



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

## **“COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON NEUMÁTICO RECICLADO MOLIDO “**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**ISRAEL SERVÍN RAMÍREZ**

**ASESOR:**

**DOCTOR INGENIERO MARIO SALAZAR AMAYA**



Morelia, abril de 2014



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

Morelia, Mich a 21 de Enero de 2014

C. ISRAEL SERVÍN RAMÍREZ  
PRESENTE

Asunto: Carta de Aceptación  
de Inicio de Trabajo.

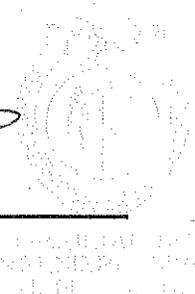
Por medio de la presente y en atención a su solicitud para iniciar el desarrollo de su trabajo relativo a la Licenciatura en Ingeniería Civil, una vez analizado el tema propuesto, se le comunica la aceptación a fin de que lleve a cabo el desarrollo del trabajo denominado "COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON NEUMÁTICO RECICLADO MOLIDO ", mismo que será asesorado por el profesor Mario Salazar Amaya.

Sin más por el momento, me despido enviándole un cordial saludo.

ATENTAMENTE

---

JOAQUIN CONTRERAS LOPEZ  
DIRECTOR  
Facultad de Ingeniería Civil





# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

Morelia, Mich a 19 de Marzo de 2014

C. ISRAEL SERVÍN RAMÍREZ  
PRESENTE

Asunto: Carta de Aceptación  
de Impresión de trabajo.

Por medio de la presente, una vez revisado su trabajo denominado "COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON NEUMÁTICO RECICLADO MOLIDO " a fin de obtener el título de INGENIERO CIVIL en esta Facultad a mi cargo, hago de su conocimiento que no existe inconveniente alguno para que esta se reproduzca.

Sin más por el momento, me despido enviándole un cordial saludo.

ATENTAMENTE

---

JOAQUIN CONTRERAS LOPEZ  
DIRECTOR  
Facultad de Ingeniería Civil

FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL  
MAY 20 2014

## **AGRADECIMIENTOS:**

El haber llegado a terminar una de mis metas más deseadas en mi vida, quisiera agradecer a todos los que me apoyaron para que esto se pudiera hacer realidad.

A Dios porque siempre está conmigo guiándome sobre el buen camino.

A mis padres que son un ejemplo a seguir y por el apoyo que me brindaron incondicionalmente en mi formación, los quiero.

A mis hermanos y sobrinos por ser parte de la familia ideal.

A toda mi familia por darme muchos ánimos para cumplir con esta meta.

A los maestros que supieron darme la formación y sabiduría profesional.

A mis amigos por darme un instante de alegría y diversión.

---

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO 1: MATERIAL PÉTREO.</b>	
1.1. Introducción.....	7
1.2. Identificación, muestreo, transporte y preparación.....	9
1.3. Peso volumétrico seco suelto.....	11
1.4. Granulometría.....	13
1.5. Pruebas de densidad relativa aparente y absorción.....	16
1.6. Equivalente de arena.....	19
1.7. Partículas alargadas y lajeadas.....	22
1.8. Determinación de la contracción lineal.....	25
1.9. Desgaste mediante la prueba del desgaste de Los Ángeles .....	27
1.10. Desprendimiento por fricción.....	30
1.11. Resumen de resultados.....	33
1.12. Conclusiones.....	34
<b>CAPITULO 2: CEMENTO ASFÁLTICO</b>	
2.1. Introducción.....	35
2.2. Definición y propiedades del cemento asfáltico AC-20.....	36
2.3. Prueba de densidad o peso específico relativo.....	37
2.4. Viscosidad Saybolt-Furol.....	39
2.5. Prueba de penetración.....	41

---

2.6. Prueba de solubilidad.....	43
2.7. Punto de inflamación Cleveland.....	45
2.8. Prueba de ductilidad.....	46
2.9. Prueba punto de reblandecimiento.....	47
2.10. Determinación de la pérdida por calentamiento y penetración retenida.....	49
2.11. Resumen de resultados.....	51
2.12. Conclusiones.....	52
<b>CAPITULO 3: DISEÑO DE LA MEZCLA</b>	
3.1. Introducción.....	53
3.2. Método Marshall.....	57
Conclusiones.....	69
<b>CAPITULO 4: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON NEUMÁTICO RECICLADO MOLIDO</b>	
4.1. Introducción.....	70
4.2. Empleo del neumático reciclado molido en el ensaye Marshall .....	72
Conclusiones.....	78
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>81</b>

**RESUMEN**

Hoy en día las vías de comunicación son muy importantes para satisfacer las necesidades de la sociedad, y una de las más transitadas en nuestro país son las vías terrestres, como son las carreteras. Lamentablemente no están bien construidas y se deteriora la carpeta asfáltica rápidamente generándose baches y grietas que provocan un mal servicio al público.

En esta investigación se hablara del mejoramiento de una mezcla asfáltica modificada con caucho molido y de sus diferentes partes que la conforman a la que se le hacen una serie de pruebas de laboratorio para conocer sus propiedades. Donde el objetivo es que resista más elasticidad, más resistencia al agrietamiento, un mayor periodo de vida y un mínimo de mantenimiento, para evitar el mal servicio al transcurrir sobre ella.

Palabras claves:

Comunicación, mejoramiento, mezcla, modificada, asfáltica.

**ABSTRACT**

Today the roads are very important to meet the needs of society, and one of the busiest in our country are the roads, such as roads. Unfortunately they are not well built and the asphalt will deteriorate rapidly generating potholes and cracks that cause a disservice to the public.

In this research spoke of improving a modified asphalt mixture with ground rubber and its various constituent parts which will become a series of laboratory tests to know their properties. Where the goal is to resist more flexibility, more resistance to cracking, a longer period of life and minimal maintenance to avoid disservice to spend on it.

Keywords:

Communication, improved, mixture, modified, asphalt.

# INTRODUCCIÓN

## **INTRODUCCIÓN**

Se ha visto que en nuestro país las vías de comunicación son muy importantes ya que es un medio para satisfacer nuestras necesidades de comunicación con la sociedad y el país entero.

Hay diferentes tipos de comunicación como son las vías aéreas, las marítimas y la más importante las vías terrestres, que en el estado son las que más usa la sociedad como son, las autopistas y carreteras federales.

Por lo que es interesante recurrir a la historia de la evolución de los caminos en México, porque es la historia del esfuerzo del hombre que con su ingenio y aplicándolo a la naturaleza, cambio el entorno de la tierra conforme a sus necesidades.

### **Las primeras veredas**

Los primeros caminos eran muy estrechos donde solamente caminaban las tribus que formaban al caminar en busca de alimentos, posteriormente cuando el hombre se hizo sedentario los caminos tuvieron diferentes finalidades como comerciales, religiosas y de conquista. En la antigua Tenochtitlan, era una de las ciudades con mayor población en el mundo con comerciantes traficantes o tamemes que eran los cargadores que llevaban en la espalda la mercancía, sostenida con una banda que iba apoyada en la frente. Ningún tipo de transporte lo ayudaba, era nada más él y solo él.

### **Llegada del caballo**

Con la conquista en 1519 Hernán Cortés trae consigo caballos y algunas mulas, además de su tripulación y artillería. La introducción de caballos y mulas para el transporte de mercancías, impulsó el trazo de nuevos caminos

### **La rueda**

Con el invento de la rueda aparecieron las carretas jaladas por personas o animales y fue necesario acondicionar los caminos para que el tránsito se desarrollara más rápido. Los caminos se revestían de tal forma para que las ruedas no se incrustaran en el terreno, para construir estos revestimientos se utilizaron piedra machacada o bien empedrados.

## **Llegada del automóvil**

A principio del siglo pasado llegan a México los primeros automóviles y con esto la necesidad de caminos y carreteras donde circulen

## **El Porfiriato**

En este período se construyen más de 19 mil kms. Los pocos caminos reales, de carreteras en este periodo se trazaron únicamente los tramos de Oaxaca, Tehuacán, Puerto Ángel y el de Tula Cd. Victoria. La creación de tantas vías férreas era para servir exclusivamente a la exportación de los productos mineros, agrícolas y ganaderos que producía el país, para llevarlo al vecino país del norte. En 1898, con esta secretaría se hace el primer intento de controlar las anárquicas concesiones ferrocarrileras y ponerle atención a los caminos. Además se dicta una ley que encargaba a los estados la reparación y conservación de los caminos

## **Venustiano Carranza**

El 25 de Diciembre de 1917, expide una ley para comunicaciones y obras públicas que obligaba a la construcción de los caminos carreteros y la inspección de los privados. El 2 de Noviembre de 1924, es inaugurada la calzada que une la Ciudad de México con el poblado de San Ángel, hoy Av. de los Insurgentes.

## **Los impuestos a la gasolina**

El 30 de Noviembre de 1924, asume la Presidencia de la República, Plutarco Elías Calles es considerado como el constructor del “México Moderno” a él se le debe la ley donde dice que se fija un impuesto de tres centavos por litro de gasolina para ser aplicado a construcción de nuevos caminos, así se crea la nueva Comisión de Caminos, integrada por los Ingenieros. León Salinas, Guillermo Beltrán y Puga, y Pascual Luna Parra.

Hoy en día la red carretera nacional, que se ha desarrollado a lo largo de varias décadas, comunica casi todas las regiones y comunidades del país. Algunas carreteras están a cargo del gobierno federal y constituyen los corredores carreteros, que proporcionan acceso y comunicación a las principales ciudades, fronteras y puertos marítimos del país y, por lo tanto, registran la mayor parte del transporte de pasajeros y carga. Algunos tramos son libres, es decir que circular por ellas no tiene costo, otras son de cuota, en las que se debe pagar un peaje para utilizarlas. En este año se tienen construidos 355,796 km de carreteras libres y de cuota.

Sin embargo las carreteras no están bien construidas y tempranamente se deterioran generándose baches o grietas que provoca un mal servicio al público ya sea porque la base, la sub-base o la carpeta asfáltica no están bien construidas. De ahí que me doy a la

tarea de elaborar esta investigación para proponer una solución a este problema basándome solamente a la carpeta asfáltica teniendo en cuenta que las demás fases o capas estén posteriormente bien construidas.

Lamentablemente la economía mexicana se encuentra en una parte del ciclo económico que se denomina recesión, (todas las economías del mundo pasan por ciclos sucesivos de auge y recesión) por lo que es muy difícil aportar más presupuesto destinado a la construcción de carreteras para su posible mejoramiento.

Esperando ese salto de nuestro país e incrementando el presupuesto a la construcción de carreteras yo propongo esta investigación basándome en el mejoramiento de una **mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa** modificada con neumático molido o caucho molido de llanta reciclada y esperando aplicarla en un futuro no muy lejano que es lo que se desea.

En los capítulos presentes en esta tesis se hablara y se hará un análisis de los principales partes que conforma una carpeta asfáltica como es el material pétreo y el cemento asfáltico y agregándole el neumático molido sabremos los resultados analizados que nos resulten.

### **Material pétreo**

El material pétreo es la base principal de la carpeta ya que depende de que tan resistente es, así será la resistencia estructural de la carpeta asfáltica por lo que se hará un análisis de las características físicas del material a utilizar. Se utilizara un material de tipo granular natural que no requiere ningún tipo de trituración ni cribado parcial que pueda eliminar los tamaños mayores a lo especificado, ya que se obtuvo con su respectiva granulometría para su uso en carpeta asfáltica señaladas en las normas.

El material se obtuvo del banco llamando “el coyolote” que se encuentra ubicado en la comunidad de La Barranca Honda del municipio de Zacapu Michoacán. A este material se les hará varias pruebas de laboratorio tales como el peso volumétrico seco suelto, densidad, absorción, desgaste, adherencia con el asfalto, granulometría, entre otras. Para saber las características físicas de este material.

Para una buena carpeta asfáltica el material debe de cumplir con algunas características muy importantes como es que no debe de tener ningún tipo de materia orgánica que al paso del tiempo genere problemas en la carpeta, claro tener la resistencia suficiente, que no se rompa con los equipos de compactación y que el tamaño máximo del agregado no debe ser mayor de 2/3 del espesor de la carpeta. Y algunas otras más.

**Cemento asfáltico**

El betún o bitumen es una mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, negra, pegajosa, completamente soluble en desulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos.

El asfalto es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas. También es utilizado en impermeabilizantes. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen. También se encuentra en estado natural en lagunas de algunas cuencas petroleras pero a pesar de la fácil explotación y excelente calidad del asfalto natural, no suele explotarse desde hace mucho tiempo ya que, al obtenerse en las refinerías petroleras como subproducto sólido en su fragmentación que se produce en las torres de destilación, resulta mucho más económica su obtención de este modo.

Los asfaltos están constituidos principalmente por tres ingredientes que son: aceites, asfáltenos y resinas. De estos los asfáltenos son los que le proporciona la dureza, las resinas las propiedades cementantes y los aceites la plasticidad del asfalto.

La consistencia de los asfaltos depende de la proporción de cada uno de los ingredientes. Cuando los asfáltenos son en mayor cantidad ósea que predominan y las resinas son bajas se tiene un asfalto duro. Y cuando predominan los asfáltenos y las resinas y el contenido del aceite es bajo, se tienen los cementos asfálticos, por eso mientras sea menor la proporción del aceite, la dureza del asfalto es mayor, y viceversa.

**Neumático molido**

La masiva fabricación de neumáticos y las dificultades para hacerlos desaparecer una vez usados, constituye uno de los más graves problemas medioambientales de los últimos años en todo el mundo. Una de las aplicaciones realmente interesantes previamente ya elaborado para este fin es en la aplicación de las carpetas asfálticas, con lo que se consigue disminuir la extracción de áridos en canteras. Las carreteras que usan estos asfaltos modificados son mejores y más seguras.

El caucho procedente de los neumáticos usados puede utilizarse como parte del material ligante o capa selladora del asfalto (caucho asfáltico) o como árido (hormigón de asfalto modificado con caucho). Dependiendo del sistema adoptado se pueden emplear entre 1000 y 7000 neumáticos por kilómetro de carretera de dos carriles.

El empleo del caucho en la construcción de carreteras le confiere unas características especiales.

En la capa de rodadura: mayor media vida, más elasticidad, más resistencia al agrietamiento, más resistencia al arrastramiento.

Pavimento drenante: impide acumulación del agua, incrementa adherencia, evita proyecciones de agua, buenas condiciones ópticas, bajo nivel de ruido.

Posteriormente en el capítulo que sigue se determinara el contenido mínimo necesario para cubrir totalmente las partículas del agregado ya mencionado, que va en función de las características físicas.

El método Marshall está limitado al proyecto y control de la calidad de las mezclas asfálticas realizadas con cemento asfáltico. Con los valores Marshall se determina los valores de estabilidad y flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado, a una temperatura de 60 °C.

En el último capítulo se hará comparativa de los resultados obtenidos mediante la prueba Marshall del capítulo anterior con los resultados de pruebas realizadas para una mezcla asfáltica modificada con caucho molido reciclado.

Hoy en día los pavimentos de las vías de comunicación están sujetos a muchas problemáticas lo cual proporcionan un desgaste del mismo y se llega a la falla del pavimento provocando una inestabilidad que ocasiona un mal funcionamiento a los usuarios.

Con el fin de construir pavimentos que resistan un mayor periodo de vida, con más elasticidad, más resistencia al agrietamiento, más resistencia al arrastramiento. Se realiza un estudio de asfaltos modificados los cuales tienen el objetivo primordial de mejorar la estabilidad de la capa de rodamiento.

El caucho molido reciclado se toma como opción para el estudio de asfaltos modificados. Se junta las llantas usadas de las que tiran la gente en carreteras, calles o parques en un centro de acopio, posteriormente se muelen en una maquina especial que separa lo que es el hule con el fierro para el mejor molido.

# CAPITULO 1:

# MATERIAL

# PÉTREO

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, usados para ser mezclados en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto. Los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica.

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.

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. Se incluyen todos los materiales de canteras cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

c) Agregados Artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

El tamaño máximo del material pétreo está limitado por el espesor de la carpeta. Podemos decir que para las carpetas comúnmente construidas el tamaño máximo del agregado debe estar entre 1/2" (12.7 mm) y 3/4" (19 mm) cuando los materiales pétreos con tamaño máximo de 1" (25.4mm) tienden a producir una carpeta de textura abierta,

por la escasez de finos. A menos de que se logre una total impermeabilidad de la carpeta por medio de sello posterior.

