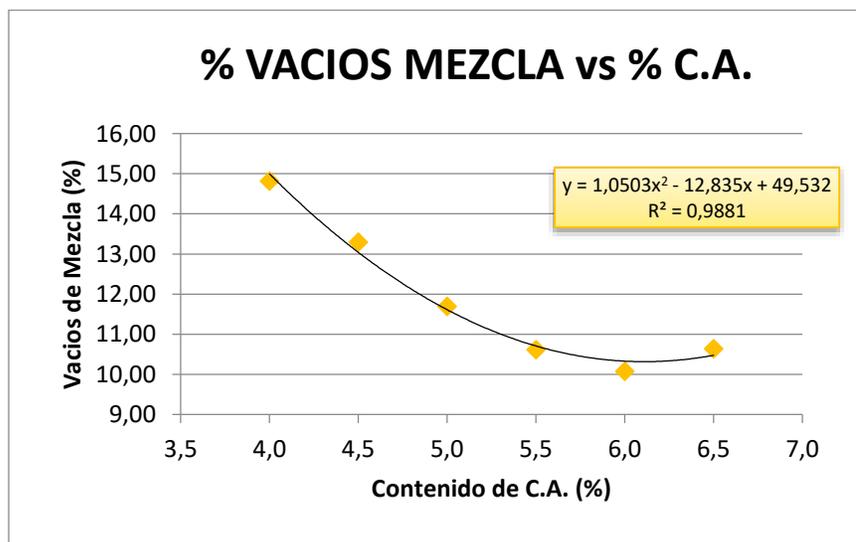
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.25. Curva Flujo vs. % Emulsión RR-2C**



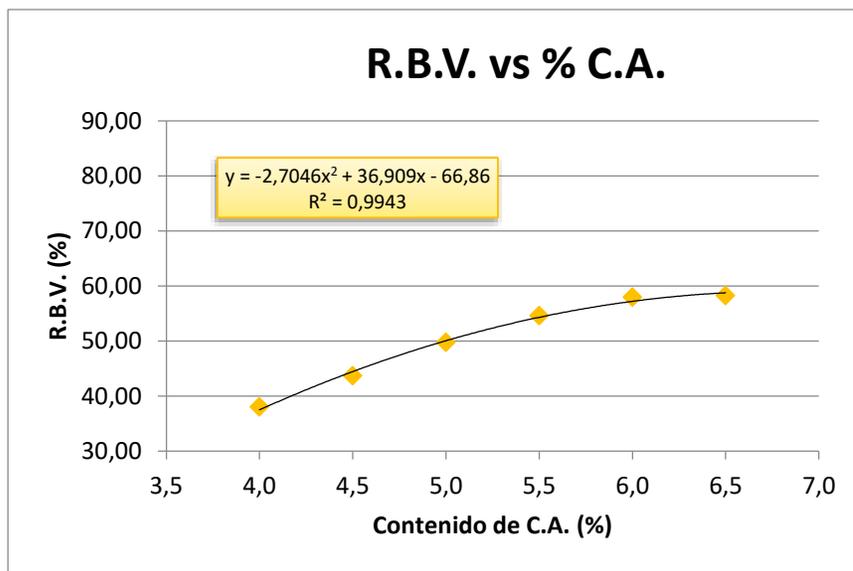
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.26. Curva % Vacíos vs. % Emulsión RR-2C



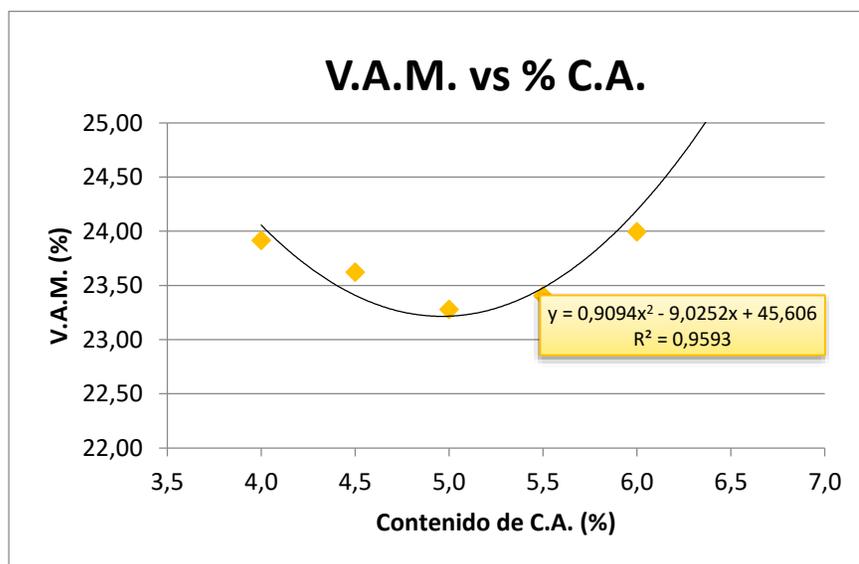
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.27. Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Emulsión RR-2C



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3.28. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión RR-2C**



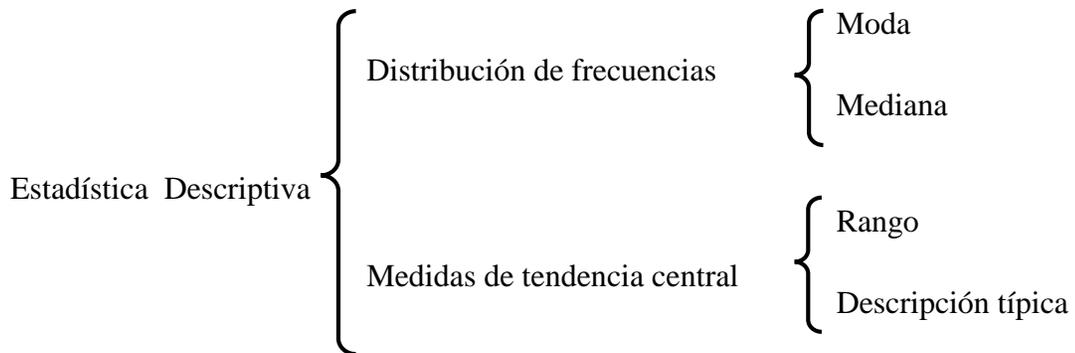
Fuente: Elaboración Propia

### 3.9. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

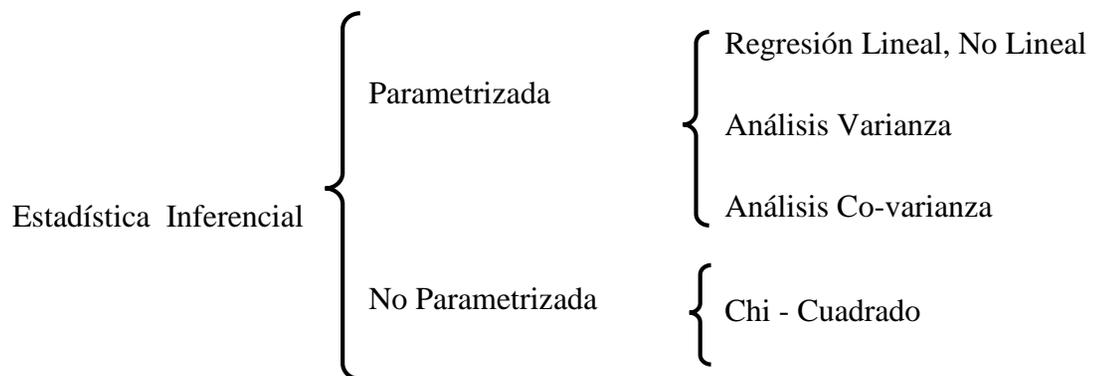
#### Estadística Descriptiva e Inferencial

Se puede dividir la estadística en dos grandes ramas: la estadística Descriptiva y la estadística Inferencial.

**Estadística Descriptiva:** Son procedimientos empleados para organizar y resumir conjuntos de observaciones en forma cuantitativa. El resumen de ellos puede hacerse mediante tablas, gráficos o valores numéricos. Los conjuntos de datos que contienen observaciones de más de una variable permiten estudiar la relación o asociación que existe entre ellas.



**Estadística Inferencial:** Son métodos empleados para inferir algo acerca de una población basándose en los datos obtenidos a partir de una muestra. Los datos estadísticos son cálculos aritméticos realizados sobre los valores obtenidos en una porción de la población, seleccionada según criterios rigurosos.



### 3.9.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

#### 3.9.1.1. LA MEDIA

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i}{N}$$

Donde:

$\bar{X}$  = media

$x_i$  = marca de clase

$f_i$  = frecuencia absoluta

N = tamaño de la muestra

#### 3.9.1.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2 f_i}{N - 1}}$$

Donde:

S = desviación estándar

$x_i$  = marca de clase

$\bar{X}$  = media

$f_i$  = frecuencia absoluta

N = tamaño de la muestra

### 3.9.2. ESTADÍSTICA INFERENCIAL

#### 3.9.2.1. PRUEBA DE CHI CUADRADO

La prueba de chi-cuadrado se basa en el cálculo de frecuencias, tanto de valores observados, como valores esperados, para un número determinado de intervalos. Esta prueba es comúnmente usada para justificar la bondad de ajustes de la distribución empírica a una distribución teórica conocida.

La expresión general de la prueba Chi-cuadrado está dada por:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i} \quad \dots (1.1)$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^k \theta_i = \sum_{i=1}^k e_i = N$$

$x_c^2$  = valor calculado de Chi – cuadrado, a partir de los datos.

$\theta_i$  = número de valores observados en el intervalo de clase i.

$e_i$  = número de valores esperados en el intervalo de clase i.

k = número de intervalos de clase.

Asignando probabilidades a la ecuación (1.1), es decir, asignando igual probabilidad de ocurrencia a cada intervalo de clase, se tiene:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - NP_i)^2}{NP_i} \quad \dots (1.2)$$

Donde:

$N_i$  = número de observaciones que caen dentro de los límites de clases ajustadas del intervalo i.

N = tamaño muestral.

$P_i$  = probabilidad igual para todos los intervalos de clases.

$$P_i = \frac{1}{k} \quad \text{ó} \quad e_i = P_i * N \quad \dots (1.3)$$

Simplificando la ecuación (1.2), se obtiene la fórmula computacional desarrollada por Markovic:

$$x_c^2 = \frac{k}{N} \sum_{i=1}^k N_i^2 - N \quad \dots (1.4)$$

El valor de  $x_c^2$  obtenido por la ecuación (1.4) se compara con el  $x_t^2$  de tabla:

Nivel de significación:

$$\alpha = 0.05 \quad (\text{para probabilidad de 95\%})$$

$$\alpha = 0.01 \quad (\text{para probabilidad de 99\%})$$

Grados de libertad:

$$v = k-1-h$$

Donde:

“h” es el número de parámetros a estimarse, así:

h= 2, para la distribución normal

h= 3, para la distribución log-normal de 3 parámetros

### **Criterios de decisión:**

El criterio de decisión se fundamenta en la comparación del valor calculado de Chi-cuadrado con el valor a tabular encontrado, esto es:

~ Si el Chi-cuadrado calculado es menor o igual que el valor tabular, es decir:

$$x_c^2 \leq x_t^2$$

Entonces, se acepta la hipótesis que el ajuste es bueno al nivel de significación seleccionado.

~ Si el Chi-cuadrado calculado es mayor que el valor tabular, es decir:

$$x_c^2 > x_t^2$$

Entonces, el ajuste es malo y se rechaza la hipótesis, siendo necesario probar con otra distribución teórica.

### 3.9.2.2. HIPÓTESIS PLANTEADA:

*“Que probabilidad existe de que los resultados obtenidos cumplen con las especificaciones”.*

Hipótesis N° 1:

$$1.a) \quad x_c^2 \text{ a } 140^\circ\text{C} \leq x_t^2 \text{ a } 140^\circ\text{C}$$

$$1.b) \quad x_c^2 \text{ a } 140^\circ\text{C} > x_t^2 \text{ a } 140^\circ\text{C}$$

Hipótesis N° 2:

$$2.a) \quad x_c^2 \text{ a } 160^\circ\text{C} \leq x_t^2 \text{ a } 160^\circ\text{C}$$

$$2.b) \quad x_c^2 \text{ a } 160^\circ\text{C} > x_t^2 \text{ a } 160^\circ\text{C}$$

Hipótesis N° 3:

$$3.a) \quad x_c^2 \text{ CRS-2H} \leq x_t^2 \text{ CRS-2H}$$

$$3.b) \quad x_c^2 \text{ CRS-2H} > x_t^2 \text{ CRS-2H}$$

Hipótesis N° 4:

$$4.a) \quad x_c^2 \text{ RR-2C} \leq x_t^2 \text{ RR-2C}$$

$$4.b) \quad x_c^2 \text{ RR-2C} > x_t^2 \text{ RR-2C}$$

Donde:

$x_c^2$  = Frecuencia Observada.

$x_t^2$  = Frecuencia Esperada.

### 3.9.2.3. APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO ESTADÍSTICO COMPLETO SEGÚN HIPÓTESIS

**HIPÓTESIS N° 1 → Mezcla en Caliente con Cemento Asfáltico a 140°C**

Datos:

*Tabla 3.45. Tabla de datos de Estabilidad Marshall de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 140°C*

N° de Ensayo	ESTABILIDAD (Libras)	ESTABILIDAD ordenada de menor a mayor (Libras)
1	1246,81	1191,79
2	1297,43	1246,81
3	1191,79	1297,43
4	1766,82	1391,52
5	1566,78	1557,06
6	1667,09	1566,78
7	1999,87	1622,72
8	2123,24	1667,09
9	1943,23	1766,82
10	2214,18	1812,08
11	2130,95	1943,23
12	2124,22	1966,66
13	1966,66	1999,87
14	2114,35	2114,35
15	1812,08	2123,24
16	1622,72	2124,22
17	1557,06	2130,95
18	1391,52	2214,18

*Fuente: Elaboración Propia*

*1. Cálculo del número de intervalos de clase:*

Según Yevjevich el número de intervalos de clase se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = 1 + 1.33 \ln (N)$$

$$k = 1 + 1.33 \ln (18) = 4.84$$

$$\boxed{k = 5}$$

2. *Cálculo de la Amplitud de cada intervalo:*

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{k - 1}$$

$$\boxed{\Delta X = 256}$$

$$\boxed{\frac{\Delta X}{2} = 128}$$

3. *Cálculo de los intervalos de clase, marcas de clase, frecuencia absoluta observada, frecuencia relativa, los frecuencia acumulada:*

**Tabla 3.46. Tabla de cálculo de intervalos de clase y frecuencias observadas de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 140°C**

Intervalo de clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta observada	Frecuencia Relativa observada	Frecuencia Acumulada observada
Min.	Max.	-	-	-	-
1063,79	1319,79	1191,79	3	0,1667	0,1667
1319,79	1575,79	1447,79	3	0,1667	0,3333
1575,79	1831,79	1703,79	6	0,3333	0,6667
1831,79	2087,79	1959,79	6	0,3333	1,0000

Fuente: Elaboración Propia

4. *Cálculo de la media y desviación estándar para datos agrupados, utilizando las marcas de clase y frecuencias absolutas:*

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2 f_i}{N - 1}}$$

Donde:

$x_i$  = marca de clase

$f_i$  = frecuencia absoluta

$$\bar{X} = 1661.12$$

$$S = 281.12$$

5. Cálculo de la frecuencia relativa y absoluta esperada, utilizando la distribución teórica normal:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

Donde:

$x$  = límite de clase

Luego entrando a tabla con  $Z$  y  $\alpha = 0.05$ , obtenemos el área bajo la curva.