Para determinar la calidad del material pétreo para mezclas asfálticas existen pruebas de laboratorio con sus respectivas especificaciones que nos pueden ayudar a determinar las características del agregado, dichas pruebas son las siguientes:

- IDENTIFICACIÓN, MUESTREO, TRANSPORTE Y PREPARACIÓN
- PESO VOLUMÉTRICO SECO SUELTO
- GRANULOMETRÍA
- PRUEBAS DE DENSIDAD RELATIVA APARENTE Y ABSORCIÓN
- EQUIVALENTE DE ARENA
- PARTÍCULAS ALARGADAS Y LAJEADAS
- DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL
- DESGASTE MEDIANTE LA PRUEBA DEL DESGASTE DE LOS ÁNGELES
- DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN

## 1.2. IDENTIFICACIÓN, MUESTREO, TRANSPORTE Y PREPARACIÓN

El muestreo consiste en obtener una porción representativa del volumen de material pétreo en estudio. Se realiza directamente en los bancos de explotación, en almacenes de materiales, o durante las maniobras de carga o descarga. El muestreo incluye además las operaciones de envase, identificación y transporte de la muestra.

La muestra del agregado pétreo se obtuvo en el banco de material denominado “el coyolote” el cual está ubicado a 3.2 kilómetros de la localidad de La Barranca Honda del municipio de Zacapu Michoacán. La localidad se encuentra a 4.1 kilómetros de la carretera Morelia –Zacapu el cual es proveedor de material de origen volcánico.



Fig. 1.2.1 Ubicación

Google Earth

El aspecto geológico de la región serrana y del Malpaís, está formada en todo su volumen por materiales volcánicos como balastos, rocas ígneas extrusivas de color negro y materiales

pétreos como gravas y arenas. Son típicos de la Cordillera Volcánica Transversal los montes y cerros con una capa delgada de tierra vegetal de 1.5 m de espesor y enseguida espesores importantes de materiales volcánicos, tezontles rojo y negro, gravas, arenas y material piedra braza



Fig. 1.2.2 Banco "El Coyolote"

Google Earth

Para nuestro estudio se debe de obtener una muestra representativa del material, previamente ya seleccionado para una carpeta asfáltica.

La transportaremos en costales que eviten la perdida de finos y en un vehículo adecuado para llevarlo al laboratorio. Posteriormente se seca extendiéndolo en una superficie plana para que le peguen los rayos del sol y se seque más rápido.

El procedimiento para el cuarteo del material es revolviendo el material varias veces hasta que quede bien distribuido los finos con los gruesos, después se apila el material en forma

cónica y se aplana en la parte superior con una pala hasta quedar a unos cinco centímetros de espesor.

Ahora se cuarteo de tal manera que quede dividido en cuatro partes iguales, de esos cuatro se toman dos, los recomendados son los opuestos entre sí para realizar sus respectivos análisis, como son la granulometría, el peso volumétrico seco suelto, y todas las pruebas ya mencionadas.



Fig. 1.2.3 Secado del Material



Fig. 1.2.4 Cuarteo

### 1.3. PESO VOLUMÉTRICO SECO SUELTO

#### Objetivo de la prueba

El peso volumétrico seco suelto de un material pétreo se refiere a cuánto pesa el material totalmente seco en un determinado volumen, que conforma un recipiente donde se puede medir.

#### Procedimiento de la prueba

Teniendo en cuenta ya el cuarteo descrito en el capítulo 1.2 se prosigue a llenar el recipiente de volumen conocido, agarrando el material con un cucharón y dejándolo caer a una distancia de entre 20 a 25 cm. al centro del recipiente, sin moverlo alteradamente, apretar o apisonar el material hasta llenarlo.

Hecho lo anterior se enrasa, lo más común es con un hilo o un laso delgado que permita maniobrar bien el enrasé, después se pesa y se registra como peso del material seco ( $W_1$ )

después se le resta el peso del recipiente ( $W_2$ ) dividiéndolo entre el volumen ( $V$ ) del mismo, se obtiene el peso volumétrico seco suelto del material pétreo.

Para obtener el peso volumétrico seco suelto se emplea la siguiente expresión:

$$PVSS = \frac{W_1 - W_2}{V} * 1000$$

Dónde:

$PVSS$  = *Peso Volumétrico Seco Suelto (Kg/m<sup>3</sup>)*

$W_1$  = *Peso del material seco (Kg)*

$W_2$  = *Peso del recipiente (Kg)*

$V$  = *Volumen del recipiente (Lts.)*

En la prueba realizada el resultado fue el siguiente:

$$PVSS = \frac{18.495 - 3.630}{8.120} * 1000 = 1830.66 \text{ Kg/m}^3$$



Fig. 1.3.1 llenado y Enrasado



Fig. 1.3.2 Pesado

## 1.4. GRANULOMETRÍA

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, para calcular su porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa.

### Procedimiento de la prueba

Para la prueba utilizaremos el método más común, que es el de cribado, el cual consiste en separar una muestra representativa en sus diferentes tamaños por medio de mallas que van de mayor a menor, para después pesar el retenido por cada una de estas mallas y así tener un porcentaje representativo el cual nos servirá para hacer una comparación que nos indique si el material está bien graduado o mal graduado.

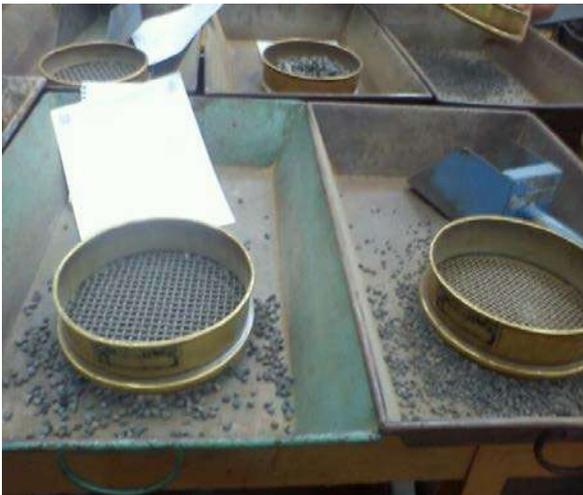


Fig. 1.4.1 Mallas



Fig. 1.4.2 Diferentes Tamaños de Material Pétreo

En la Tabla de la granulometría existen parámetros (Tabla. 1.4.1) que nos restringe los porcentajes mínimos y máximos que debe tener un material pétreo bien graduado en función de su tamaño y del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de (8,2 Toneladas) acumulados durante la vida útil del pavimento, esto nos lo marca la norma para pavimentos flexibles.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa				
50	2"	----	----	----	----	100
37.5	1 1/2"	----	----	----	100	90 - 100
25	1"	----	----	100	90 - 100	74 - 90
19	3/4"	----	100	90 - 100	60 - 76	62 - 79
12.5	1/2"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9.5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6.3	1/4"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4.75	N°4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	N°10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0.85	N°20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0.425	N°40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0.25	N°60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0.15	N°100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0.075	N°200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Tabla. 1.4.1 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (Para cualquier valor de la vida útil del pavimento ΣL).

Dichas mallas se preparan en dos juegos, el primero para la grava y el segundo para la arena ensamblándola en orden descendente de aberturas de acuerdo con lo indicado en las tablas 1.4.2 y 1.4.3 terminando en el fondo con la charola receptora.

Tabla 1.4.2 Juego de mallas para grava

Malla No.	Abertura (mm)
4/3 "	19
1/2"	12.5
3/8"	9.5
1/4"	6.3
N° 4	4.75

Tabla 1.4.3 Juego de mallas para arena

Malla No.	Abertura (mm)
N° 10	2
N° 20	0.85
N°40	0.425
N°60	0.25
N°100	0.15
N°200	0.075
Charola	

Cuando ya se tiene el material en las mallas estas se colocan en un aparato especial que agita las mallas para empezar a cribar y que queden definidos los diferentes tamaños del material, o también se puede hacer manualmente aun que es un poco más tardado y cansado.

En nuestro caso para la composición granulométrica del material retenido en la malla No.4 obtuvimos una muestra representativa de 5000 gr. Y para la determinación de la composición granulométrica del material tamizado por la malla No.4 fue una muestra representativa de 500 gr.

Enseguida se presenta el retenido de las mallas.

El resultado del cribado del material es el siguiente:

<b>COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No.4</b>				
<b>Malla No.</b>	<b>Peso retenido parcial (gr)</b>	<b>% Retenido parcial</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que pasa la malla</b>
1"	0			100
3/4"	264	5.3	5.3	94.7
1/2"	697	14	19.3	80.7
3/8"	738	14.8	34.1	65.9
1/4"	1029	20.64	54.74	45.26
N°4	464	9.3	64.04	35.96
Pasa N°4	1793	35.97		
Suma	4985	100.01		

<b>COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No.4</b>				
<b>Malla No.</b>	<b>Peso retenido parcial (gr)</b>	<b>% Retenido parcial</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que pasa la malla</b>
10	282	20.37	84.41	15.59
20	80	5.78	90.19	9.81
40	40	2.89	93.08	6.92
60	26	1.87	94.95	5.05
100	18	1.3	96.25	3.75
200	23	1.66	97.91	2.09
Pasa N°200	29	2.1	100	0
Suma	498	35.97		

El resultado de nuestra granulometría se encuentra en la siguiente tabla.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	19 (3/4) norma	% que pasa	% redondeando		
		Porcentaje que pasa en nuestra granulometría				
50	2"	----	----	----	----	----
37.5	1 1/2"	----	----	----	----	----
25	1"	100	100	100	pasa	----
19	3/4"	90 - 100	94.7	95	pasa	----
12.5	1/2"	72 - 90	80.7	81	pasa	----
9.5	3/8"	60 - 76	65.9	66	pasa	----
6.3	1/4"	44 - 57	45.26	45	pasa	----
4.75	N°4	37 - 48	35.96	36	no pasa	----
2	N°10	20 - 29	15.59	16	no pasa	----
0.85	N°20	12 - 19	9.81	10	no pasa	----
0.425	N°40	8 - 14	6.92	7	no pasa	----
0.25	N°60	6 - 11	5.05	5	no pasa	----
0.15	N°100	4 - 8	3.75	4	pasa	----
0.075	N°200	2 - 5	2.09	2	pasa	----

Se puede observar que desde la malla N°4 hasta la malla N°60 se sale del rango permitido por los requisitos de la granulometría para ese tipo de mezcla asfáltica para cualquier valor de ejes equivalentes normado por la SCT.

Y las de la malla N°100 y N°200 están al límite. Para fines prácticos se queda con esa granulometría ya que así nos la proporcionaron en el banco para una supuesta mezcla asfáltica.

## 1.5. PRUEBAS DE DENSIDAD RELATIVA APARENTE Y ABSORCIÓN

### Objetivo de la prueba

La densidad relativa y la absorción de los materiales pétreos son muy importantes en la elaboración de las mezclas asfálticas ya que si dan buenos valores de calidad, el material puede ser apto para una carpeta asfáltica.

Se debe de elegir un material que tenga una baja absorción y una mayor densidad, que son los que tienen menor grado de alteración y por lo tanto están más estables estructuralmente.

Los materiales que tienen una alta absorción nos indica que efectivamente se va a emplear más cemento asfáltico ya que este tienen mayor porcentaje de vacíos y por lo tanto se requiere llenar esos vacíos, pero se corre un riesgo de que la cantidad de asfalto no sea necesario para cubrir todas las partículas con una película de espesor necesario, lo que provoca que la vida útil de la carpeta sea menor.

Para determinar la densidad relativa aparente de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dicho sólido sin vacíos del retenido de la malla 3/8" (9.50 mm) respecto a la densidad del agua.

### **Procedimiento de la prueba**

Para realizar las pruebas de densidad relativa y absorción de los materiales pétreos que se emplean para la elaboración de las mezclas asfálticas se toma una porción en gramos de material que se retiene en la malla 3/8" (9.50 mm) y se pone a saturar en agua destilada durante un periodo de 24 horas.

Transcurrido el tiempo y el material saturado y superficialmente seco se sumerge en el picnómetro y se recolecta en la probeta graduada el agua desalojada. Al concluir la inmersión del material, se mide sobre la escala de la probeta graduada el volumen correspondiente y se registra el resultado como peso húmedo ( $P_h$ ).

Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C durante 20 horas. Transcurrido el tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.

Una vez enfriado, se determina el peso del material seco ( $P_s$ ) y se registra en gramos.

Con las siguientes expresiones se calcula la densidad y la absorción, respectivamente:

$$D = \frac{P_s}{V}$$

Dónde:

*D*= Densidad relativa aparente

*P<sub>s</sub>*= Peso seco del material (gr.)

*V*= Volumen desalojado de agua (cm<sup>3</sup>)

$$\% \text{ de absorción} = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Dónde:

*P<sub>h</sub>*= Peso húmedo del material (gr.)

*P<sub>s</sub>*= Peso seco del material (gr.)

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$D = \frac{397}{165} = \mathbf{2.40}$$

y

$$\% \text{ de absorción} = \frac{406 - 397}{397} * 100 = \mathbf{2.26\%}$$



Fig. 1.5.1 Saturado



Fig. 1.5.2 Secado parcialmente

## 1.6. EQUIVALENTE DE ARENA

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en el material pétreo empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla No.4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

Para esta prueba es necesario preparar una solución de reserva que consiste en:

### Solución de reserva

Se disuelve 454 gr. de cloruro de calcio en 1.9 Lts. de agua destilada.

Se enfría la solución al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente y después se pasa a través de papel filtro.

Se agrega 47 gr. De formaldehido, 2,047 gr. de glicerina, mezclándose bien y diluyéndose con agua destilada hasta completar 3.2 Lts. de agua.

### Solución de trabajo

Para preparar la solución de trabajo, en la botella equipada con el equipo sifón se diluye 90 mL. De la solución de reserva en 3.8 Lts. de agua destilada.



Fig. 1.6.1 Equipo sifón



Fig. 1.6.2 Capsulas de muestras

**Procedimiento de la prueba**

Una vez preparado el sifón, se sopla dentro de la botella por la parte superior a través de un pequeño tubo estando abierta la pinza, para que el sifón quede listo. Por medio del sifón se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4").

Con la ayuda del embudo, se vacía al cilindro de la prueba la muestra de material contenida en la capsula, golpeando firmemente varias veces el fondo del cilindro con la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado dentro del material y acelerar la saturación de la muestra.

Se deja reposar la muestra durante 10 minutos, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita de dos formas agitado manualmente o agitado con equipo. En nuestro caso la agitaremos manualmente, que consiste en agitar vigorosamente el cilindro colocado en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos durante 30 segundos con una carrera de aproximadamente 20 cm, entendiendo que un ciclo comprende un movimiento completo de oscilación, es decir de un lado al otro hasta concluir en la posición de partida.

Concluida la agitación, se coloca el cilindro sobre la mesa de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba hacia abajo hasta concluir en el fondo.

Cuando el nivel del líquido llegue a 38.1 cm (15"), se deja reposar el cilindro durante 20 minutos evitando cualquier tipo de movimiento o vibración durante este periodo, transcurrido el cual, la arena se a sedimentado y los finos permanecen en suspensión.

Se mide y registra el nivel superior de los finos en suspensión ( $LNS_{finos}$ ). Después se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, tratando de no formar turbulencia, hasta que la base descanse en la arena, se observa el nivel de la parte superior del indicador de la escala del cilindro se le resta la altura  $h$  (254 mm aprox.) y se registra como el nivel superior de arenas ( $LNS_{arena}$ ).

El porcentaje de equivalentes de arena se calcula con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Equivalente de arena} = \frac{LNS \text{ arena}}{LNS \text{ finos}} * 100$$

Dónde:

$LNS_{\text{arena}}$  = Nivel superior de la arena (cm)

$LNS_{\text{finos}}$  = Nivel superior de finos (cm)

$$\% \text{ Equivalente de arena} = \frac{9.21}{10.48} * 100 = \mathbf{87.88\%}$$



Fig. 1.6.3 Cilindro con la muestra.



Fig. 1.6.4 Sifón más los cilindros.

## 1.7. PARTÍCULAS ALARGADAS Y LAJEADAS

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar el contenido de la partícula de formas alargadas y lajeadas presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla 1/4" (6.30 mm) de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y longitud.

### Procedimiento de la prueba

- **Para las partículas con forma alargada**

Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partícula retenido en cada malla, se verifica que cada pieza pase por el calibrado de longitudes, buscando la posición tal que su dimensión mayor sea paralela al eje del calibrador.

Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por el calibrador de longitudes y se determina el peso y se registra como ( $W_p$ ).



Fig. 1.7.1 Calibrador de longitudes



Fig. 1.7.2. Material Pétreo

Para saber el contenido de la partícula en forma de alargada de la muestra, se emplea la siguiente expresión:

$$Ca = \frac{Wa}{Wi} * 100$$

Dónde:

*Ca= Por ciento en peso de la partícula con forma alargada (%).*

*Wa= Peso que pasa las ranuras correspondientes del calibrado (gr.)*

*Wi= Peso del material retenido en la malla 1/4" (6.30 mm) (gr.)*

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$Ca = \frac{265.8}{2000} * 100 = \mathbf{13.29\%}$$

▪ **Para las partículas en forma de laja (aplanada)**

Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partícula retenido en cada malla, se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrado de espesores, buscando la posición más adecuada.

Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por la ranuras del calibrador de espesores y se determina el peso y se registra como (*Wp*).