**Tabla 3.47. Tabla de cálculo de frecuencias esperadas de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 140°C**

Límite de Clase	Z	Área bajo la curva normal de 0 a Z	Frecuencia Relativa esperada	Frecuencia Absoluta esperada	Frecuencia Absoluta esperada
				decimal	≈ ei
1063,79	-2,125	0,4845	-	-	-
1319,79	-1,214	0,4035	0,081	1,46	2
1575,79	-0,304	0,1484	0,2551	4,59	5
1831,79	0,607	0,2241	0,3725	6,71	7
2087,79	1,518	0,4412	0,2171	3,91	4

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro comparativo de Frecuencias Absolutas:

**Tabla 3.48. Tabla comparativa de frecuencias de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 140°C**

Frecuencia Absoluta esperada $e_i$	Frecuencia Absoluta observada $\theta_i$
2	3
5	3
7	6
4	6

6. Cálculo de  $x_c^2$ :

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

$\theta_i$  = frecuencia observada.

$e_i$  = frecuencia absoluta.

$$x_c^2 = 2.44$$

7. Cálculo de  $x_t^2$ :

Grados de libertad:  $\nu = k-1-h$

$$k = 4$$

$$h = 2$$

$$\nu = 4-1-2$$

$$\nu = 1$$

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

De tabla, para  $\nu = 1$  y  $\alpha = 0.05$ , se tiene:

$$\boxed{x_t^2 = 3.84}$$

8. *Criterio de decisión:*

Como:

$$\boxed{x_c^2 = 2.44 \leq x_t^2 = 3.84}$$

***Se acepta la hipótesis para 1.a) con un nivel de significación igual al 5% y un nivel de confianza igual al 95%.***

## HIPÓTESIS N° 2 → Mezcla en Caliente con Cemento Asfáltico a 160°C

Datos:

**Tabla 3.49. Tabla de datos de Estabilidad Marshall de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 160°C**

N° de Ensayo	ESTABILIDAD (Libras)	ESTABILIDAD ordenada de menor a mayor (Libras)
1	1300,46	1195,72
2	1195,72	1299,95
3	1299,95	1300,46
4	1600,43	1365,77
5	1651,70	1523,90
6	1566,78	1566,78
7	1821,77	1600,43
8	2070,61	1651,70
9	1824,22	1705,63
10	2193,61	1821,77
11	2073,68	1824,22
12	2126,19	1840,44
13	1931,35	1931,35
14	2023,37	2023,37
15	1840,44	2070,61
16	1705,63	2073,68
17	1523,90	2126,19
18	1365,77	2193,61

Fuente: Elaboración Propia

### 1. Cálculo del número de intervalos de clase:

Según Yevjevich el número de intervalos de clase se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = 1 + 1.33 \ln (N)$$

$$k = 1 + 1.33 \ln (18) = 4.84$$

$$k = 5$$

2. Cálculo de la Amplitud de cada intervalo:

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{k - 1}$$

$$\Delta X = 250$$

$$\frac{\Delta X}{2} = 125$$

3. Cálculo de los intervalos de clase, marcas de clase, frecuencia absoluta observada, frecuencia relativa, los frecuencia acumulada:

**Tabla 3.50. Tabla de cálculo de intervalos de clase y frecuencias observadas de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 160°C**

Intervalo de clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta observada	Frecuencia Relativa observada	Frecuencia Acumulada observada
Min.	Max.	-	-	-	-
1070,72	1320,72	1195,72	3	0,1667	0,1667
1320,72	1570,72	1445,72	3	0,1667	0,3333
1570,72	1820,72	1695,72	5	0,2778	0,6111
1820,72	2070,72	1945,72	7	0,3889	1,0000

Fuente: Elaboración Propia

4. Cálculo de la media y desviación estándar para datos agrupados, utilizando las marcas de clase y frecuencias absolutas:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2 f_i}{N - 1}}$$

Donde:

$x_i$  = marca de clase

$f_i$  = frecuencia absoluta

$$\bar{X} = 1667.94$$

$$S = 282.96$$

5. Cálculo de la frecuencia relativa y absoluta esperada, utilizando la distribución teórica normal:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

Donde:

$x$  = límite de clase

Luego entrando a tabla con  $Z$  y  $\alpha = 0.05$ , obtenemos el área bajo la curva.

**Tabla 3.51. Tabla de cálculo de frecuencias esperadas de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 160°C**

Límite de Clase	Z	Área bajo la curva normal de 0 a Z	Frecuencia Relativa esperada	Frecuencia Absoluta esperada	Frecuencia Absoluta esperada
				decimal	$\approx e_i$
1070,72	-2,111	0,4855	-	-	-
1320,72	-1,227	0,4085	0,077	1,39	2
1570,72	-0,344	0,1422	0,2663	4,79	5
1820,72	0,540	0,2286	0,3708	4,67	5
2070,72	1,423	0,4273	0,1987	5,36	6

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro comparativo de Frecuencias Absolutas:

**Tabla 3.52. Tabla comparativa de frecuencias de mezclas en caliente con cemento asfáltico a 160°C**

Frecuencia Absoluta calculada $e_i$	Frecuencia Absoluta observada $\theta_i$
2	3
5	3
5	5
6	7

Fuente: Elaboración Propia

6. Cálculo de  $x_c^2$ :

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

$\theta_i$  = frecuencia observada.

$e_i$  = frecuencia absoluta.

$$x_c^2 = 1.47$$

7. Cálculo de  $x_t^2$ :

Grados de libertad:  $\nu = k-1-h$

$$k = 4$$

$$h = 2$$

$$\nu = 4 - 1 - 2$$

$$\nu = 1$$

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

De tabla, para  $\nu = 1$  y  $\alpha = 0.05$ , se tiene:

$$\boxed{\chi_t^2 = 3.84}$$

8. *Criterio de decisión:*

Como:

$$\boxed{\chi_c^2 = 1.47 \leq \chi_t^2 = 3.84}$$

***Se acepta la hipótesis para 2.a) con un nivel de significación igual al 5% y un nivel de confianza igual al 95%.***

### HIPÓTESIS N° 3 → Mezcla en Frío con Emulsión Asfáltica CRS-2H

Datos:

**Tabla 3.53. Tabla de datos de Estabilidad Marshall de mezclas en frío con emulsión asfáltica CRS-2H**

N° de Ensayo	ESTABILIDAD (Libras)	ESTABILIDAD ordenada de menor a mayor (Libras)
1	1047,20	-
2	1130,40	1047,20
3	1176,67	1130,40
4	1258,61	1153,84
5	1267,93	1176,67
6	1153,84	1246,45
7	1365,39	1258,61
8	1416,89	1267,93
9	-	1280,51
10	1395,15	1304,20
11	1404,86	1346,78
12	1590,34	1365,39
13	1420,41	1373,10
14	1373,10	1395,15
15	1346,78	1404,86
16	1304,20	1416,89
17	1246,45	1420,41
18	1280,51	1590,34

Fuente: Elaboración Propia

1. Cálculo del número de intervalos de clase:

Según Yevjevich el número de intervalos de clase se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = 1 + 1.33 \ln (N)$$

$$k = 1 + 1.33 \ln (17) = 4.77$$

$$\boxed{k = 5}$$

2. Cálculo de la Amplitud de cada intervalo:

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{k - 1}$$

$$\boxed{\Delta X = 136}$$

$$\boxed{\frac{\Delta X}{2} = 68}$$

3. Cálculo de los intervalos de clase, marcas de clase, frecuencia absoluta observada, frecuencia relativa, los frecuencia acumulada:

**Tabla 3.54. Tabla de cálculo de intervalos de clase y frecuencias observadas de mezclas en frío con emulsión asfáltica CRS-2H**

Intervalo de clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta observada	Frecuencia Relativa observada	Frecuencia Acumulada observada
Min.	Max.	-	-	-	-
979,20	1115,20	1047,20	1	0,0588	0,0588
1115,20	1251,20	1183,20	3	0,1765	0,2353
1251,20	1387,20	1319,20	8	0,4706	0,7059
1387,20	1523,20	1455,20	5	0,2941	1,0000

Fuente: Elaboración Propia

4. Cálculo de la media y desviación estándar para datos agrupados, utilizando las marcas de clase y frecuencias absolutas:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2 f_i}{N - 1}}$$

Donde:

$x_i$  = marca de clase

$f_i$  = frecuencia absoluta

$$\bar{X} = 1319.20$$

$$S = 117.78$$

5. Cálculo de la frecuencia relativa y absoluta esperada, utilizando la distribución teórica normal:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

Donde:

$x$  = límite de clase

Luego entrando a tabla con  $Z$  y  $\alpha = 0.05$ , obtenemos el área bajo la curva.

**Tabla 3.55. Tabla de cálculo de frecuencias esperadas de mezclas en frío con emulsión asfáltica CRS-2H**

Límite de Clase	Z	Área bajo la curva normal de 0 a Z	Frecuencia Relativa esperada	Frecuencia Absoluta esperada	Frecuencia Absoluta esperada
				decimal	$\approx e_i$
979,20	-2,887	0,4982	-	-	-
1115,20	-1,732	0,4611	0,0371	0,63	1
1251,20	-0,577	0,2353	0,2258	3,84	4
1387,20	0,577	0,2353	0,4706	8,00	8
1523,20	1,732	0,4611	0,2258	3,84	4

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro comparativo de Frecuencias Absolutas:

**Tabla 3.56. Tabla comparativa de frecuencias de mezclas en frío con emulsión asfáltica CRS-2H**

Frecuencia Absoluta calculada $e_i$	Frecuencia Absoluta observada $\theta_i$
1	1
4	3
8	8
4	5

Fuente: Elaboración Propia

6. Cálculo de  $x_c^2$ :

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

$\theta_i$  = frecuencia observada.

$e_i$  = frecuencia absoluta.

$$x_c^2 = 0.50$$

7. Cálculo de  $x_t^2$ :

Grados de libertad:  $\nu = k-1-h$

$$k = 4$$

$$h = 2$$

$$\nu = 4-1-2$$

$$\nu = 1$$

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

De tabla, para  $\nu = 1$  y  $\alpha = 0.05$ , se tiene:

$$\boxed{x_t^2 = 3.84}$$

8. *Criterio de decisión:*

Como:

$$\boxed{x_c^2 = 0.50 \leq x_t^2 = 3.84}$$

***Se acepta la hipótesis para 3.a) con un nivel de significación igual al 5% y un nivel de confianza igual al 95%.***

### HIPÓTESIS N° 4 → Mezcla en Frío con Emulsión Asfáltica RR-2C

Datos:

**Tabla 3.57. Tabla de datos de Estabilidad Marshall de mezclas en frío con emulsión asfáltica RR-2C**

N° de Ensayo	ESTABILIDAD (Libras)	ESTABILIDAD ordenada de menor a mayor (Libras)
1	1808,75	1808,75
2	1911,62	1835,91
3	1835,91	1878,96
4	1976,33	1898,98
5	2063,93	1911,62
6	2139,67	1976,33
7	2195,70	2022,88
8	2478,82	2063,93
9	2238,76	2139,67
10	2274,43	2195,70
11	2462,32	2214,93
12	2284,67	2238,76
13	2257,39	2257,39
14	2214,93	2274,43
15	2276,41	2276,41
16	2022,88	2284,67
17	1898,98	2462,32
18	1878,96	2478,82

Fuente: Elaboración Propia

#### 1. Cálculo del número de intervalos de clase:

Según Yevjevich el número de intervalos de clase se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = 1 + 1.33 \ln (N)$$

$$k = 1 + 1.33 \ln (18) = 4.84$$

$$\boxed{k = 5}$$

2. *Cálculo de la Amplitud de cada intervalo:*

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{k - 1}$$

$$\Delta X = 168$$

$$\frac{\Delta X}{2} = 84$$

3. *Cálculo de los intervalos de clase, marcas de clase, frecuencia absoluta observada, frecuencia relativa, los frecuencia acumulada:*

**Tabla 3.58. Tabla de cálculo de intervalos de clase y frecuencias observadas de mezclas en frío con emulsión asfáltica RR-2C**

Intervalo de clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta observada	Frecuencia Relativa observada	Frecuencia Acumulada observada
Min.	Max.	-	-	-	-
1724,75	1892,75	1808,75	3	0,1667	0,1667
1892,75	2060,75	1976,75	4	0,2222	0,3889
2060,75	2228,75	2144,75	4	0,2222	0,6111
2228,75	2396,75	2312,75	7	0,3889	1,0000

*Fuente: Elaboración Propia*

4. *Cálculo de la media y desviación estándar para datos agrupados, utilizando las marcas de clase y frecuencias absolutas:*

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2 f_i}{N - 1}}$$

Donde:

$x_i$  = marca de clase

$f_i$  = frecuencia absoluta

$$\bar{X} = 2123.76$$

$$S = 197.40$$

5. Cálculo de la frecuencia relativa y absoluta esperada, utilizando la distribución teórica normal:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

Donde:

$x$  = límite de clase

Luego entrando a tabla con  $Z$  y  $\alpha = 0.05$ , obtenemos el área bajo la curva.