Fig. 1.7.3 Calibrador de Espesores



Fig. 1.7.4 Material pétreo

Para saber el contenido de la partícula en forma de laja de la muestra, se emplea la siguiente expresión:

$$Cp = \frac{Wp}{Wi} * 100$$

Dónde:

*Cp= Por ciento en peso de la partícula con forma laja (%).*

*Wp= Peso que pasa las ranuras correspondientes del calibrado (gr.)*

*Wi= Peso del material retenido en la malla 1/4" (6.30 mm) (gr.)*

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$Cp = \frac{154.8}{2000} * 100 = 7.74\%$$

## 1.8. DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL

### Objetivo de la prueba

La contracción lineal de los finos de un material pétreo, nos indica la presencia de mucha o poca actividad de las arcillas que contenga. La contracción lineal es la disminución de una dimensión de la masa del suelo expresada como un porcentaje de la dimensión original cuando su contenido de humedad se reduce desde una cantidad igual a la del límite líquido del material hasta el límite de contracción del mismo.

Si la arcilla se presenta en forma de una película delgada adherida al material pétreo, provoca una baja adherencia del asfalto con el agregado pétreo. Si la arcilla se encuentra en grumos o terrones, serán puntos débiles y de falla de la carpeta asfáltica, en presencia de agua.

### Procedimiento de la prueba

Se toma una muestra de material que pasa por la malla N° 40 (0.425 mm), se le agrega agua hasta que tome el aspecto de un material saturado y se deja en reposo durante un periodo de 24 horas en un lugar seco y fresco, en un recipiente cubierto por un paño húmedo para evitar que el material pierda humedad.

Se llena un molde de 2 cm x 2 cm x 10 cm, aproximadamente, en tres capas golpeando el molde para expulsar el aire atrapado, posteriormente se mide el molde y se anota la longitud como inicial ( $L_i$ ), se llena el molde y se enraza para posteriormente meterlo en el horno hasta que su peso se uniformice, a una temperatura de 100 a 110 °C.

Cuando el peso sea constante entonces nos indica que el material está en su límite de contracción por lo que estará completamente seco. Se saca de su molde y se mide, anotando esta distancia como final ( $L_f$ ). La relación que existe entre la longitud inicial y final multiplicado por cien, da el porcentaje de contracción lineal del suelo.

La siguiente expresión nos indica la contracción lineal del material:

$$Cl = \frac{Li - Lf}{Li} * 100$$

Dónde:

*Cl*= Contracción lineal del material pétreo (%).

*Li*= Longitud inicial del material húmedo (mm).

*Lf*= Longitud final del material seco (mm).

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$Cl = \frac{19.97 - 19.91}{19.97} * 100 = \mathbf{0.3 \%}$$



Fig. 1.8.1 Muestra



Fig. 1.8.2 Horno con la muestra

## 1.9. DESGASTE MEDIANTE LA PRUEBA DEL DESGASTE DE LOS ÁNGELES

### Objetivo de la prueba

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado.

En esta prueba se utiliza la máquina de abrasión Los Ángeles, que está constituida por un cilindro de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con diámetro inferior de  $710 \pm 5$  mm y largo de  $510 \pm$  mm, montado sobre dos soportes ubicados al centro de sus dos caras paralelas, que le permitan girar sobre sus eje de simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 rpm. El cilindro tendrá una abertura que permita introducir la muestra de prueba y las esferas metálicas, con una tapa de cierre hermético diseñada con las mismas curvas del cilindro para que la superficie interior del mismo sea continua y uniforme; además tendrá en su parte inferior una placa de acero removible de 1" (25.4mm) de espesor que se proyecta radialmente  $3 \frac{1}{2}$ " (89 mm) en toda la longitud del cilindro y contará con un dispositivo para registrar el número de revoluciones que dé el cilindro.

Para la carga abrasiva se requiere de esferas fundidas de hierro o acero, con un diámetro de 47 mm y una masa de entre 390 y 445 gr. cada una.



Fig. 1.9.1 Maquina Los Ángeles



Fig. 1.9.2 De perfil

### Procedimiento de la prueba

Primero se tiene que clasificar el material pétreo mediante la siguiente tabla:

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fricción gr	Carga Abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total
A	37.5 - 25	1 1/2" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 10
	25 - 19	1" - 3/4"	1 250 ± 25		
	19 - 12.5	3/4" - 1/2"	1 250 ± 10		
	12.5 - 9	1/2" - 3/8"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12.5	3/4" - 1/2"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12.5 - 9.5	1/2" - 3/8"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9.5 - 6.3	3/8" - 1/4"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6.3 - 4.75	1/4" - N° 4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4.75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

**Tabla 1.9.1 clasificación de los materiales según su granulometría**

Una vez separado y clasificado el material se elige el tipo de composición que se utilizara para integrar la muestra de prueba y al comparar nuestra granulometría, tenemos que nuestro material es de **tipo C** ya que el mayor porcentaje de partículas es retenido en la malla 1/4"(6.30 mm).

Se integra la muestra de prueba con las proporciones correspondientes a cada rango de tamaños, de acuerdo con las cantidades de la tabla 1.9.1 y se registra el peso como ( $W_i$ )

De acuerdo con la tabla 1.9.1 se define la cantidad de esferas requeridas y verifica que su masa total cumpla con lo establecido en dicha tabla, hecho lo anterior se introducen las esferas a la máquina de Los Ángeles y se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.

Se retira el material del interior de la máquina depositándola en una charola. Se desecha la fricción de la muestra de prueba que pase la malla N°12 (1.7 mm de abertura). Una vez desechado el material menor 1.7 mm, se lava la muestra con un chorro de agua y se secan en el horno a temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta masa constante.

Finalmente se deja enfriar la muestra de prueba a temperatura ambiente para determinar su peso con aproximación de 0.1 gr. y se registra el peso como ( $W_f$ ).

El porcentaje de desgaste del material pétreo se obtiene con la siguiente expresión:

$$D = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100$$

Dónde:

$D$ = Desgaste del material pétreo (%)

$W_i$ = Peso inicial de la muestra (gr.)

$W_f$ = Peso final de la muestra (gr.)

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$D = \frac{5000 - 3290}{5000} * 100 = 34.2 \%$$



Fig. 1.9.3 Material desgastado.

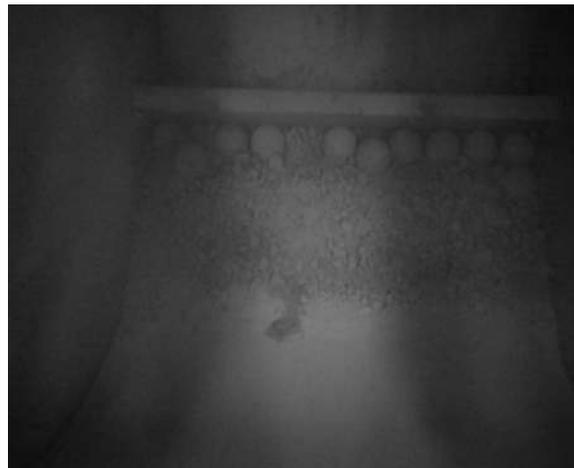


Fig. 1.9.4 Material en la máquina Los Ángeles.

## 1.10. DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN

### Objetivo de la prueba

El objetivo de la prueba es determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos. La prueba consiste en someter a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio varias muestras de mezcla asfáltica de granulometría definida, evaluando su estado físico una vez sometida a este tratamiento.

La máquina que se utiliza en esta prueba es una máquina de agitación, la cual es hechiza, que consiste en un cilindro metálico hueco de 37 cm de diámetro, tiene en la parte inferior de la superficie cilíndrica las bases para apoyo de los frascos, los cuales están alineados en forma de cuadrantes, el cilindro gira sobre su eje, que está colocado horizontalmente sobre un soporte metálico, accionado por un motor eléctrico provisto de un reductor para que gire a la velocidad de 45 a 50 rpm.

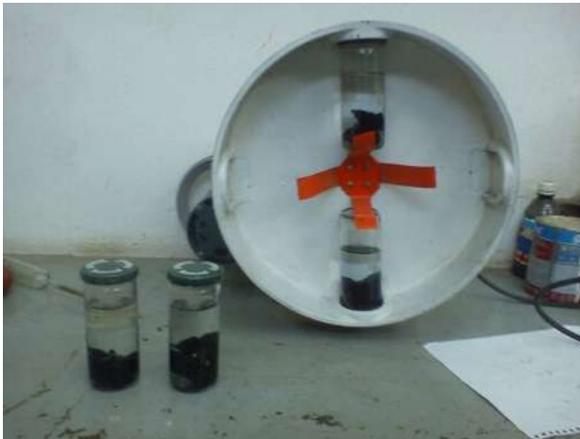


Fig. 1.10.1 Agitador Mecánico



Fig. 1.10.2 De perfil

### Procedimiento de la prueba

Preparación de la muestra:

De una porción de material pétreo se toma la fracción que pasa a través de la malla 3/8" (9.5 mm) y se retiene en la malla 1/4" (6.3 mm), así como el retenido en la malla N°4 (4.75 mm); se prosigue a integrar muestras de 500 gr. conformándola según la granulometría del material. En esta prueba integraremos 6 muestras a ensayar.

Para determinar el porcentaje del producto asfáltico se obtiene de la siguiente tabla:

Tipo de superficie del material pétreo	Absorción del material		
	0.0 a 2.5	2.6 a 5.0	Mayores de 5.0
Lisa	3	4	5
Semi-Rugosa	4	5	6
Rugosa	5	6	7

Tabla 1.10.1 porcentaje aproximado, en peso respecto al material pétreo de cemento asfáltico para lograr un buen cubrimiento de partículas

Para el caso del material pétreo ensayado, que tiene una absorción del 2.26% se toma un valor de 5% para la cantidad de asfalto que se utiliza.

El procedimiento de la prueba de desprendimiento por fricción requiere de verificación, para lo cual se toma como testigo un material que haya probado una buena afinidad con el asfalto. Este material se reserva de algunas pruebas anteriores donde el operador haya determinado que no se presenta pérdida de la película de asfalto; de esta manera se comparan los resultados entre el material testigo y el material por probar.

Con los materiales calentados a la temperatura indicada, agregar paulatinamente el producto asfáltico a cada uno de las 6 porciones de agregado pétreo dentro de la charola que la contiene.

A fin de alcanzar una distribución uniforme, manipular la mezcla con la cuchara de albañil, considerando, además, que para evitar la pérdida de temperatura durante el proceso, la muestra se coloca por breves lapsos sobre una parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, sin exceder la temperatura de aplicación indicada en el proyecto o aprobado por la Secretaría para el producto asfáltico.

Finalizada la homogenización, de cada porción tomar dos fracciones y orear a temperatura ambiente.

Colocar las fracciones de prueba en frascos de vidrio y agregar a cada una, 200 cm<sup>3</sup> de agua pura o destilada a 25°C; posteriormente tapar y dejar reposar durante 24 horas.

Si transcurrido dicho tiempo no ocurre un desprendimiento apreciable de la película de asfalto en algunos de los frascos, instalarlos en el agitador mecánico y someterlos a 4 periodos de agitación durante 15 minutos cada uno.

Se prosigue a sacar los frascos de la máquina, se escurre el agua contenidos en ellos y se vacía el material sobre una hoja de papel blanca y se observa minuciosamente con una

lupa para cuantificar de manera visual el porcentaje de desprendimiento de la película de asfalto de las partículas del material pétreo.

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>
<b>Desprendimiento de la película de asfalto</b>	2%	2%

Se puede observar en los resultados de esta prueba realizada al material pétreo que es casi nulo su porcentaje de desprendimiento de la película de asfalto. Por lo que se adhiere muy bien.



Fig. 1.10.3 Oreado a temperatura ambiente

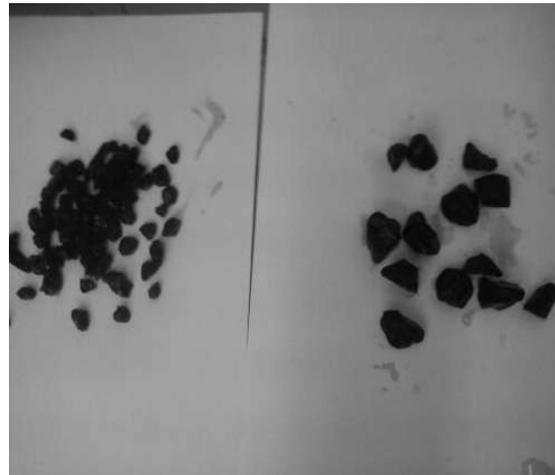


Fig. 1.10.4 Muestra de prueba después de la agitación

**1.11. RESUMEN DE RESULTADOS**

PRUEBA	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
PESO VOLUMETRICO SECO SUELTO	1830.66 Kg/m <sup>3</sup>	no existe norma
GRANULOMETRÍA	La granulometrica se sale un poco del rango en algunos tamaños de material pétreo para un tamaño nominal del material pétreo de 19mm (3/4")	Se tomo de la tabla 3 del libro CMT. Características de Los Materiales (N-CMT-4-04/08)
PRUEBAS DE DENCIDAD RELATIVA APARENTE Y ABSORCIÓN	Densidad relativa= 2.4 Absorción= 2.26%	Densidad relativa= 2.4 mínimo M-MMP-4-04-003 menor a 2% baja absorción, entre 2% y 4% de mediana absorción y mayor de 4% de alta absorción
EQUIVALENTE DE ARENA	87.88%	50% Mínimo N-CMT-4-04/08
PARTICULAS ALARGADAS Y LAJEADAS	13.29% (partículas en forma de alargada), 7.74% (partículas en forma laja)	40% Máximo N-CMT-4-04/08
DESGASTE MEDIANTE LA PRUEBA DEL DESGASTE DE LOS ÁNGELES	34.20%	35% Máximo N-CMT-4-04/08
DESPRENDIMIENTO POR FRICCÓN	2%	25% Máximo N-CMT-4-04/08

## 1.12. CONCLUSIONES

Como se puede observar en la serie de resultados de la tabla anterior realizada al material pétreo originario del banco de material nombrado "El Coyolote" el material es de buena calidad, teniendo en cuenta que los materiales de origen volcánico no son los adecuados para tener una buena estabilidad en un pavimento de concreto asfáltico.

Primeramente se puede observar que el peso volumétrico seco suelto de este material está un poco bajo lo cual nos indica que el volumen es poco alto y por lo tanto la densidad siendo de 2.4 que es el mínimo establecido en la norma para pavimentos flexibles.

La granulometría que se tiene en este material es más o menos buena ya que en el porcentaje de finos se sale un poco de los límites permisibles de la tabla establecida para mezclas asfálticas. Por lo que se deja como buena.

Lo que es la densidad relativa aparente anda en los límites permisibles y la absorción es mediana del 2.26 % por lo que se va adquirir asfalto de manera normal.

Para la prueba de equivalente de arenas se observa que esta entre el 90 %, lo cual nos indica que el material se podrá adherir mucho mejor con el cemento asfáltico, esto se puede reflejar en la prueba de desprendimiento por fricción en el material ya que es casi nula el desprendimiento del cemento de la partícula.

En la forma de la partícula, tenemos un porcentaje bajo ya que el material es de origen volcánico y la mayoría de las partículas son de forma redonda.

Dado lo anterior se utiliza el material pétreo para la mezcla asfáltica.

# CAPITULO 2:

# CEMENTO ASFÁLTICO

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Los cementos asfálticos son el complemento de la mezcla asfáltica para una capa de rodadura, por lo que es importante conocer las propiedades para conocer su calidad del mismo, por lo que existen una serie de pruebas que a su vez están normadas por la Secretaría de Comunicación y Transportes.

Otra de las cosas importantes que se debe de saber es, que tipo de cemento asfáltico es adecuado para la mezcla, esto depende de la región donde se efectuara y del clima, este último es muy importante ya que depende mucho en la elección del cemento asfáltico. Los cementos asfálticos están clasificados principalmente por su dureza como los AC-10 que son uno de los más duros después le siguen los AC-20 menos duros, y así sucesivamente hasta llegar al AC-40 que es el más blando.

En nuestro caso usaremos un AC-20 que es un cemento asfáltico más común en nuestro estado, y que se puede utilizar en gran parte del país.

En las siguientes pruebas se determinara la calidad del cemento asfáltico AC-20 para mezcla asfáltica.

## 2.2. DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20

EL concreto bituminoso es el material más común en los proyectos de construcción para firmes de carreteras, aeropuertos y aparcamientos. Estos se extienden en capas y se compactan. Debido a sus buenas propiedades como impermeabilizante también se usa en el núcleo de ciertas presas como impermeabilizante.

Definición:

El **asfalto** es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas. También es utilizado en impermeabilizantes. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen.