**Tabla 3.59. Tabla de cálculo de frecuencias esperadas de mezclas en frío con emulsión asfáltica RR-2C**

Límite de Clase	Z	Área bajo la curva normal de 0 a Z	Frecuencia Relativa esperada	Frecuencia Absoluta esperada	Frecuencia Absoluta esperada
				decimal	$\approx e_i$
1724,75	-2,028	0,4816	-	-	-
1892,75	-1,159	0,3885	0,0931	1,68	2
2060,75	-0,290	0,1304	0,2581	4,65	5
2228,75	0,579	0,2407	0,3711	4,68	5
2396,75	1,449	0,4343	0,1936	5,23	6

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro comparativo de Frecuencias Absolutas:

**Tabla 3.60. Tabla comparativa de frecuencias de mezclas en frío con emulsión asfáltica RR-2C**

Frecuencia Absoluta esperada $e_i$	Frecuencia Absoluta observada $\theta_i$
2	3
5	4
5	4
6	7

Fuente: Elaboración Propia

6. Cálculo de  $x_c^2$ :

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

$\theta_i$  = frecuencia observada.

$e_i$  = frecuencia absoluta.

$$x_c^2 = 1.07$$

7. Cálculo de  $x_t^2$ :

Grados de libertad:  $\nu = k-1-h$

$$k = 4$$

$$h = 2$$

$$\nu = 4-1-2$$

$$\nu = 1$$

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

De tabla, para  $\nu = 1$  y  $\alpha = 0.05$ , se tiene:

$$\bar{x}_t^2 = 3.84$$

8. *Criterio de decisión:*

Como:

$$x_c^2 = 1.07 \leq x_t^2 = 3.84$$

***Se acepta la hipótesis para 4.a) con un nivel de significación igual al 5% y un nivel de confianza igual al 95%.***

### 3.10. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE LIGANTE ÓPTIMO

El Método Marshall considera los siguientes tres criterios:

- a) Porcentaje de Ligante con mayor Estabilidad
- b) Porcentaje de Ligante con mayor Densidad
- c) Porcentaje de Ligante igual al 4% de Vacíos de la Mezcla que representa el promedio entre 3% y 5%, según norma.

Luego se promedian estos tres valores para obtener el Contenido Óptimo de Ligante Asfáltico ya sea en mezclas en frío o en caliente.

#### 3.10.1. PORCENTAJE DE LIGANTE CON MAYOR ESTABILIDAD

A partir de la ecuación que genera cada curva de Estabilidad, se procede a calcular el mayor valor, como se muestra a continuación:

Ecuación de Estabilidad para Cemento Asfáltico a 140°C:

$$y = -464,28x^2 + 5013,2x - 11421$$

Donde:

$y$  = Estabilidad (libras)

$x$  = Contenido de Ligante Asfáltico (%)

Iterando la ecuación se obtiene:

$$Estabilidad_{m\acute{a}xima} = 2111.875 \text{ libras}$$

$$Contenido \text{ ligante}_{Estabilidad \text{ m\acute{a}xima}} = 5.40 \%$$

### 3.10.2. PORCENTAJE DE LIGANTE CON MAYOR DENSIDAD

A partir de la ecuación que genera cada curva de Densidad, se procede a calcular el mayor valor, como se muestra a continuación:

Ecuación de Densidad para Cemento Asfáltico a 140°C:

$$y = -0.0114x^2 + 0.1306x + 2.0843$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)

x= Contenido de Ligante Asfáltico (%)

Iterando la ecuación se obtiene:

$$Densidad_{m\acute{a}xima} = 2.458 \frac{gr}{cm^3}$$

$$Contenido\ ligante_{Densidad\ m\acute{a}xima} = 5.75 \%$$

### 3.10.3. PORCENTAJE DE LIGANTE IGUAL AL 4% DE VACÍOS DE LA MEZCLA

A partir de la ecuación que genera cada curva de % de Vacíos de la Mezcla, se procede a calcular el valor cuyo porcentaje de vacíos de la mezcla sea igual al 4%.

Ecuación de % e Vacíos de la Mezcla para Cemento Asfáltico a 140°C:

$$y = 0.4301x^2 - 6.4964x + 28.44$$

Donde:

y= Vacíos de la Mezcla (%)

x= Contenido de Ligante Asfáltico (%)

Iterando la ecuación se obtiene:

$$Vac\acute{ı}os\ de\ la\ Mezcla = 4 \%$$

$$Contenido\ ligante_{Vac\acute{ı}os\ al\ 4\%} = 6.5 \%$$

### 3.10.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Se promedian los tres contenidos de ligantes obtenidos, como se muestra a continuación:

$$\% \text{ Óptimo}_{\text{Asfalto}} = \frac{C.L.\text{Densidad máx} + C.L.\text{Estabilidad máx} + C.L.\text{Vacíos al 4\%}}{3}$$

$$\% \text{ Óptimo}_{\text{Ligante}} = \frac{5.40 \% + 5.75\% + 6.50\%}{3}$$

$$\% \text{ Óptimo}_{\text{Ligante}} = 5.88 \%$$

### 3.11. RESULTADOS DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE ASFÁLTICO PARA MEZCLAS EN FRÍO Y EN CALIENTE

*Tabla 3.61. Tabla de resultados del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico a 140 °C*

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO A 140°C	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2111,875	5,40
	Densidad máxima (gr/cm3)	2,458	5,75
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	6,50
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5,88</b>

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3.62. Tabla de resultados del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico a 160 °C*

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO A 160°C	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2038,101	5,45
	Densidad máxima (gr/cm3)	2,485	5,74
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	5,92
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5,70</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.63. Tabla de resultados del Porcentaje Óptimo de Emulsión Residual  
CRS - 2H**

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFÁLTO RESIDUAL CRS-2H	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	1425,911	5,51
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,340	5,55
	Vacíos de la mezcla (%)	10,000	5,57
	<b>% Porcentaje óptimo</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5,54</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.64. Tabla de resultados del Porcentaje Óptimo de Emulsión Residual  
RR - 2C**

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFÁLTO RESIDUAL RR-2C	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	2332,500	5,35
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,326	5,40
	Vacíos de la mezcla (%)	10,000	6,10
	<b>% Porcentaje óptimo.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5,62</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 3.12. CÁLCULO FINAL DE LAS PROPIEDADES TÉCNICAS MARSHALL

A partir de los Porcentajes Óptimos de Ligante Asfáltico, se vuelven a calcular todas las propiedades técnicas Marshall, como son la Densidad, el % de Vacíos de la Mezcla, Vacíos del Agregado Mineral, la Relación Betún-Vacíos, la Estabilidad y la Fluencia, aplicando las ecuaciones que tiene cada curva para cada tipo de mezcla ya sea en frío o en caliente. A continuación se muestra los cálculos finales para los resultados de la mezcla en caliente a 140°C:

$$\% \text{ Óptimo}_{\text{Ligante}} = 5.88 \%$$

$$\text{Estabilidad}_{C.A. a 140^{\circ}C} = -464,28 * 5.88^2 + 5013,2 * 5.88 - 11421$$

$$\text{Estabilidad}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 2004.41 \text{ libras}$$

$$\text{Fluencia}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 0.1687 * 5.88^2 - 0.4593 * 5.88 - 5.5118$$

$$\text{Fluencia}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 8.64 \text{ pulg (al 0.01")}$$

$$\text{Densidad}_{C.A. a 140^{\circ}C} = -0.0114 * 5.88^2 + 0.1306 * 5.88 + 2.0843$$

$$\text{Densidad}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 2.46 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\% \text{ Vacíos de Mezcla}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 0.4301 * 5.88^2 - 6.4964 * 5.88 + 28.44$$

$$\% \text{ Vacíos de Mezcla}_{C.A. a 140^{\circ}C} = 5.11 \%$$

$$R.B.V._{C.A. a 140^{\circ}C} = -1.8574 * 5.88^2 + 30.579 * 5.88 - 41.948$$

$$R.B.V._{C.A. a 140^{\circ}C} = 73.64 \%$$

$$V.A.M._{C.A. a 140^{\circ}C} = 0.3803 * 5.88^2 + 3.4961 * 5.88 - 26.85$$

$$V.A.M._{C.A. a 140^{\circ}C} = 19.44 \%$$

### 3.13. RESULTADOS FINALES DE LAS PROPIEDADES TÉCNICAS MARSHALL

**Tabla 3.65. Tabla de Finales de las Propiedades Técnicas Marshall para mezclas en caliente**

PROPIEDADES MARSHALL	MEZCLAS EN CALIENTE	
	CEMENTO ASFÁLTICO 85/100	
	a 140°C	a 160°C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	5,88	5,70
ESTABILIDAD (Lb)	2004,41	2008,14
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	8,64	7,25
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	2,46	2,48
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	5,11	4,30
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	73,64	76,49
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	19,44	18,35