Es muy importante tomar en cuenta algunas propiedades del cemento asfáltico, para su identificación y clasificación las cuales se mencionan a continuación:

- DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20
- PRUEBA DE DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO RELATIVO
- VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL
- PRUEBA DE PENETRACIÓN
- PRUEBA DE SOLUBILIDAD
- PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND
- PRUEBA DE DUCTILIDAD
- PRUEBA PUNTO DE REBLANDECIMIENTO
- DETERMINACIÓN DE LA PERDIDA POR CALENTAMIENTO Y PENETRACIÓN RETENIDA

### 2.3. PRUEBA DE DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO RELATIVO

#### Objetivo de la prueba

El peso específico de un cemento asfáltico es la relación del peso de un volumen dado al peso de un volumen igual de agua, indicando la temperatura del cemento asfáltico y el agua.

El conocimiento del cemento asfáltico es útil en dos aspectos. Es necesario conocer la relación entre peso y volumen; las especificaciones de materiales bituminosos para pavimentación se expresan en porcentaje por peso. Las mezclas en caliente es necesario conocer el coeficiente de dilatación del producto asfáltico de forma que pueda calcularse el peso específico a cualquier temperatura; no siendo así debe determinarse el peso específico a la temperatura de trabajo.

#### Procedimiento de la prueba

El método utilizado es el del picnómetro. El frasco vacío se seca y pesa ( $W_f$ ), se llena con agua destilada recientemente hervida para eliminar el aire y se pesa ( $W_{fw}$ ).

Se calienta ligeramente el picnómetro y se introduce en él una cantidad adecuada de cemento asfáltico por vertido del producto fundido, manteniéndolo fluido durante un tiempo lo suficientemente largo para que no queden atrapadas burbujas de aire se deja enfriar y se pesa ( $W_{fa}$ ).

Después de pesar, se vierte agua destilada hasta el borde del picnómetro y se pesa ( $W_{faw}$ ) de nuevo. Deben de establecerse las temperaturas del material a 25°C y el agua también a la misma temperatura antes de cada pesada.

El cálculo de la densidad se determina con la siguiente expresión:

$$Sca = \frac{W_{fa} - W_f}{(W_{fw} - W_f) - (W_{faw} - W_{fa})} = \frac{W_a}{W_w}$$

Dónde:

$Sca$ = Peso específico relativo o densidad del cemento asfáltico (adimensional).

$W_f$ = Peso del Picnómetro (gr.)

$W_{fw}$ = Peso del Picnómetro lleno de agua (gr.)

$W_{fa}$  = Peso del Picnómetro con asfalto (gr.)

$W_{faw}$  = Peso del Picnómetro con asfalto y agua (gr.)

$W_a$  = Peso del cemento asfáltico contenido en el Picnómetro (gr.)

$W_w$  = Peso del agua destilada correspondiente a un volumen igual al del cemento asfáltico (gr.)

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$Sca = \frac{W_{fa} - W_f}{(W_{fw} - W_f) - (W_{faw} - W_{fa})} = \frac{W_a}{W_w}$$

$W_f = 29$  gr.

$W_{fw} = 55.8$  gr.

$W_{fa} = 47.9$  gr

$W_{faw} = 56.4$  gr.

$$Sca = \frac{47.9 - 29}{(55.8 - 29) - (56.4 - 47.9)} = \frac{18.9}{18.3} = \mathbf{1.033}$$

## 2.4. VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite conocer la resistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a temperaturas de 135°C para los cementos, de 25 a 50°C para las emulsiones y de 50 a 60°C para los asfaltos rebajados, pudiéndose hacer a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.

Las pruebas consisten en determinar el tiempo que tarda en pasar 60 ml. del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecida.

La viscosidad es la propiedad física más importante de un cemento asfáltico. Ya que el mezclado puede ser con menor temperatura y por lo tanto menor riesgo de accidentes al calentarse demasiado para permitir que fluya libremente.

### Procedimiento de la prueba

Para realizar la prueba en cementos, se produce de la siguiente manera:

Se calienta el baño del viscosímetro con el aceite adecuado para la temperatura a la cual se efectuara la prueba.

Se limpia el tubo de viscosidad con petróleo diáfano y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se seca y en seguida se limpia.

Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para evitar pérdidas de la muestra de prueba.

A continuación se vierte el tubo de viscosidad la muestra preparada, filtrándola a través de la malla, hasta que se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.

Se verifica que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.

Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene en el momento que la muestra alcance la marca de aforo 60 ml. del matraz y se registra el tiempo medido. El tiempo transcurrido desde que inicia el llenado del tubo de viscosímetro hasta que empieza el llenado del matraz no debe ser mayor a 15 minutos.

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

*Tiempo transcurrido = 385 segundos*



Fig. 2.4.1 Viscosímetro

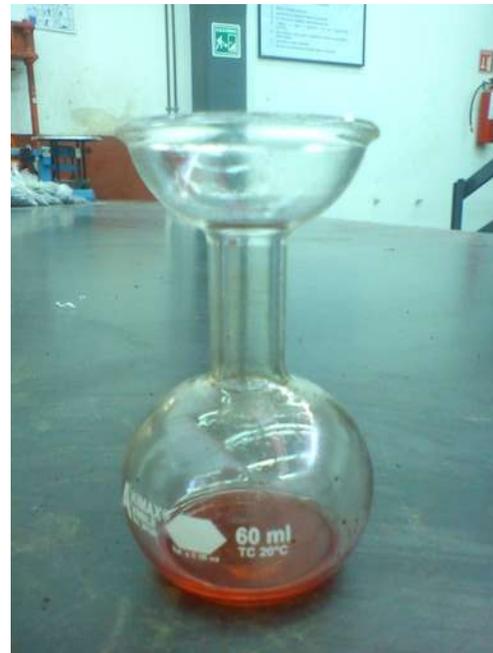


Fig. 2.4.2 Matraz para Viscosímetro

## 2.5. PRUEBA DE PENETRACIÓN

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, mediante la penetración vertical de una aguja con una prueba de cemento asfáltico bajo condiciones establecidas de peso, tiempo y temperatura.

La penetración se debe efectuar en 5 segundos en cuanto la punta de la aguja este en contacto con la superficie del asfalto, se deja caer libremente y se mide en decímetros de milímetro, que se denominan grados de penetración.

Cuando los grados de penetración son menores se refiere a que el asfalto es de mayor dureza.



Fig. 2.5.1. Penetrómetro



Fig. 2.5.2. Vástago más contrapeso

### Procedimiento de la prueba

Se coloca la capsula de penetración que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para introducirlo posteriormente en el baño de agua, cuando este mantenga una temperatura de 25°C se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 2 horas, con objeto de que el producto asfáltico adquiriera esa temperatura.

Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la aguja y se lastra para que el elemento tenga un peso de  $100 \pm 0.1$  gr. y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.

En el recipiente de las capsulas se pone el penetrómetro teniendo en cuenta suficiente agua como para cubrir las capsulas. Después se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la punta de la aguja con la de su imagen reflejada en la superficie de la muestra.

Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su caratula, hecho esto se oprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 segundos lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetros.

Se debe hacer por lo menos tres penetraciones sobre puntos diferentes de la superficie de la muestra de prueba, separados entre sí y la pared de la capsula. Se limpia cuidadosamente la aguja después de cada penetración.

En la prueba realizada el resultado fue el siguiente:

ENSAYE	Grados de Penetración
1	65
2	72
3	63
4	60
5	73
<b>Promedio=</b>	<b>66.6</b>



Fig. 2.5.3 capsulas de prueba



Fig. 2.5.4. Penetrómetro de perfil

## 2.6. PRUEBA DE SOLUBILIDAD

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite conocer la pureza del material asfáltico en cuanto a su contenido de sustancias sólidas y consiste en disolver en tricloroetileno o tricloroetano, una muestra de cemento asfáltico filtrándola a través de una capa de fibra de asbesto, donde se detiene la fricción insoluble.

### Procedimiento de la prueba

Se desmenuza de 20 a 30 gr. de asbesto, se pone en un litro de agua y se agita para formar una suspensión dispersa y uniforme.

Se coloca en el fondo del crisol Gooch parte del asbesto en suspensión y se deja en reposo hasta que se asiente. A continuación, se aplica una ligera succión para eliminar el agua y formar una capa firme de asbesto.

Se desmonta el crisol y se lava la capa de asbesto con agua destilada, se calienta el asbesto al rojo vivo, colocando el crisol sobre una flama abierta, hasta que alcance un peso constante y se deja enfriar.

Se determina el peso de la capa de asbesto y se repite el proceso indicado anteriormente hasta que dicha masa sea de  $0.5 \pm 1.0$  gr. se registra el peso del crisol preparado ( $W_i$ ) y se conserva en el desecador hasta su utilización.

La muestra de prueba se calienta agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en el matraz Erlenmeyer, cuidando que la temperatura alcanzada no exceda los  $130^{\circ}\text{C}$  y que esta operación se realice en un lapso no menor de 30 minutos.

Se vierte la muestra en el matraz Erlenmeyer, se deja enfriar a la temperatura ambiente y se registra el peso de la misma ( $W_m$ ). A continuación se agrega en pequeñas porciones de  $100\text{ cm}^3$  del solvente seleccionado agitando en forma continua hasta disolver totalmente la parte soluble del asfalto y cuidando que las partículas insolubles no se adhieran a las paredes del matraz, después de lo cual se tapa este y se deja en reposo durante 15 minutos como mínimo.

El crisol Gooch ya preparado, se instala en el matraz de filtración debidamente acoplado a la bomba de succión y se humedece la capa de asbesto con una pequeña cantidad del

solvente; se decanta cuidadosamente la solución de asfalto contenida en el matraz Erlenmeyer y se hace pasar por la capa de asbesto. Se lava el interior del matraz con pequeñas cantidades del solvente y se vierte esta solución en el crisol. Se lava el contenido del crisol en el solvente hasta que este salga incoloro y se succiona hasta eliminarlo totalmente.

Se desmonta el crisol y se lava con el solvente utilizado y se seca en el horno hasta que no se perciba olor a solvente. Se enfría el crisol y se determina su peso, el cual se registra como ( $W_f$ ).

La fricción soluble de asfalto se determina con la siguiente expresión:

$$S = 1 - \frac{W_f - W_i}{W_m} * 100$$

Dónde:

$S$ = Solubilidad del cemento asfáltico (%).

$W_m$ = Peso de la muestra de cemento asfáltico (gr.)

$W_f$ = Peso del crisol preparado contenido el material insoluble (gr.)

$W_i$ = Peso del crisol preparado (gr.)

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$S = 1 - \frac{23.45 - 23.45}{2} * 100 = \mathbf{100\%}$$

## 2.7. PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la temperatura mínimas a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquellas en que inicia su combustión. La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzca en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión.



Fig. 2.7.1 Copa abierta de Cleveland



Fig. 2.7.2 Sujetador

### Procedimiento de la prueba

Se monta y se sujeta el termómetro de manera que el extremo inferior del bulbo quede a 6.4 mm de la copa abierta de Cleveland, previamente colocada en la placa de apoyo, en un punto situado a la mitad de la distancia entre el centro y la pared de la copa opuesta al aplicador de flama; cuidando que el eje de giro del aplicador de flama, al centro de la copa y el eje del termómetro queden en el mismo plano vertical.

Se vacía lentamente en la copa abierta de Cleveland el material asfáltico preparado, hasta que la parte superior del menisco coincida con la marca de aforo de la copa, destruyendo cualquier burbuja que se forme en la superficie de la muestra de prueba vertida.

Se aplica calor a la muestra de prueba de manera que su temperatura aumente a razón de 1.5 a 2 °C por minuto.

A continuación a intervalos de 2°C se pasa una pequeña llama por el borde de la copa abierta de Cleveland y en el momento que se aparezca una flama, en cualquier parte de la superficie de la muestra, se toma la temperatura, la cual será el punto de inflamación.

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

La aparición de la primera llama se registró a los **240 °C**

## **2.8. PRUEBA DE DUCTILIDAD**

### **Objetivo de la prueba**

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse los cementos asfálticos. Esta prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específica, puede ser estirada sin romperse.

### **Procedimiento de la prueba**

El molde con la placa de apoyo, conteniendo la briqueta, se coloca dentro del baño de agua, a una temperatura de  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$  durante 30 minutos, se saca del baño y se enraza la briqueta cortando el exceso del material con una espátula de borde recto previamente calentada para facilitar el corte. Se vuelve a introducir al baño de agua durante  $90 \pm 5$  minutos.

A continuación se retira la briqueta de la placa quitando los elementos laterales del molde y de inmediato se instala con sus mordazas en el ductilómetro previamente preparado con agua a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , sujetando los extremos de estas en los postes o ganchos del aparato, debiendo quedar la cara superior de la briqueta a no menos de 2.5 cm de la superficie. Durante la prueba se debe mantener la temperatura indicada.

Se pone en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5 cm. por minuto con una variación de  $\pm 5\%$  hasta producir la ruptura de la briqueta en ese momento se lee el desplazamiento de la mordaza y se registra en centímetros.

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

BRIQUETA N°	Distancia de ruptura(cm.)
1	61
2	63



Fig. 1 8.1 Briqueta preparada

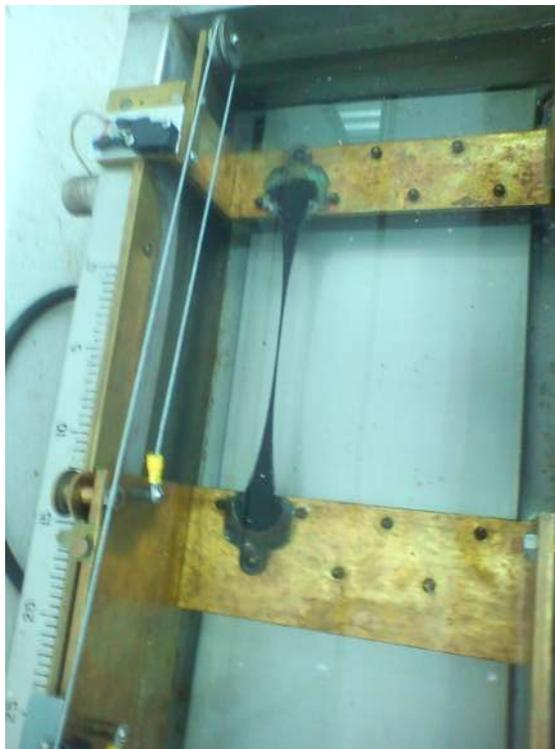


Fig. 1.8.2 Ductilómetro

## 2.9. PRUEBA PUNTO DE REBLANDECIMIENTO

### Objetivo de la prueba

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

### Procedimiento de la prueba

Se ensambla el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba y el termómetro de manera que el bulbo quede al mismo nivel de los anillos.

Se llena el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm, con agua potable a  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  el reblandecimiento esperado es menor de  $80^\circ\text{C}$  y con las pinzas se colocan las esferas en el fondo del vaso. Se introduce en el vaso el sistema de soporte y se deja 15 minutos manteniéndola a temperatura indicada.

Se extrae el sistema de soporte, con las pinzas se coloca las esferas en las guías e inmediatamente se vuelve a introducir en el vaso.

Se coloca en conjunto en la parrilla eléctrica o mechero y se incrementa uniformemente la temperatura del líquido a razón de  $5^\circ\text{C}$  por minuto con una tolerancia  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  en lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 minutos.

Se registra para cada anillo la temperatura en el termómetro en que el material asfáltico toca la parte inferior del soporte, con aproximación de  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

La temperatura a la que la esfera llego al fondo fue de:  **$53^\circ\text{C}$**



Fig. 2.9.1 Vaso con agua destilada y anillos



Fig. 2.9.2 Sistema de soporte

## 2.10. DETERMINACION DE LA PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO Y PENETRACIÓN RETENIDA

### Objetivo de la prueba

El ensayo de pérdida por calentamiento de los asfaltos determina el porcentaje perdido cuando el material se calienta a 163 °C durante cinco horas en un horno ventilado.

Por lo tanto, es una forma de ensayos de destilación y se utiliza como medida de las volatilidades relativas a las temperaturas normalmente utilizadas para la preparación de mezclas asfálticas.

Los asfaltos de penetración utilizados para la construcción de carreteras pierden normalmente menos del 1% en este ensayo; los tipos de asfaltos más duros utilizados en mezclas asfálticas pierden frecuentemente menos del 0.25%. Cuando es necesario, pueden llevarse a cabo ensayos de penetración o de punto de reblandecimiento sobre el residuo del ensayo de pérdida por calentamiento.

### Procedimiento de la prueba

Se calienta una muestra de cemento asfáltico cuidando que no sobre pase una temperatura de 130 °C, se vierten 50 gramos de cemento asfáltico en dos charolas previamente pesadas. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa ( $W_i$ ).

El horno está provisto de un estante giratoria nivelado a 5 revoluciones por minuto se calienta a una temperatura uniforme y estable de 163°C, se coloca la muestra en el instante y se dejan por espacios de 5 horas.

Transcurridas las 5 horas se sacan los ensayes y se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesan ( $W_f$ ).

La pérdida por calentamiento se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$W_c = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100$$

Dónde:

$W_c$ = Perdida por calentamiento del cemento asfáltico (%).

$W_i$ = Peso inicial de la muestra (gr.)

$W_f$ = Peso final de la muestra (gr.)