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.66. Tabla de Finales de las Propiedades Técnicas Marshall para mezclas en frío**

PROPIEDADES MARSHALL	MEZCLAS EN FRÍO	
	EMULSIONES	
	CRS-2H	RR-2C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	5,54	5,62
ESTABILIDAD (Lb)	1425,77	2312,22
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	9,90	9,99
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	2,34	2,32
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	10,06	10,57
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	56,11	55,15
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	22,98	23,61

Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO IV

## COMPARACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPIEDADES MARSHALL ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO Y CALIENTE

### 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LAS MEZCLAS EN FRÍO Y EN CALIENTE

#### 4.1.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PÉTREOS

*Tabla 4.1. Tabla resumen de ensayos realizados del agregado pétreo*

Ensayos	Resultados						Promedio
<b>Análisis Granulométrico</b>	% Pasa, tamiz N°:						
	1"	3/4"	3/8"	N°4	N°8	N°200	
Granulometría de la Grava (%)	100	79,91	2,12	0,71	0,71	0,64	-
Granulometría de la Gravilla (%)	100	100	87,45	21,40	4,21	2,22	-
Granulometría de la Arena (%)	-	-	99,57	93,51	69,98	12,05	-
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		
Peso Específico de la Grava (gr/cm <sup>3</sup> )	2,59		2,58		2,58		<b>2,58</b>
Peso Específico de la Gravilla (gr/cm <sup>3</sup> )	2,61		2,61		2,61		<b>2,61</b>
Peso Específico de la Arena (gr/cm <sup>3</sup> )	2,71		2,66		2,65		<b>2,67</b>
Desgaste de los Ángeles de la Grava (%)	28,13		28,11		28,14		<b>28,13</b>
Desgaste de los Ángeles de la Gravilla (%)	24,10		24,06		24,21		<b>24,12</b>
Equivalente de Arena (%)	93,40		93,00		92,31		<b>92,9</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

En la tabla 4.1 se muestra los resultados del proceso de caracterización de los materiales pétreos, donde se puede apreciar la calidad del agregado ya que cumple con todas las expectativas necesarias para el diseño de mezclas asfálticas.

#### 4.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS

*Tabla 4.2. Tabla resumen de ensayos realizados del Cemento Asfáltico 85/100*

	Ensayos	Resultados			Promedio
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Cemento Asfáltico 85/100	Penetración (mm)	93	95	95	<b>95</b>
	Viscosidad Cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	325	297	318	<b>313</b>
	Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1,003	1,013	1,008	<b>1,008</b>
	Ductilidad (cm)	115	105	107	<b>109</b>
	Punto de Inflamación (°C)	> 280	> 290	> 295	<b>&gt; 288</b>
	Punto de Ablandamiento (°C)	44	47	43	<b>45</b>

Fuente: *Elaboración Propia*

**Tabla 4.3. Tabla resumen de ensayos realizados de las Emulsiones Asfálticas**

	Ensayos	Resultados			Promedio
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Emulsión Asfáltica CRS-2H	Residuo por Destilación (%)	69	-	-	<b>69</b>
	Penetración (mm)	57	-	-	<b>57</b>
	Viscosidad Saybolt- Furol 50°C (s)	271	-	-	<b>271</b>
	Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1,003	-	-	<b>1,003</b>
	Ductilidad (cm)	104	-	-	<b>104</b>
Emulsión Asfáltica RR-2C	Residuo por Destilación (%)	70,9	-	-	<b>70,9</b>
	Penetración (mm)	62	-	-	<b>62</b>
	Viscosidad Saybolt- Furol 50°C (s)	299	-	-	<b>299</b>
	Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1,001	-	-	<b>1,001</b>
	Ductilidad (cm)	127	-	-	<b>127</b>

Fuente: Elaboración Propia

Se observa claramente una diferencia entre los cementos asfálticos y las emulsiones asfálticas, tanto en los resultados como en la cantidad de ensayos realizados, debido a que los ensayos de Destilación son largos y se requiere de repuestos en el equipo para cada ensayo, entonces se realizó sólo un ensayo, del cual se obtuvo un residuo de destilación y fue con ese residuo que recién se procedió a realizar los demás ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica.

Es así que haciendo un análisis de resultados comparados con las normas establecidas en el capítulo II, se da cumplimiento a las especificaciones dadas.

## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES TÉCNICAS DEL MÉTODO MARSHALL

*Tabla 4.4. Tabla resumen de las Propiedades Técnicas Marshall de las mezclas en frío y en caliente*

PROPIEDADES MARSHALL	TIPO DE MEZCLA			
	MEZCLA EN CALIENTE		MEZCLA EN FRIO	
	a 140°C	a 160°C	CRS-2H	RR-2C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	5,88	5,70	5,54	5,62
ESTABILIDAD (Lb)	2004,41	2008,14	1425,77	2312,22
FLUENCIA (pulg)	8,64	7,25	9,90	9,99
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	2,46	2,48	2,34	2,32
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	5,11	4,30	10,06	10,57
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	73,64	76,49	56,11	55,15
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	19,44	18,35	22,98	23,61

*Fuente: Elaboración Propia*

En la tabla 4.5 se observa claramente la diferencia de resultados tanto en frío como en caliente. Es así que en las mezclas en caliente se observa mayor uniformidad de resultados, aunque las mezclas a 160°C proporcionan mejores condiciones que las mezclas a 140°C, es decir que tiene similar estabilidad pero menor es la fluencia, mayor es la densidad, menor el porcentaje de vacíos, lo que conlleva a una mezcla de mejores condiciones de servicio, e incluso el porcentaje de contenido óptimo de ligante asfáltico para mezclas a 160°C, también es menor que las mezclas a 140°C, lo que implica menor cantidad de cemento asfáltico a utilizar.

En cambio, para las mezclas en frío se observa una gran diferencia en las estabilidades, siendo mucho mayor los resultados de la emulsión RR-2C comparados con los resultados de la emulsión CRS-2H; pero las demás propiedades tienden a estar en el mismo rango, es decir que sus resultados son similares, aunque el contenido de emulsión residual para RR-2C es mayor, de todas formas es aceptable ya que permite obtener una mezcla de buenas condiciones.

Así también en el Anexo C de las planillas Marshall se observan claramente las curvas que relacionan los distintos porcentajes de ligante asfáltico, con las propiedades técnicas Marshall y se aprecia la variabilidad según aumentan o disminuyen dichos porcentajes.

Daremos a continuación una serie de sugerencias para aplicar cuando una mezcla no cumple algunas de las exigencias especificadas:

**a) Alta Estabilidad - Bajo porcentaje de vacíos**

Se deben calcular nuevamente las proporciones de los áridos tendiendo a desviar la graduación de la mezcla de la curva de máxima densidad o de Filler incorporando mayor porcentaje de finos redondeados naturales (arena silícea).

**b) Estabilidad Requerida - Bajo porcentaje de vacíos**

Se debe abrir la mezcla, es decir desviarla de la curva de máxima densidad aumentando el porcentaje del material fino de trituración.

**c) Baja Estabilidad - Bajo porcentaje de vacíos**

Si se descarta la mala calidad de los agregados, se debe calcular otra proporción de áridos tendiendo a desviar la graduación de la mezcla de la curva de máxima densidad pero aumentando la proporción de los agregados gruesos y finos de trituración.

**d) Estabilidad Requerida - Alto porcentaje de vacíos**

Se debe cerrar la mezcla aproximándose a la curva de máxima densidad variando la proporción de los agregados.

**e) Baja Estabilidad - Alto porcentaje de vacíos**

Calcular nuevas proporciones de áridos acercándose a la curva de máxima densidad aumentando la cantidad de áridos de trituración gruesa y fina e incorporando filler a la mezcla.

**f) Alta Estabilidad - Baja Fluencia**

Se aumentará la proporción de finos naturales en la mezcla del agregado total para que tienda a decrecer la estabilidad y por consiguiente la relación estabilidad/fluencia.

**g) Alta Estabilidad - Alta Fluencia**

No crea problemas cuando la relación estabilidad/fluencia es correcta, es decir que para el tipo de carga cumple con las exigencias requeridas.

**h) Baja Estabilidad - Baja Fluencia**

Debe calcularse otra combinación de áridos introduciendo en la misma mayor porcentaje de áridos gruesos y finos de trituración acercándose a la curva de máxima densidad.

**i) Bajo Índice de compactabilidad**

Para aumentar este índice es necesario incrementar el contenido de finos de origen natural en una proporción tal que sea compatible con la estabilidad requerida. La escasa compactabilidad de los concretos asfálticos se debe al uso exclusivo de agregados de trituración.

**j) Falta de adherencia**

La adherencia entre el cemento asfáltico y el agregado depende fundamentalmente de las características físicas y químicas de ellos y de las condiciones en que ambos se encuentran cuando se produce su unión. La falta de adherencia entre ellos se manifiesta marcadamente cuando la mezcla se encuentra en contacto con el agua por un tiempo prolongado.

En general, los C.A. muestran mayor afinidad frente a los agregados básicos, tipo calcáreo, cuyas características mecánicas son inferiores a las de los materiales ácidos (granitos, cuarcitas, gravas silíceas, gneiss).

Esta acción competitiva del agua y del asfalto sobre la superficie de los agregados, puede evitarse con el uso de los mejoradores de adherencia adicionados al material pétreo (hidróxido de calcio, cemento) o al material bituminoso aditivo (amínico). Resultando la segunda solución más ventajosa, por su mayor facilidad de llevar a la práctica.

El ensayo de estabilidad residual Marshall (Norma V. N. Sección E. IV) permite determinar la relación de la estabilidad de un conjunto de probetas sometidas a inmersión a 60 °C durante 24 horas, con respecto a otro grupo de probetas de igual densidad, sometidas a inmersión a 60 °C durante 35 minutos; estableciendo que dicho

porcentaje debe ser superior a 75 %. La falta de adherencia puede influir para que dicho valor no se alcance; para comprobar si es la causante de la caída de estabilidad, se recurre a los ensayos de recubrimiento.

La Norma A.A.S.H.O. T182-65 establece para el agregado y el C.A. en estudio el ensayo necesario para asegurar si hay o no un buen recubrimiento.

La Norma DIN modifica este ensayo, haciéndolo más riguroso y recomienda que la inmersión de 18 horas se haga en un baño a una temperatura superior en 5 °C a la temperatura del punto de ablandamiento del C.A. en estudio y no a 25 °C como establece la Norma americana. Se recomienda seguir la tendencia alemana.

### 4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE CEMENTO ASFÁLTICO Y EMULSIÓN ASFÁLTICA

**Tabla 4.5. Tabla de Precios Unitarios de mezcla en caliente con cemento 85/100**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE UNA CARPETA ASFÁLTICA					
MEZCLA EN CALIENTE CON CEMENTO CONVENCIONAL 85/100					
(SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE)					
<b>Esesor: 6 cm</b> <b>Unidad: m<sup>2</sup></b> <b>Moneda: Bolivianos</b>					
<b>1.- MATERIALES</b>					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RENDIMIENTO	CANTIDAD TOTAL	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
GRAVA 18%	m <sup>3</sup>	0,017	0,02	130,00	2,21
GRAVILLA 29%	m <sup>3</sup>	0,021	0,02	150,00	3,15
ARENA 53%	m <sup>3</sup>	0,027	0,03	125,00	3,38
CEMENTO ASFÁLTICO 85/100	Kg	9,500	9,50	9,40	89,30
GAS NATURAL	mill	0,005	0,005	16,00	0,08
DIESEL	lt	0,120	0,12	3,72	0,45
GASOLINA	lt	0,005	0,01	3,74	0,02
KEROSENE	lt	0,250	0,25	2,80	0,70
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>99,28</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>					
OPERADOR PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,008	0,01	15,00	0,12
AYUDANTE OPERADOR PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,006	0,01	9,00	0,05
PERSONAL DE LIMPIEZA	hr	0,083	0,08	7,50	0,62
PEÓN RIEGO	hr	0,090	0,09	7,50	0,68
OPERADOR DE TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
OPERADOR DE RODILLO LISO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
MAESTRO DE ASFALTOS	hr	0,008	0,01	15,00	0,12
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>2,31</b>
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				55%	1,27
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)				14,94 %	0,54
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4,12</b>
<b>3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					
PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,016	0,02	500,00	8,00
DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	hr	0,002	0,00	70,00	0,14
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,016	0,02	250,00	4,00
RODILLO NEUMÁTICO	hr	0,016	0,02	120,00	1,92
RODILLO LISO	hr	0,016	0,02	120,00	1,92
CARGADOR FRONTAL	hr	0,016	0,02	212,00	3,39
VOLQUETAS	hr	0,048	0,05	120,00	5,76
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)				5,00 %	0,21
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					<b>25,34</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>					
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)				5,00 %	6,44
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>					<b>6,44</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)				5,00 %	6,76
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>6,76</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)				3,09 %	4,39
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>4,39</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>					<b>146,32</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.6. Tabla de Precios Unitarios de mezcla en caliente con emulsión asfáltica**