A continuación se coloca los ensayos nuevamente en el horno durante 15 minutos con la finalidad de que los mismos se fluidifiquen y mezclarlos para así tener una probeta para la prueba de penetración retenida.

La prueba de penetración realizada a este residuo se llama penetración retenida y esta se expresa como un porcentaje de penetración original de nuestro asfalto.

La penetración retenida se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{Pf}{Pi} * 100$$

Dónde:

$Pr$ = penetración retenida por la muestra de cemento asfáltico (%).

$P_i$ = Penetración de la muestra original (grados de penetración).

$P_f$ = Penetración de la muestra después de haber sido sometida a calentamiento (grados de penetración).

En la prueba realizada el resultado obtenido fue el siguiente:

$$W_c = \frac{50.0 - 49.93}{50.0} * 100 = \mathbf{0.01\%}$$

Penetración retenida:

ENSAYE	Grados de Penetración
1	58
2	63
3	65
4	59
5	60
<b>Promedio=</b>	<b>61</b>

**2.11. RESUMEN DE RESULTADOS**

<b>PRUEBA</b>	<b>RESULTADOS DE LA PRUEBA</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>
PRUEBA DE DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO RELATIVO.	<b>1.033</b>	no existe norma
VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL	<b>385 segundos</b>	<b>150 seg. Min.</b> N-CMT-4-05-001/00
PRUEBA DE PENETRACIÓN	<b>66.6°</b>	<b>60 °Min.</b> N-CMT-4-05-001/00
PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND	<b>240 °</b>	<b>232 °C Min.</b> N-CMT-4-05-001/00
PRUEBA DE DUCTILIDAD	<b>62 cm. promedio.</b>	<b>50 cm. Min.</b> N-CMT-4-05-001/00
PRUEBA PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	<b>53°</b>	<b>48-56 °C</b> N-CMT-4-05-001/00
DETERMINACION DE LA PERDIDA POR CALENTAMIENTO.	<b>0.01%</b>	<b>0.5% Max.</b> N-CMT-4-05-001/00
PENETRACIÓN RETENIDA.	<b>61%</b>	<b>54% Min.</b>

## 2.12. CONCLUSIONES

Se puede observar que el cemento asfáltico AC-20 cumple con todas las pruebas a las que se le realizaron con forme a la norma N-CMT-4-05-001/00 publicada por la SCT. Por lo que podemos decir que es un cemento medio suave puesto que su penetración está en los límites permisibles de las especificaciones. Su ductilidad está un poco alto por lo que podemos decir que es un cemento rígido.

Dicho lo anterior podemos decir que nuestro cemento asfáltico es bueno para el diseño de nuestra mezcla asfáltica.

# CAPITULO 3: DISEÑO DE LA MEZCLA

### 3.1. INTRODUCCIÓN

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. También el tipo de producto asfáltico que se va aplicar es importante.

El contenido óptimo de asfalto es el que produce la mejor durabilidad y resistencia estructural de una carpeta asfáltica. Dentro de los límites prácticos se considera que a mayor película de asfalto corresponde a una mayor resistencia al intemperismo y a la abrasión producida por los vehículos. A lo que se refiere la resistencia estructural, para un mismo agregado pétreo, al ir aumentando la película de asfalto, encontramos 3 condiciones:

- a).- El asfalto actúa como aglutinante y dentro de estas condiciones, se presenta la máxima resistencia estructural pero durabilidad mínima.
- b).- La película de asfalto actúa con menor poder adhesivo y comienza a observarse un cierto grado de lubricación entre las partículas del material pétreo, disminuyendo por esta causa, la resistencia estructural y aumenta la durabilidad. Dentro de esta condición se localiza el espesor de la película de asfalto que proporciona la mejor combinación de resistencia estructural y durabilidad que corresponde al contenido óptimo de asfalto.
- c).- La película de asfalto, al ir aumentando de espesor, actúa principalmente como lubricante, perdiendo considerablemente su poder adhesivo. En esta condición se va perdiendo resistencia de la carpeta y se provocan grandes deformaciones con el paso de los vehículos.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla se hace mediante dos métodos que son los más utilizados en nuestro país, estos son:

- Método Marshall
- Método de la prueba de Compresión Axial no Confinada.

Para nuestra mezcla asfáltica usaremos el Método Marshall para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Para esto es necesario conocer el contenido mínimo de asfalto para lo cual existen un par de métodos.

a).- Superficie Específica

b).- Formula Analítica de la SCT

Por la granulometría de nuestro agregado se opta por el método Superficie Específica.

Este método se basa en la estimación aproximada de la superficie total de las partículas del material pétreo, por lo que la granulometría del material es indispensable.

Para calcular la superficie total del agregado pétreo se utilizan constantes de área las cuales se obtienen de la tabla 3.1.1 dichas constantes están expresadas en metros cuadrados por cada kilogramo de material.

TAMAÑO DEL MATERIAL		CONSTANTE DE ÁREA (m <sup>2</sup> /Kg.)
Pasa Malla N°	Retiene Malla N°	
1 1/2"	3/4"	0.27
3/4"	N°4	0.41
N°4	N°40	2.05
N°40	N°200	15.38
N°200		53.3

Tabla 3.1.1 Constante de Área

Para determinar la superficie total de la muestra se multiplica cada una de las constantes de área por el porcentaje retenido por las mallas indicadas en la tabla anterior teniendo la superficie total de la muestra, se multiplica por un índice asfáltico, el cual está en función de la angulosidad de las partículas y de la absorción de las mismas, el índice asfáltico se toma de la tabla 3.1.2 de acuerdo a las características que tiene nuestro material pétreo.

TIPO DE MATERIAL	ÍNDICE ASFÁLTICO
Grava o arena de río o materiales redondeados de baja absorción.	0.0053
Grava angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción.	0.006
Gravas angulosas o redondeadas, de alta absorción y rocas trituradas de media absorción.	0.007
Rocas trituradas de alta absorción.	0.008

Tabla 3.1.2 Índice Asfáltico

La granulometría de nuestro material pétreo se muestra en la siguiente tabla:

MALLA N°	% QUE PASA
2"	----
1 1/2"	----
1"	100
3/4"	95
1/2"	81
3/8"	66
1/4"	45
N°4	36
N°10	16
N°20	10
N°40	7
N°60	5
N°100	4
N°200	2

Como se puede observar en la tabla 3.2 para el tipo de material que tenemos le corresponde a un índice asfáltico de 0.006 por tratarse de material de baja absorción y del tipo redondeado.

Para el caso de los cementos asfálticos el valor obtenido mínimo se deberá multiplicar por un factor de 1.25, este factor se aplica cuando se utilizan cementos asfálticos sólidos por tener un menor poder de cubrimiento.

Además, las especificaciones nos dicen que hay que incrementar en un 0.1% el contenido mínimo ya multiplicado por el factor anterior.

Para los ensayos de la prueba del Método Marshall es necesario hacer la preparación de especímenes con un contenido de asfalto de:

Contenido calculado -1%

Contenido calculado neto

Contenido calculado +0.5%

Contenido calculado +1%

Contenido calculado +1.5%

Contenido calculado +2%

El cálculo del contenido mínimo de asfalto se realiza en la siguiente tabla:

TAMAÑO DEL MATERIAL		% EN PESO	CONSTANTE DE ÁREA (m <sup>2</sup> /Kg)	SUPERFICIE PARCIAL	ÍNDICE ASFÁLTICO	CONTENIDO DE ASFALTO
Pasa Malla	Retiene Malla					
1 1/2"	3/4"	5	0.27	0.0135	0.006	0.000081
3/4"	N°4	59	0.41	0.2419	0.006	0.0014514
N°4	N°40	29	2.05	0.5945	0.006	0.003567
N°40	N°200	5	15.38	0.769	0.006	0.004614
N°200	Charola	2	53.3	1.066	0.006	0.006396
Total		100		2.6849		0.0161094

$$0.0161094 \times 1.25 \times 100 = 2.013675 = 2 \%$$

A este resultado se le agrega el 0.1 % por especificaciones, por lo tanto el contenido mínimo de cemento asfáltico es de **2.1%**. Este porcentaje es muy bajo por lo cual empezaremos con el **4%**.

Los porcentajes que se emplearan para el cálculo del contenido óptimo de cemento asfáltico por el Método Marshall será:

Contenido calculado -1%	=	3%
Contenido calculado neto	=	<b>4%</b>
Contenido calculado +0.5%	=	4.5%
Contenido calculado +1 %	=	5%
Contenido calculado +1.5 %	=	5.5%
Contenido calculado +2 %	=	6%

### **3.2. MÉTODO MARSHALL**

El Método Marshall se emplea para el proyecto y control de mezclas con un tamaño máximo de 1" (25.4 mm) y cemento asfáltico en plantas estacionarias.

El procedimiento consiste en elaborar especímenes en forma cilíndrica a los cuales se les determinara su peso volumétrico, relación de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación al alcanzar su mayor resistencia (flujo).

La estabilidad es un valor de índice de resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada, los factores que pueden afectar la estabilidad de una carpeta asfáltica son la granulometría y el tipo de agregado pétreo, así como el contenido del cemento asfáltico en la mezcla.

Cabe mencionar que el material pétreo juega un papel muy importante en la estabilidad de la carpeta asfáltica puesto que si este es de mala calidad presentara poca resistencia a la acción de las cargas aplicadas por los vehículos.

El flujo o deformación de una carpeta asfáltica en la prueba Marshall, esta medida en sentido transversal o diametral, este valor es un indicador de flexibilidad y perdida de resistencia a la deformación, puesto que al llegar al punto de máxima resistencia estructural la carpeta asfáltica entra en un estado plástico produciendo la falla de la misma.

Para la realización de las pastillas se utiliza un aparato mecánico que consiste en un pistón compactador de superficie circular de contacto de 98.4 mm de diámetro teniendo una masa de 4,536 gr. que va sostenido a una cadena que va girando en forma vertical que a la altura de 90 cm. aprox. lo deja caer desenganchando el pistón de la cadena, y en la parte

superior del aparato una placa metálica donde se colocan los moldes de compactación como se muestra en la figura 3.2.1



Fig. 3.2.1 Máquina de Compactación de Especímenes

Para la realización de la prueba se utiliza la máquina de compresión Marshall que se muestra en la figura 3.2.2 que tiene una capacidad de 3,000 kg. Accionada con un motor eléctrico, equipada con mordazas semicirculares para aplicar cargas a los especímenes de prueba a una velocidad de 2 pulg. / min. Y provista de un dinamómetro de anillo calibrado para cargas. Un extensómetro para medir la deformación vertical o flujo del espécimen.

También utilizaremos termómetros con graduación de 10 a 200°C, balanza con capacidad de 20 Kg. Balanza con capacidad de 2 kg., cuchara de albañil, espátula, parrilla eléctrica o de gas, charola para la mezcla, pinzas para vasos y guantes.



Para cada contenido de cemento se hacen tres pastillas, cada una de ellas requiere de 1100 gr. de material pétreo. El peso y tamaño de las partículas se hace conforme a la distribución de la granulometría como se muestra en la tabla 3.2.1

MALLA N°		% PARCIAL RETENIDO	PESO TOTAL DE LA MUESTRA (GR.)	PESO DEL MATERIAL (GR.)
Pasa	Retiene			
1"	3/4 "	5	1100	55
3/4 "	1/2 "	14	1100	154
1/2 "	3/8 "	15	1100	165
3/8 "	1/4 "	21	1100	231
1/4 "	N°4	9	1100	99
N°4	N°10	20	1100	220
N°10	N°20	6	1100	66
N°20	N°40	3	1100	33
N°40	N°60	2	1100	22
N°60	N°100	1	1100	11
N°100	N°200	2	1100	22
N°200	Charola	2	1100	22
<b>Total</b>		<b>100</b>		<b>1100</b>

Tabla 3.2.1 Composición granulométrica que deberá tener el material pétreo en cada espécimen o pastilla

### Procedimiento de la prueba

Se calienta el material pétreo a una temperatura de 170°C y el cemento asfáltico a 150°C para realizar la mezcla asfáltica y obtener un mejor cubrimiento de partículas. Se vierte el cemento asfáltico a las partículas retenidas por la malla N°4 y se mezcla hasta cubrir todas las partículas y después se le agrega el tamizado de la malla N°4 para logra una mejor homogenización de todas las partículas y el cemento asfáltico.

Para determinar el peso del cemento asfáltico para cada contenido y para cada espécimen se observa en la tabla 3.2.2

CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO	PESO DEL MATERIAL PÉTREO (GR.)	PESO DE CEMENTO ASFÁLTICO (GR.)
3.00%	1100	33
4.00%	1100	44
4.50%	1100	49.5
5.00%	1100	55
5.50%	1100	60.5
6.00%	1100	66

Tabla 3.2.2 contenido en peso de cemento asfáltico por cada espécimen

Se calienta el molde de compactación, que consiste en una placa base y un collarín, en el horno a una temperatura de 100°C.



Fig. 3.2.3 Molde



Fig. 3.2.4 Placa base más collarín

Estando el equipo caliente se vierte la mezcla anteriormente, se coloca el molde en la máquina y se enciende y se aplican 75 golpes. Posteriormente se quita el collarín y se da vuelta al molde se fija nuevamente a la máquina para aplicarle otros 75 golpes con el pistón para obtener una compactación de 14 Kg/cm<sup>2</sup> todo este procedimiento no debe de hacerse a una temperatura inferior a los 140°C y en ningún caso se recalentara la muestra.

Se separa el molde que contiene el espécimen y se deja enfriar el tiempo necesario para después extraer el espécimen del molde sin ningún tipo de deformación. Se deja en una superficie plana y horizontal donde permanecerá de 12 a 24 horas a temperatura ambiente.

Los especímenes deben de tener una altura promedio de 63.5 mm con una tolerancia de 3.2 mm. En caso de no tener la altura especificada se aplica un factor de corrección los cuales están en la tabla 3.2.3.

ALTURA DEL ESPÉCIMEN (MM)	FACTOR DE CORRECCIÓN
55	1.27
56	1.23
57	1.2
58	1.16
59	1.13
60	1.1
61	1.07
62	1.04
63	1.01
63.5	1
64	0.98
65	0.96
66	0.94
67	0.92
68	0.9
69	0.88
70	0.86
71	0.84

Tabla 3.2.3 Factores de corrección para la altura de los especímenes

Para todos los especímenes faltantes se le aplica el procedimiento anterior.

Hecho lo anterior se produce a registrar su peso en aire, su altura y su peso sumergido en agua para cada uno.

Para la realización de este último el del peso sumergido en el agua, el espécimen se tiene que impermeabilizar, con el fin de que el agua no penetre el interior del espécimen. Para este proceso se utilizara la parafina la cual debemos de tener su peso específico relativo.

Se calienta la parafina hasta que este liquida y se va sumergiendo cada uno de los especímenes por menos de 5 segundos para evitar que el calor afecte el espécimen, se deja en reposo hasta que se solidifique totalmente la parafina y se pesa en el aire, después de esto se vuelve a pesar pero sumergido en el agua.

Una vez registrados todos los datos anteriores, se sumergen todos los especímenes en el baño de agua, a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 30 minutos como se muestra en la figura 3.2.5



Fig. 3.2.5 Especímenes en baño de agua

Transcurrido este tiempo se sacan de uno en uno los especímenes, se sacan superficialmente y se colocan sobre el cabezal inferior y se centra en el mismo, se monta el cabezal superior y en esta forma se lleva al conjunto de la máquina de compresión Marshall, en donde se coloca y se centra. Se instala sobre la varilla de guía el extensómetro para medir el flujo, se ajusta a cero su caratula y durante la prueba se sujeta con el casquillo, oprimiendo con el cabezal.

Se acciona la maquina con una velocidad de deformación constante de 2 pulg/min. Hasta que se presenta la carga máxima que es cuando se produce la falla del espécimen a la temperatura de prueba. El valor de la estabilidad Marshall será la carga máxima y el flujo será la deformación sufrida por dicha carga, en milímetros.

Se determina la estabilidad y el flujo de cada uno de los especímenes restantes, con el mismo procedimiento indicado anteriormente.

Para la obtención del contenido óptimo de asfalto se toma el criterio siguiente:

- a).- se determina el peso específico teórico máximo de cada una de las mezclas asfálticas consideradas en el estudio, de acuerdo al contenido de cemento asfáltico.
- b).- se calcula el porcentaje de vacíos del material pétreo, VAM, de cada uno de los especímenes elaborados.
- c).- se calcula el porcentaje de vacíos de la mezcla compactado, que forma cada uno de los especímenes.
- d).- se determina cada serie de especímenes correspondiente a un mismo porcentaje, la proporción de cemento asfáltico, el peso volumétrico, porcentaje de vacíos del material pétreo, porcentaje de vacíos de la mezcla compactada, estabilidad y flujo.

e).- se corrigen los valores de estabilidad de los especímenes, con la tabla 3.2.3.

f).- los especímenes deberán cumplir con las siguientes tolerancias:

- $\pm$  5% de contenido de asfalto
- $\pm$  2% del peso volumétrico
- $\pm$  10% de la estabilidad
- $\pm$  20% del flujo

g).- utilizando el promedio de los valores que no excedan las tolerancias indicadas en el punto anterior, se dibujaran las gráficas que a continuación se indican:

- Estabilidad Vs. Contenido de Asfalto
- Porcentaje de Vacíos de la muestra Compactada Vs. Contenido de Asfalto
- Flujo Vs. Contenido de Asfalto
- Porcentaje de Vacíos del Material Pétreo Vs. Contenido de Asfalto
- Peso Volumétrico Vs. Contenido de Asfalto

**TABLA DE CÁLCULO DEL METODO MARSHALL**

ENSAJE	PROBETA	% DE C.A. POR PESO DE AGREGADO	% DE ASFALTO POR PESO DE MEZCLA	PESO (GRS)				VOLUMEN (CM3)				ESPECIMEN PESO VOLUMET. (KG/M <sup>3</sup> )	DENSIDAD TEORICA MAXIMA	VOLUMENES % TOTAL				% VACIOS				ESTABILIDAD (KG)				FLUJO EN (M.M)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
				c	d	e	f	g	h	i	j			k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v		w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj	ak	al	am	an	ao	ap	aq	ar	as	at	au	av	aw	ax	ay	az	ba	bb	bc	bd	be	bf	bg	bh	bi	bj	bk	bl	bm	bn	bo	bp	bq	br	bs	bt	bu	bv	bw	bx	by	bz	ca	cb	cc	cd	ce	cf	cg	ch	ci	cj	ck	cl	cm	cn	co	cp	cq	cr	cs	ct	cu	cv	cw	cx	cy	cz	da	db	dc	dd	de	df	dg	dh	di	dj	dk	dl	dm	dn	do	dp	dq	dr	ds	dt	du	dv	dw	dx	dy	dz	ea	eb	ec	ed	ee	ef	eg	eh	ei	ej	ek	el	em	en	eo	ep	eq	er	es	et	eu	ev	ew	ex	ey	ez	fa	fb	fc	fd	fe	ff	fg	fh	fi	fj	fk	fl	fm	fn	fo	fp	fq	fr	fs	ft	fu	fv	fw	fx	fy	fz	ga	gb	gc	gd	ge	gf	gg	gh	gi	gj	gk	gl	gm	gn	go	gp	gq	gr	gs	gt	gu	gv	gw	gx	gy	gz	ha	hb	hc	hd	he	hf	hg	hh	hi	hj	hk	hl	hm	hn	ho	hp	hq	hr	hs	ht	hu	hv	hw	hx	hy	hz	ia	ib	ic	id	ie	if	ig	ih	ii	ij	ik	il	im	in	io	ip	iq	ir	is	it	iu	iv	iw	ix	iy	iz	ja	jb	jc	jd	je	jf	fg	fh	fi	fj	fk	fl	fm	fn	fo	fp	fq	fr	fs	ft	fu	fv	fw	fx	fy	fz	ka	kb	kc	kd	ke	kf	kg	kh	ki	kj	kl	km	kn	ko	kp	kq	kr	ks	kt	ku	kv	kw	kx	ky	kz	la	lb	lc	ld	le	lf	lg	lh	li	lj	lk	lm	ln	lo	lp	lq	lr	ls	lt	lu	lv	lw	lx	ly	lz	ma	mb	mc	md	me	mf	mg	mh	mi	mj	mk	ml	mn	mo	mp	mq	mr	ms	mt	mu	mv	mw	mx	my	mz	na	nb	nc	nd	ne	nf	ng	nh	ni	nj	nk	nl	nm	no	np	nq	nr	ns	nt	nu	nv	nw	nx	ny	nz	oa	ob	oc	od	oe	of	og	oh	oi	oj	ok	ol	om	on	oo	op	oq	or	os	ot	ou	ov	ow	ox	oy	oz	pa	pb	pc	pd	pe	pf	pg	ph	pi	pj	pk	pl	pm	pn	po	pp	pq	pr	ps	pt	pu	pv	pw	px	py	pz	qa	qb	qc	qd	qe	qf	qg	qh	qi	qj	qk	ql	qm	qn	qo	qp	qq	qr	qs	qt	qu	qv	qw	qx	qy	qz	ra	rb	rc	rd	re	rf	rg	rh	ri	rj	rk	rl	rm	rn	ro	rp	rq	rr	rs	rt	ru	rv	rw	rx	ry	rz	sa	sb	sc	sd	se	sf	sg	sh	si	sj	sk	sl	sm	sn	so	sp	sq	sr	ss	st	su	sv	sw	sx	sy	sz	ta	tb	tc	td	te	tf	tg	th	ti	tj	tk	tl	tm	tn	to	tp	tq	tr	ts	tt	tu	tv	tw	tx	ty	tz	ua	ub	uc	ud	ue	uf	ug	uh	ui	uj	uk	ul	um	un	uo	up	uq	ur	us	ut	uu	uv	uw	ux	uy	uz	va	vb	vc	vd	ve	vf	vg	vh	vi	vj	vk	vl	vm	vn	vo	vp	vq	vr	vs	vt	vu	vv	vw	vx	vy	vz	wa	wb	wc	wd	we	wf	wg	wh	wi	wj	wk	wl	wm	wn	wo	wp	wq	wr	ws	wt	wu	wv	ww	wx	wy	wz	xa	xb	xc	xd	xe	xf	yg	yh	yi	yj	yk	yl	ym	yn	yo	yp	yq	yr	ys	yt	yu	yv	yw	yx	yy	yz	za	zb	zc	zd	ze	zf	zg	zh	zi	zj	zk	zl	zm	zn	zo	zp	zq	zr	zs
-1.00%	1	3.00	2.51	1.044.30	1.027.50	540.00	21.80	504.30	25.06	473.24	2.034	2.31	6.00	26.31	7.83	0.53	43.26	6.40	522.08	0.33	605.64	0.10	2.75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
-1.00%	2	3.00	2.51	1.071.50	1.045.50	551.50	26.00	520.00	29.39	490.11	2.033	2.31	6.00	26.29	7.70	0.71	43.30	6.43	530.20	0.36	599.37	0.10	3.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
-1.00%	3	3.00	2.51	1.076.00	1.064.00	557.00	22.00	539.00	25.23	493.71	2.035	2.31	6.01	26.36	7.83	0.54	44.06	6.53	660.96	0.36	604.52	0.10	3.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
med	1	4.00	3.35	1.067.40	1.046.00	538.00	21.40	509.40	24.60	484.30	2.038	2.28	8.02	26.44	5.54	0.56	50.10	6.44	619.34	0.33	615.34	0.10	3.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
med	2	4.00	3.35	1.076.00	1.062.00	552.50	24.00	523.50	27.59	495.91	2.071	2.28	7.38	24.93	7.10	0.01	52.52	6.74	777.60	0.32	765.39	0.05	4.45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
med	3	4.00	3.35	1.060.30	1.037.50	539.30	17.30	510.50	20.46	490.04	2.007	2.28	7.33	24.41	7.36	0.59	50.23	6.64	738.70	0.34	694.40	0.350	3.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0.50%	1	4.50	4.31	1.079.00	1.045.50	538.50	33.50	540.50	38.51	501.83	2.083	2.27	8.67	23.04	8.23	0.36	51.00	7.00	777.60	0.36	668.74	0.12	3.10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0.50%	2	4.50	4.31	1.068.00	1.034.00	542.00	24.00	516.00	27.59	488.41	2.107	2.27	8.31	24.41	6.78	0.59	58.51	6.50	816.48	0.36	783.32	0.370	3.35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0.50%	3	4.50	4.31	1.061.30	1.044.00	555.60	25.30	514.30	24.77	484.53	2.055	2.27	8.36	25.91	5.12	0.09	63.63	6.56	777.60	0.34	730.94	0.10	3.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
TL	1	5.00	4.76	1.063.50	1.044.00	553.50	19.50	510.00	22.41	487.59	2.141	2.25	9.35	24.37	5.19	0.03	65.53	6.45	855.36	0.37	829.70	0.10	3.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
TL	2	5.00	4.76	1.078.30	1.062.50	553.50	26.30	525.30	30.23	495.07	2.026	2.25	9.78	24.36	5.36	0.64	62.56	6.70	816.48	0.39	786.67	0.10	3.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
TL	3	5.00	4.76	1.064.30	1.037.50	545.00	26.30	519.30	30.30	488.50	2.024	2.25	9.77	24.23	5.95	0.72	62.16	6.67	777.60	0.32	765.39	0.10	3.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1.00%	1	5.50	5.21	1.077.00	1.044.50	557.80	32.50	519.20	37.36	481.84	2.168	2.24	10.32	25.61	3.47	0.39	75.39	6.76	933.12	0.30	839.31	0.10	3.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1.00%	2	5.50	5.21	1.075.50	1.046.50	553.00	29.30	522.60	33.45	489.15	2.039	2.24	10.78	24.50	4.73	0.50	69.50	6.64	894.24	0.34	840.59	0.10	3.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1.00%	3	5.50	5.21	1.063.80	1.047.50	547.70	25.60	520.40	29.43	490.57	2.023	2.24	10.70	23.36	5.45	0.14	66.26	6.63	972.00	0.34	933.69	0.10	3.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2.00%	1	6.00	5.66	1.060.00	1.040.50	548.00	19.50	512.00	22.41	489.59	2.025	2.22	11.62	23.94	4.84	0.46	70.51	6.40	777.60	0.33	762.06	0.145	3.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2.00%	2	6.00	5.66	1.063.00	1.040.50	542.30	22.50	520.80	25.36	484.24	2.065	2.22	11.51	22.75	5.73	0.25	66.76	6.65	816.48	0.35	816.48	0.10	3.81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2.00%	3	6.00	5.66	1.063.60	1.043.50	550.00	20.80	519.60	23.80	490.50	2.027	2.22	11.63	23.63	4.74	0.37	71.06	6.35	777.60	1.00	777.60	0.10	3.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
											2.119			3.30	16.69		69.48				777.77	4.145	3.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

**GRAFICAS DE LA PRUEBA MARSHALL**

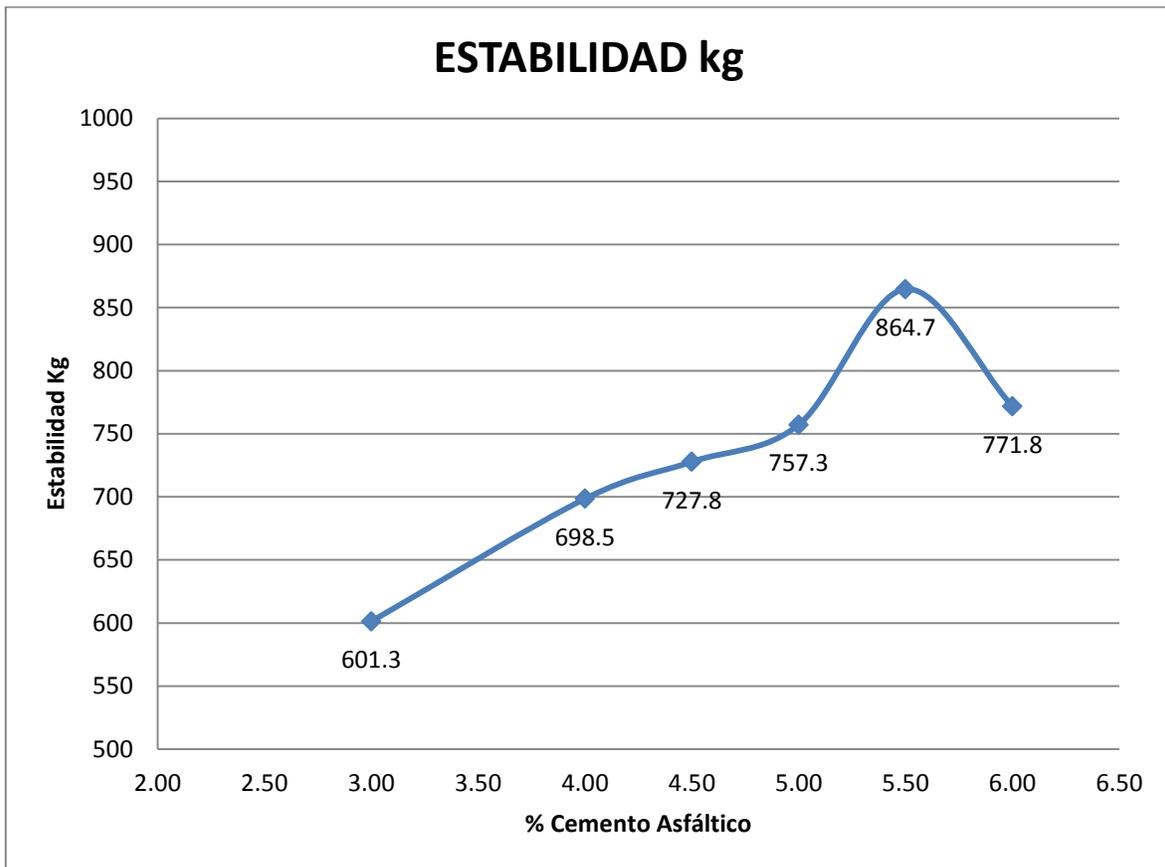
ESTABILIDAD kg	
%C.A.	Estabilidad
3	601.34
4	698.54
4.5	727.83
5	757.25
5.5	864.69
6	771.77

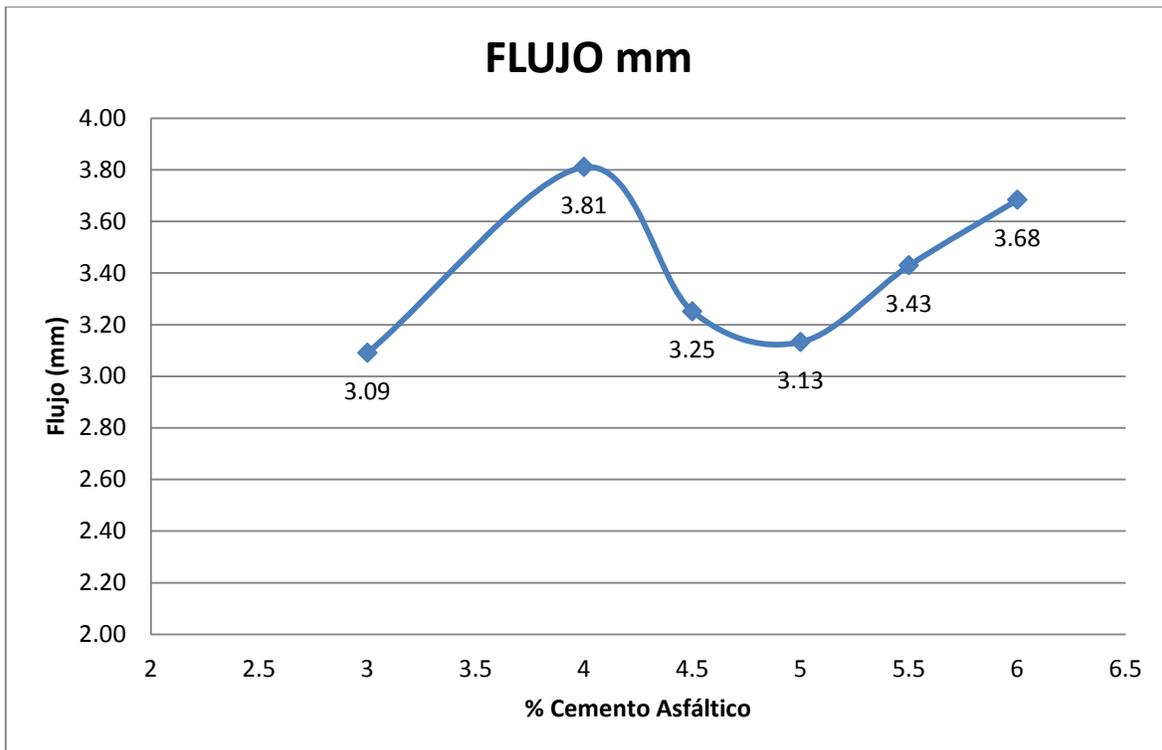
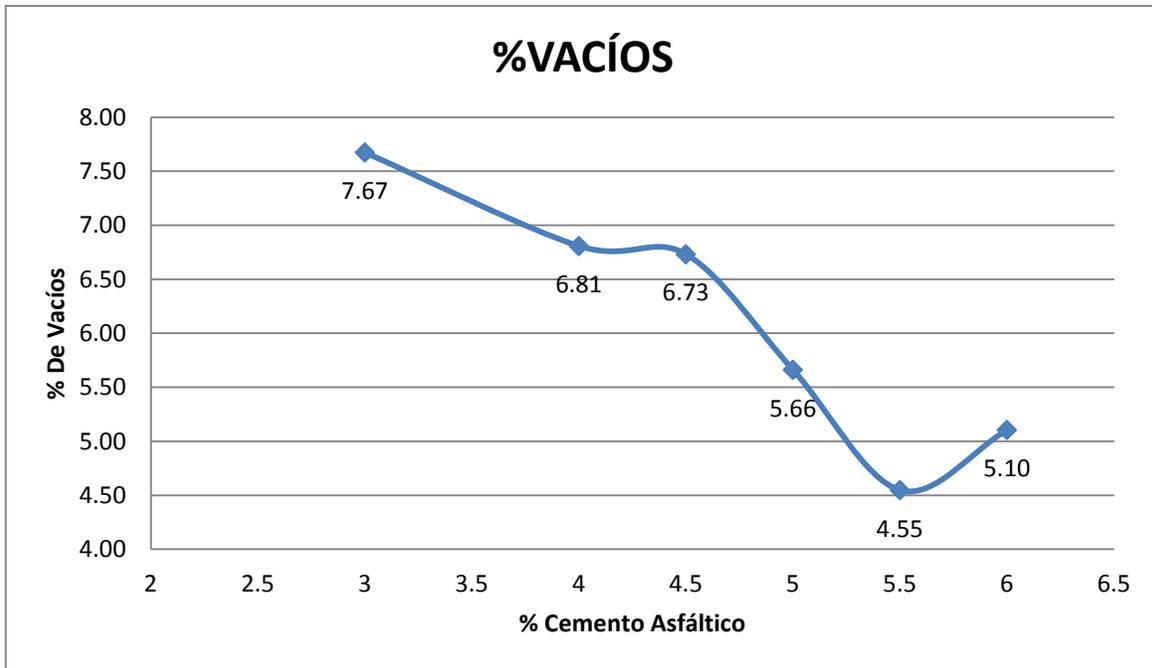
%VACIOS	
%C.A.	% de Vacíos
3	7.67
4	6.81
4.5	6.73
5	5.66
5.5	4.55
6	5.10