**RR-2C**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE UNA CARPETA ASFÁLTICA MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA RR-2C (SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE)					
<b>Esesor: 6 cm</b> <b>Unidad: m<sup>2</sup></b> <b>Moneda: Bolivianos</b>					
<b>1.- MATERIALES</b>					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RENDIMIENTO	CANTIDAD TOTAL	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
GRAVA 18%	m <sup>3</sup>	0,017	0,02	130,00	2,21
GRAVILLA 29%	m <sup>3</sup>	0,021	0,02	150,00	3,15
ARENA 53%	m <sup>3</sup>	0,027	0,03	125,00	3,38
EMULSIÓN ASFÁLTICA RR-2C	Kg	11,250	11,25	10,30	115,88
GAS NATURAL	mill	0,002	0,00	16,00	0,03
DIESEL	lt	0,120	0,12	3,72	0,45
GASOLINA	lt	0,005	0,01	3,74	0,02
KEROSENE	lt	0,250	0,25	2,80	0,70
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>125,81</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>					
OPERADOR PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,008	0,01	15,00	0,12
AYUDANTE OPERADOR PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,006	0,01	9,00	0,05
PERSONAL DE LIMPIEZA	hr	0,083	0,08	7,50	0,62
PEÓN RIEGO	hr	0,090	0,09	7,50	0,68
OPERADOR DE TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
OPERADOR DE RODILLO LISO	hr	0,016	0,02	15,00	0,24
MAESTRO DE ASFALTOS	hr	0,008	0,01	15,00	0,12
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>2,31</b>
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				55%	1,27
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)				14,94 %	0,54
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4,12</b>
<b>3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					
PLANTA ASFÁLTICA	hr	0,016	0,02	500,00	8,00
DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	hr	0,002	0,00	70,00	0,14
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,016	0,02	250,00	4,00
RODILLO NEUMÁTICO	hr	0,016	0,02	120,00	1,92
RODILLO LISO	hr	0,016	0,02	120,00	1,92
CARGADOR FRONTAL	hr	0,016	0,02	212,00	3,39
VOLQUETAS	hr	0,048	0,05	120,00	5,76
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)				5,00 %	0,21
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					<b>25,34</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>					
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)				5,00 %	7,76
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>					<b>7,76</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)				5,00 %	8,15
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>8,15</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)				3,09 %	5,29
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>5,29</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>					<b>176,47</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.7. Tabla Comparativa de Precios Unitarios de mezclas en caliente y frío**

ACTIVIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs por m <sup>2</sup> )	ESPESOR (m)	COSTO por m <sup>3</sup> (Bs)	RELACIÓN DE GASTOS	% DE GASTOS	% DE GASTO ADICIONAL
Suministro, Ejecución Y Transporte de una Carpeta Asfáltica con CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 85/100	146,32	0,06	<b>8,78</b>	1,00	100,00	<b>0,00</b>
Suministro, Ejecución Y Transporte de una Carpeta Asfáltica con EMULSIÓN ASFÁLTICA RR-2C	176,47	0,06	<b>10,59</b>	1,21	120,61	<b>20,61</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

Del cuadro se observa una clara diferencia de costos entre la ejecución, suministro y transporte de una mezcla con cemento asfáltico convencional y otra con emulsión asfáltica. Siendo que una carpeta con emulsión asfáltica es el 20.61 % más costosa en comparación con una carpeta con cemento 85/100.

Este porcentaje de gasto adicional que nos proporciona este análisis, es una tentativa aproximada, la cual puede variar según el costo de los materiales y sobre todo del ligante asfáltico, por lo que este análisis se hizo en base a un precios de mercado igual a 1.200 \$us la tonelada para el cemento asfáltico 85/100 y de 1.300 \$us la tonelada de emulsión asfáltica. CRS-2H.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- ❖ En la presente investigación se realizó dos estudios de distintos puntos de vista, el primero con mezclas en caliente usando un cemento asfáltico convencional 85/100 pero aplicado en dos subtipos de mezclas, a 140°C y 160°C de temperatura de mezclado. El segundo con mezclas en frío usando dos tipos de emulsiones BETUMIX CRS-2H y EMULEX RR-2C, incluido el 3% de agua, siendo el segundo el que proporciona mejores resultados para el diseño de mezclas asfálticas.
- ❖ Se cumplieron con los objetivos planteados en este trabajo, ya que se logra obtener las propiedades técnicas Marshall tanto par mezclas en frío como para mezclas en caliente, existiendo una clara diferencia de resultados entre sí, a pesar de diseñar las mezclas con el mismo tipo de agregado pétreo. Esta diferencia de resultados es más visible en el Porcentaje de Vacíos de la Mezcla las mezclas en frío, obteniendo resultados con valores mucho más elevados que las mezclas en caliente, esto se debe a que al incorporar agua durante el mezclado y a su respectiva evaporación durante el curado, genera así gran proporción de vacíos en la mezcla.
- ❖ A partir de la comparación de las mezclas asfálticas en frío y en caliente se puede deducir que las Emulsiones proponen mejor Resistencia que los Cementos Convencionales, ya que generan mayor recubrimiento en las partículas aunque exista un mayor porcentaje de porosidad, es por ello que este tipo de emulsiones es recomendable para vías de tráfico mediano a liviano, no así para tráfico pesado,

y de ser así implicaría realizar un diseño con una vida útil menor, ya que está expuesto a las inclemencias del tiempo y arrastre o bombeo de finos.

- ❖ Es importante resaltar que el factor económico es fundamental al momento de elegir el ligante asfáltico para el diseño de las mezclas asfálticas, de tal manera utilizar cementos asfálticos tienen una gran ventaja económica, ya que implica menor cantidad en peso de ligante, aunque un mayor costo energético para su puesta en obra. A esto se suma la complejidad del manipuleo por su alta temperatura de mezclado, haciendo que su costo por producción sea elevado a comparación de las mezclas en frío. A su vez el costo de la emulsión asfáltica es mucho más elevado que la del cemento asfáltico e incluso, es necesario una mayor cantidad para producir el mismo volumen que de una mezcla con cemento convencional, aunque el manipuleo sea mucho menos complejo por su temperatura de mezclado, existe un costo energético relativamente bajo para su puesta en obra. Por lo tanto las mezclas en frío resultan siendo más costosas que las mezclas en caliente.
  
- ❖ Un análisis desde dos puntos de vista, uno cuantitativo y otro cualitativo, generan cierta discusión al momento de elegir la mezcla más conveniente para la su uso en carreteras de nuestro entorno. Es decir que las mezclas asfálticas en caliente tienen mejores resultados de resistencia, ya que la Fluencia va de la mano con la Estabilidad, sin embargo las mezclas asfálticas en frío generan mucha Fluencia a Estabilidades estándar. Por tal razón las mezclas en caliente son aplicables por lo general a lugares con clima cálido a templado, por su alta Estabilidad y resistencia al calor, como en este caso un cemento 85/100 o se sugiere un cemento 60/70, según el tráfico y la resistencia que se desea alcanzar. Y se sugiere el uso de mezclas en frío para lugares templados a fríos, por sus resultados bajos en fluidez. También desde el punto de vista de la porosidad, las mezclas en frío son más porosas y generan mayor adherencia, por lo que son recomendables para tratamientos superficiales y bacheos.

- ❖ En síntesis las mezclas asfálticas en caliente son las que proporcionan valores más óptimos, por su alta calidad de resistencia técnica y su bajo costo de materiales, elaboración y puesta en obra.
- ❖ Es importante resaltar que la caracterización de los ligantes y de los materiales pétreos, son fundamentales al momento de diseñar las mezclas asfálticas, ya que su cumplimiento a las normas especificadas nos dan la garantía de la que la mezcla tiene buenas propiedades, con respecto a los materiales del cual está compuesta la misma.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- En lo posterior se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación de las emulsiones asfálticas, con el fin generar un ahorro económico como también de proteger el medio ambiente.
- Se recomienda tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos.
- Dar mantenimiento al equipo Marshall para la compactación, en especial en la calibración del anillo de carga Marshall.
- En lo posible usar un extensómetro para medir la deformación para tener mayor precisión en el ensayo.