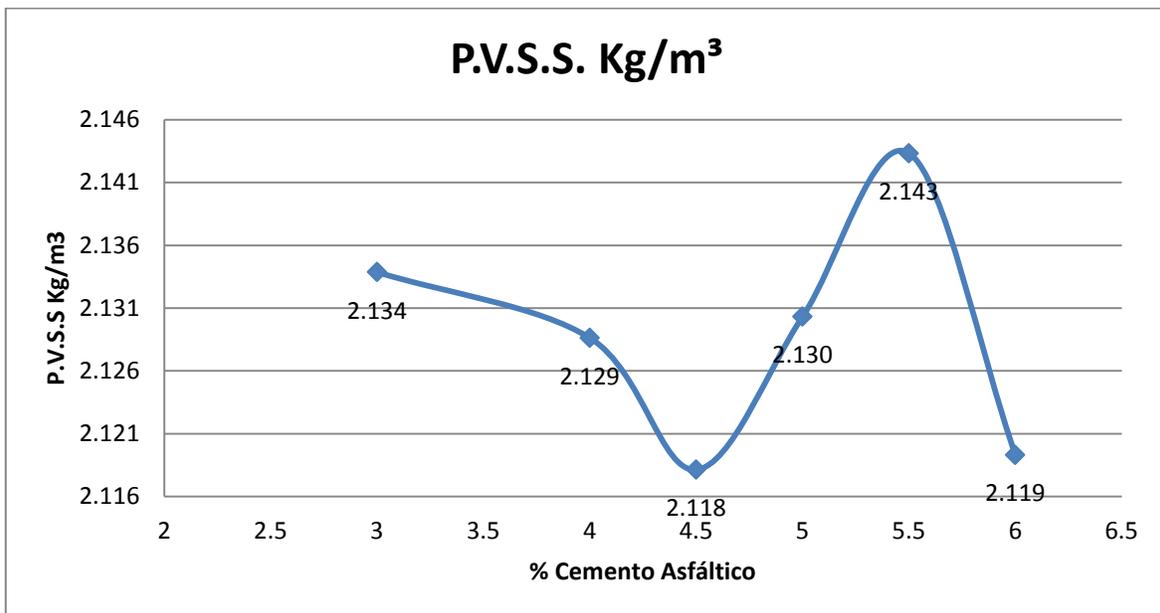
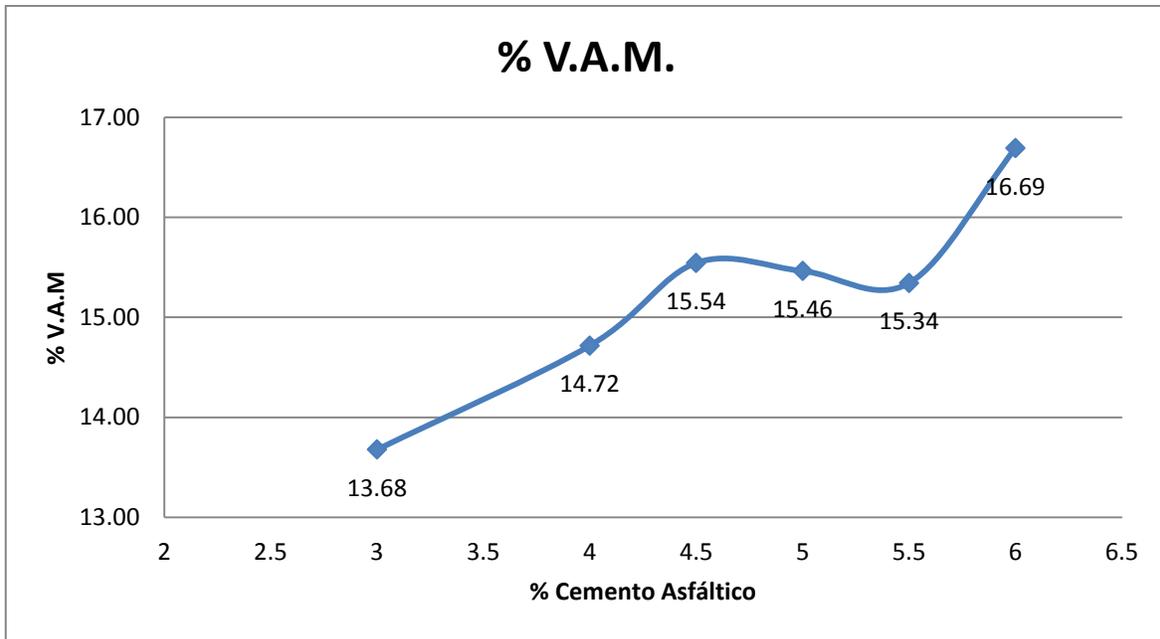
FLUJO mm	
%C.A.	Flujo mm
3	3.09
4	3.81
4.5	3.25
5	3.13
5.5	3.43
6	3.68

% V.A.M.	
%C.A.	% V.A.M.
3	13.68
4	14.72
4.5	15.54
5	15.46
5.5	15.34
6	16.69

P.V.S.S. Kg/m <sup>3</sup>	
%C.A.	PVSS
3	2.134
4	2.129
4.5	2.118
5	2.130
5.5	2.143
6	2.119







CONCEPTO	NORMA SCT.	ENSAYE
ESTABILIDAD	800 Kg Mínimo	864.69 Kg
% VACIOS	3.0 a 5.0 %	4.55%
FLUJO	2.0 a 3.5 mm	3.43 mm
%V.A.M.	14.0 % Mínimo	15.34%
% P.V.V.S	SIN NORMA	2143.49Kg/M3
%V.A.F	65-75%	70.55%

Tabla 3.2.4 Requisitos de Calidad para Mezclas Asfálticas, diseñadas con el Método Marshall. Para una vida útil del pavimento de ( $10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ) de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

## CONCLUSIONES

- Se calculó el contenido mínimo de asfalto analíticamente, el cual resulto de 2.1 % el cual es muy bajo y no se adhieren todas las partículas al cemento asfáltico por lo que decidimos empezar con un contenido de asfalto del 4% el cual se observa como en la tabla del Método Marshall o en la gráfica se obtiene una estabilidad baja de 601.3 Kg por lo que este porcentaje de asfalto es el más desfavorable.
- Por otra parte se puede observar que la estabilidad en unos de los especímenes a penas cumple con lo marcado en las especificaciones que es de 800 kg como mínimo, en nuestro caso la mayor estabilidad que se tuvo fue de 864.69 Kg con un contenido de asfalto del 5.5% lo cual nos indica que para este contenido de cemento asfáltico nos da una resistencia estructural adecuada, con forme a las especificaciones para este tipo de carpetas.
- Las deformaciones están en el rango establecido por las especificaciones que es de 2.0 – 3.5 mm y como se puede observar en la tabla de resultados el flujo de nuestro ensaye fue 3.43 mm por lo cual esto nos indica que a pesar de su granulometría que se sale un poco de lo establecido también por las normas de la SCT esto no afecto.
- El % VACÍOS, % V.A.M., P.V.M., %V.A.F., también están en el rango de las especificaciones para este tipo de carpeta asfáltica por lo que se hace apta para ello.
- Con lo descrito anteriormente y tomando en cuenta los resultados se puede concluir que el **Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico es de 5.5%**, ya que tenemos la mayor estabilidad, la menor deformación, y los demás parámetros ya mencionados.

**CAPITULO 4:**  
**MEZCLA ASFÁLTICA**  
**MODIFICADA CON**  
**NEUMÁTICO**  
**RECICLADO MOLIDO**

## 4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudiara la mezcla asfáltica pero ahora modificada con un aditivo que nos proporcione una mejora en las características de adherencia entre las partículas del material pétreo y el cemento asfáltico y compararla con la no modificada.

En este ensaye utilizaremos neumático reciclado molido (caucho molido) ya que el objetivo es mejorar el desempeño de los pavimentos mediante el aumento de rigidez a altas temperaturas (reduciendo la deformación permanente de las marcas de las ruedas), aumento de la flexibilidad (retardando la aparición de fisuras) y aumento en la impermeabilización.

Otra de las cosas importantes es el reciclado de las llantas usadas, es minimizar el problema de disposición de locales inadecuados, pues los neumáticos utilizados son descartados, además de ocupar mucho espacio en los rellenos sanitarios, algunos acaban sirviendo de locales para procreación de insectos y otros vectores de enfermedades, y algunos otros los queman y provocan grandes cantidades de esmog que a su vez contaminan el ecosistema, lo que no es muy conveniente para los seres vivientes de este planeta.

El caucho de las llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como proceso húmedo y proceso seco. En el proceso seco que es el que utilizaremos consiste en que el caucho es usado como una porción del agregado fino. La técnica de molienda más común es el proceso ambiental que consiste en la trituración mecánica.

La llanta molida se ha convertido en un recurso muy popular y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas.

El cuacho pose valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto.

Alguno de estos son:

**Negro de humo:** este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie, permitiendo quintuplicar la duración de la llanta. En las mezclas asfálticas ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo de ligante y ayudar a disminuir su envejecimiento.

**Antioxidantes:** compuesto que retarda el deterioro del caucho natural causado por la oxidación. Algunas de las sustancias usadas son los estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros.

**Aminas:** son adicionadas durante el proceso de vulcanizado y están estrechamente relacionados con los componentes de antiadherencia. Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.

**Aceites aromáticos:** estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto.

### **Características físicas del caucho**

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

Para la obtención de diversos artículos y principalmente el que nos interesa que son los neumáticos, se añade:

Agentes vulcanizantes.

Cargas distintas a mejorar la resistencia a la tracción.

Pigmentos para ocultar la coloración propia o para conferirle un color determinado.

“Perfumes” para atenuar el olor de ciertos componentes de la mezcla. El caucho se desmenuza y luego los fragmentos se adhieren entre sí y absorben los diversos ingredientes, dando finalmente una masa plástica. A esta mezcla se le da forma por molde en prensa, extrusión o calandrado, todos los productos son vulcanizados.

### **El caucho sintético**

El caucho de plantación sufre la competencia de los elastómeros sintéticos, debido a razones económicas, técnicas y estratégicas. La búsqueda de productos sintéticos comenzó en la primera guerra mundial, siendo pionera en la investigación Alemana, pero hasta 1930 se obtuvieron los “S” y “N”, polímeros del butadieno, susceptibles de ser vulcanizados.

Dado que se obtiene de derivados del petróleo, es considerado como una rama de la petroquímica. Los tipos "S" su componente en la naturaleza son Copolímeros del butadieno y del estireno y son aplicados principalmente para hacer neumáticos.

Los tipos de cauchos más empleados para la fabricación de neumáticos son:

- Cauchos naturales (NR).
- Estireno- Butadieno (SBR).
- Polibutadienos (BR).
- Polisoprenos (IR).

La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionan elasticidad y la sintética estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias de tránsito.

Dado lo anterior cabe mencionar que dicho material requiere de un estudio de calidad para conocer sus características físicas y químicas.

## **4.2. EMPLEO DEL NEUMÁTICO RECICLADO MOLIDO EN EL ENSAYE MARSHALL**

Para nuestro ensaye se utilizara un 0.5%, 1%, y 1.5% de caucho molido en relación del peso del material pétreo.

El caucho molido se le aplica directamente a la mezcla, el cemento asfáltico y el material pétreo a una temperatura no menor a los 160 °C

Para hacer la mezcla asfáltica se utiliza la misma granulometría de material pétreo que se empleó en la prueba Marshall del capítulo anterior.

MALLA N°		% PARCIAL RETENIDO	PESO TOTAL DE LA MUESTRA (GR.)	PESO DEL MATERIAL (GR.)
Pasa	Retiene			
1"	3/4 "	5	1100	55
3/4 "	1/2 "	14	1100	154
1/2 "	3/8 "	15	1100	165
3/8 "	1/4 "	21	1100	231
1/4 "	N°4	9	1100	99
N°4	N°10	20	1100	220
N°10	N°20	6	1100	66
N°20	N°40	3	1100	33
N°40	N°60	2	1100	22
N°60	N°100	1	1100	11
N°100	N°200	2	1100	22
N°200	Charola	2	1100	22
<b>Total</b>		<b>100</b>		<b>1100</b>

Para la elaboración de los especímenes se aplica de la misma manera, como se indica en la Prueba Marshall del capítulo anterior, con la diferencia de que cuando ya esté bien mezclado se le agrega el porcentaje de caucho molido a la muestra y se vuelve a mezclar hasta tener una mezcla uniforme.

Para esta aplicación de caucho molido, se utilizara solo el Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico que resulto de 5.5% para todos los especímenes.

En este caso se realizaron 12 especímenes, tres para cada porcentaje de neumático reciclado molido, volviendo hacer el óptimo sin neumático.

MÉTODO MARSHALL CON NEUMÁTICO MOLIDO REICLADO

ENSAYE	PROBETA	% DE C.A. POR PESO DE AGREGADO	% DE ASFALTO POR PESO DE MEZCLA	PESO (GRS)				VOLUMEN (CM)				ESPECIMEN PESO VOLUMET. (KG/M <sup>3</sup> )	DENSIDAD TEORICA MAXIMA	VOLUMENES % TOTAL				% VACIOS		ESTABILIDAD (KG)					FLUJO EN (M.M)	FLUJO EN (0.07)
				c	d	e	f	g	h	i	j			k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u		
0.50%	1	5.50	5.21	1.051.30	1.047.50	542.00	21.80	52.730	25.06	502.24	2.05	2.24	10.51	82.37	7.02	0.53	59.59	24.00	6.45	493.02	0.96	885.80	0.24	3.5		
	2	5.50	5.21	1.074.50	1.050.50	555.50	24.00	58.00	27.59	491.41	2.14	2.24	10.77	84.43	4.80	5.57	61.15	23.50	6.46	513.88	0.96	877.03	0.25	3.38		
	3	5.50	5.21	1.075.00	1.052.00	558.00	23.00	57.00	26.44	490.56	2.14	2.24	10.80	84.51	4.50	5.31	70.58	25.00	6.55	572.00	0.94	913.68	0.25	3.08		
0.50%	1	5.50	5.21	1.077.40	1.053.00	558.00	24.40	58.40	28.05	490.35	2.15	2.24	10.82	84.31	4.37	5.18	71.22	26.00	6.48	1.070.88	0.96	970.44	0.42	3.35		
	2	5.50	5.21	1.076.00	1.055.00	558.50	21.00	57.50	24.14	483.36	2.14	2.24	10.77	84.45	4.77	5.55	61.23	25.00	6.76	572.00	0.90	874.80	0.55	3.33		
	3	5.50	5.21	1.077.30	1.058.50	559.80	38.80	57.50	44.60	472.90	2.20	2.24	11.06	86.73	2.21	13.27	83.36	25.50	6.66	951.44	0.92	972.02	0.38	3.30		
1.00%	1	5.50	5.21	1.078.00	1.050.50	557.50	28.50	57.50	37.76	488.74	2.15	2.24	10.83	84.39	4.28	5.11	71.65	27.50	6.60	1.061.70	0.94	1.005.05	0.27	3.40		
	2	5.50	5.21	1.065.00	1.041.00	555.00	24.00	50.00	27.59	481.41	2.16	2.24	10.89	85.40	3.71	4.60	74.61	28.00	6.55	1.088.64	0.94	1.023.32	0.34	3.33		
	3	5.50	5.21	1.061.90	1.045.00	556.60	24.90	53.30	28.62	484.68	2.16	2.24	10.86	85.6	3.99	4.85	73.14	28.00	6.56	1.088.64	0.94	1.023.32	0.30	3.28		
1.50%	1	5.50	5.21	1.074.50	1.048.00	555.50	26.50	58.00	30.46	487.54	2.15	2.24	10.83	84.50	4.28	5.10	71.68	27.00	6.70	1.041.76	0.92	965.78	0.25	3.38		
	2	5.50	5.21	1.078.80	1.055.50	559.50	23.30	58.30	24.78	487.50	2.14	2.24	10.79	84.64	4.57	5.36	70.27	26.30	6.72	1.022.54	0.92	940.74	0.30	3.40		
	3	5.50	5.21	1.071.00	1.044.50	553.00	26.80	58.30	30.80	487.50	2.14	2.24	10.79	84.62	4.59	5.38	70.07	26.50	6.75	1.020.32	0.90	927.29	0.25	3.43		
										2.145				4.48	5.28	70.71					944.60	0.27	3.40			

**GRAFICAS DEL MÉTODO MARSHALL CON ESPECÍMENES MODIFICADOS**

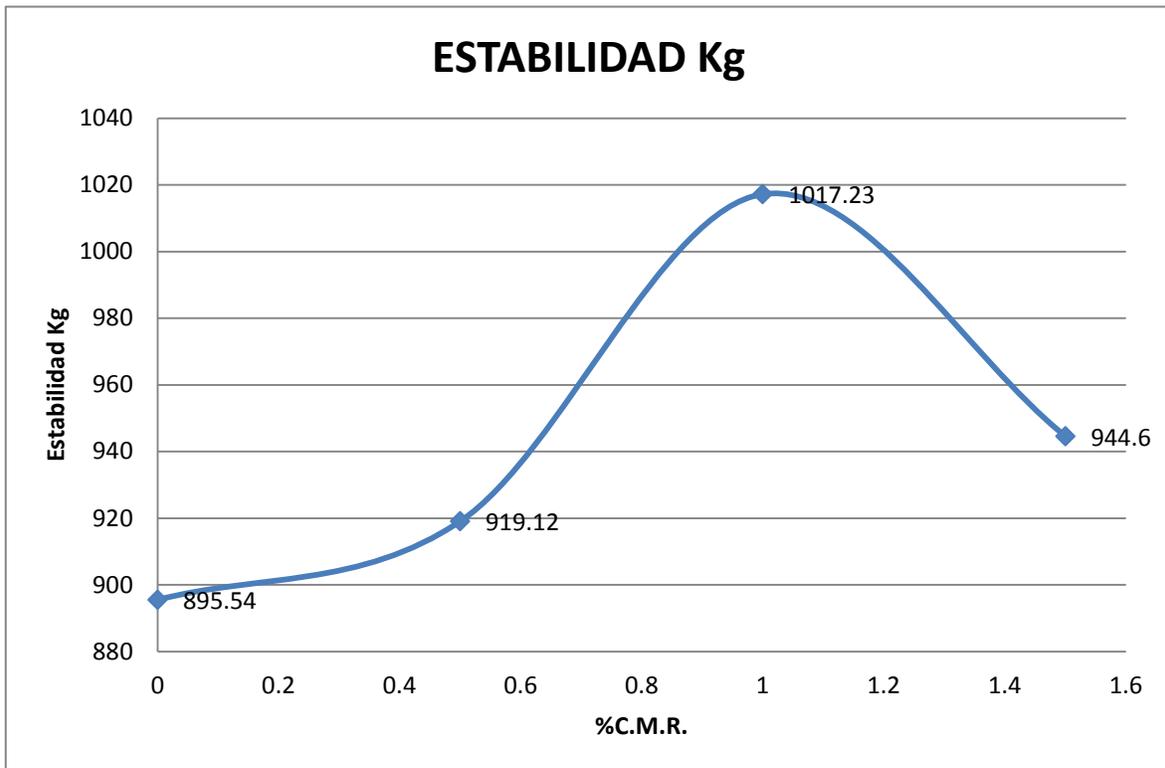
ESTABILIDAD kg	
%C.M.R.	Estabilidad
0	895.54
0.5	919.12
1	1017.23
1.5	944.6

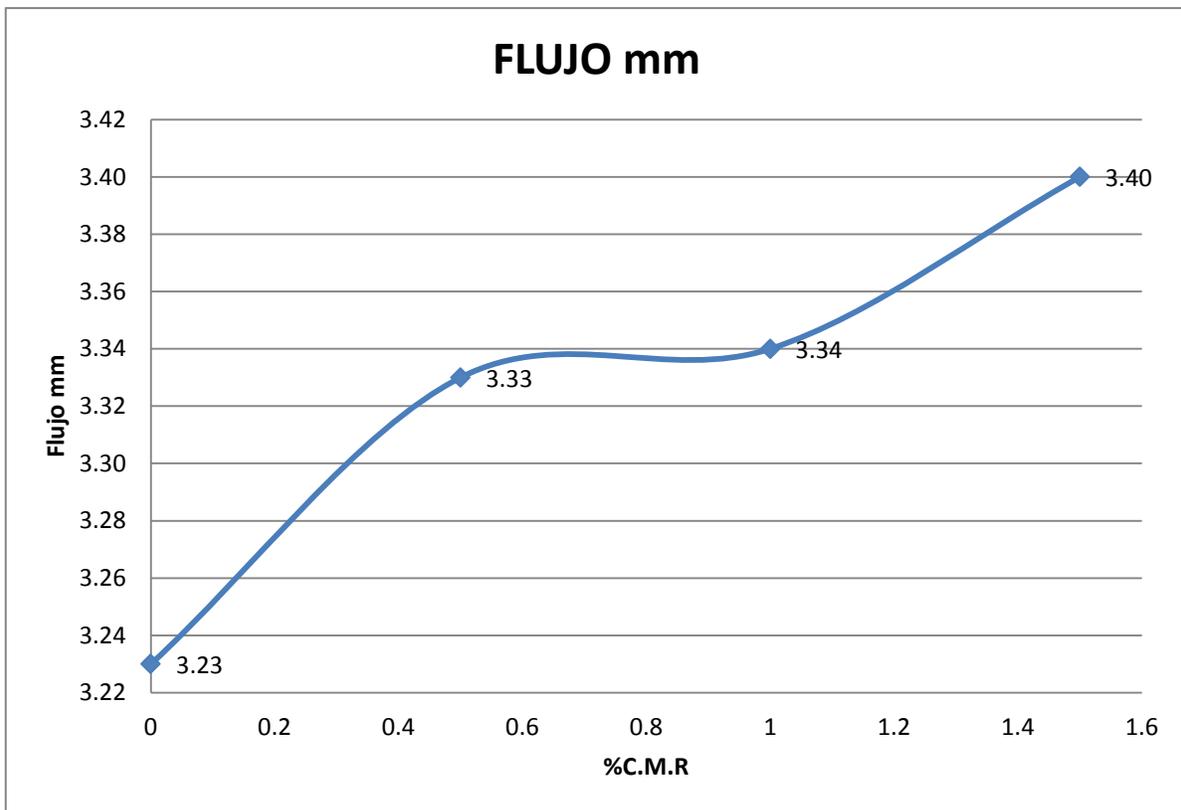
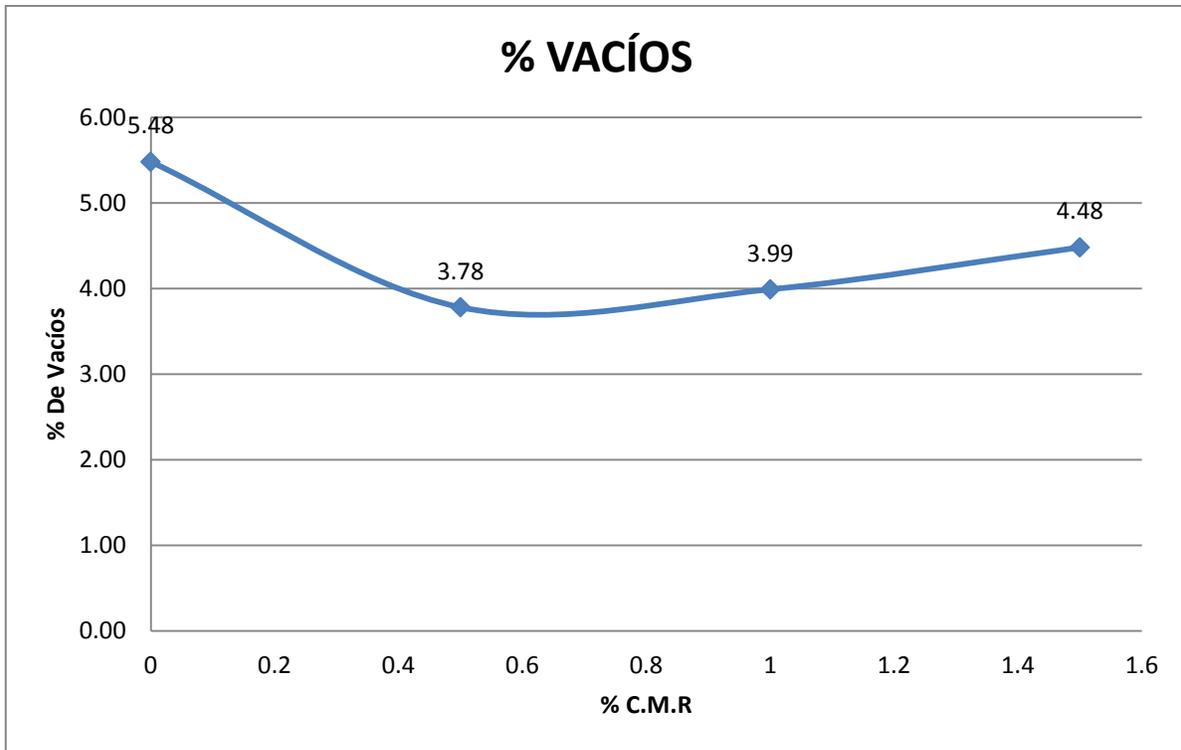
%VACÍOS	
%C.M.R.	% de Vacíos
0	5.48
0.5	3.78
1	3.99
1.5	4.48

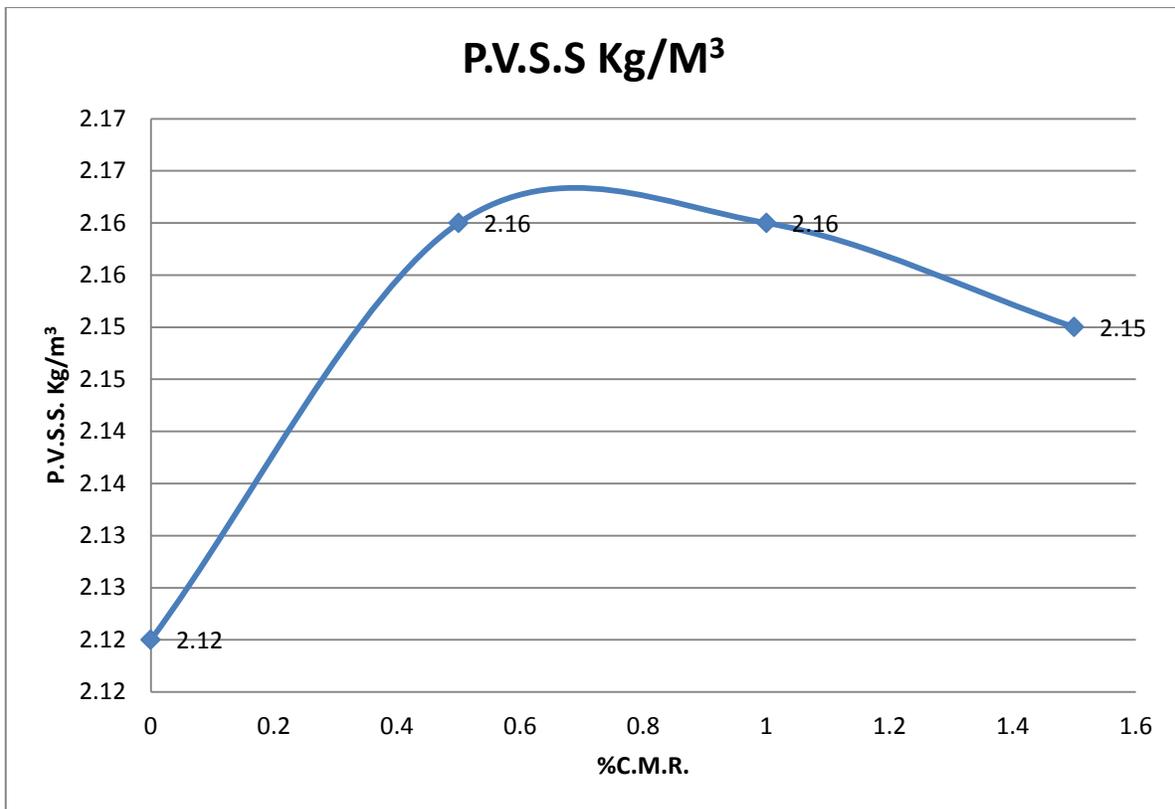
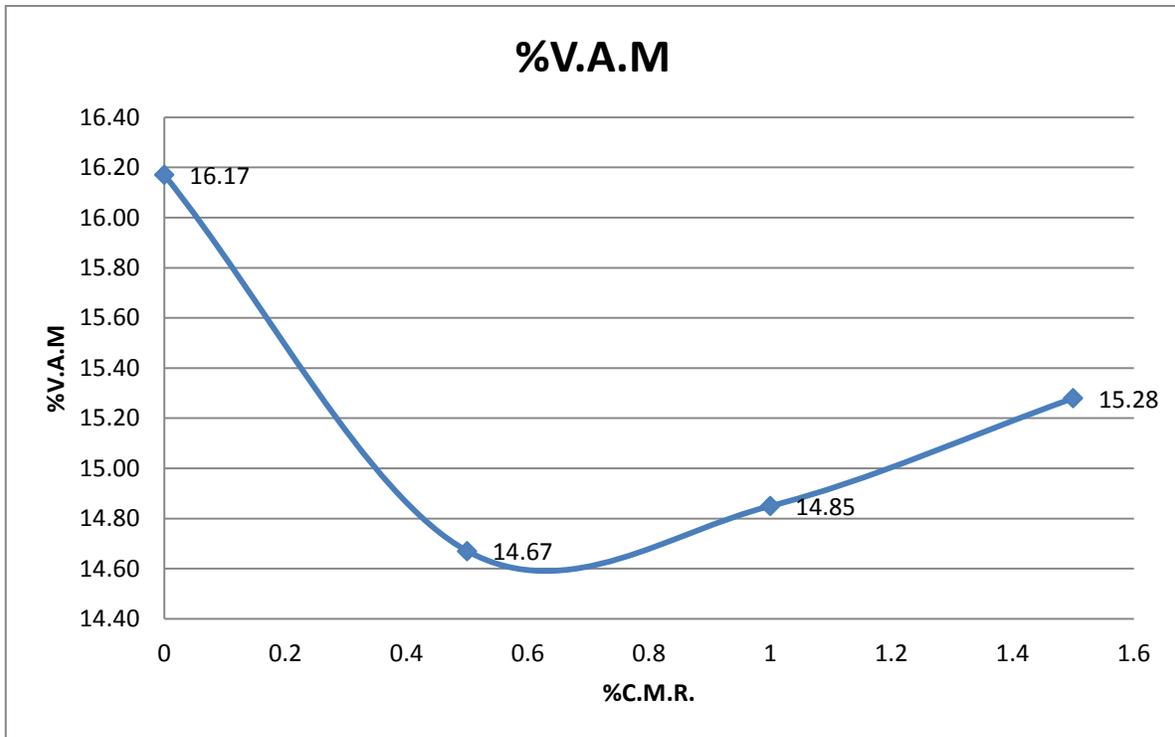
FLUJO mm	
%C.M.R.	Flujo mm
0	3.23
0.5	3.33
1	3.34
1.5	3.40

% V.A.M.	
%C.M.R.	% V.A.M.
0	16.17
0.5	14.67
1	14.85
1.5	15.28

P.V.S.S. Kg/m <sup>3</sup>	
%C.M.R.	PVSS
0	2.12
0.5	2.16
1	2.16
1.5	2.15







## CONCLUSIONES

Como se puede observar que con el caucho molido reciclado los resultados son bastante satisfactorios en todos los aspectos de resistencia y deformación.

Por una parte se ve considerablemente el incremento de la estabilidad al aplicar el caucho a la mezcla asfáltica, lo que nos indica que se tiene una excelente adherencia del material reciclado con el cemento asfáltico y el material pétreo.

En cuanto a la deformación sufrida por los especímenes es menos ya que al estar bien adheridos los materiales y bien compactos sufren menos deformación.

Por otra parte, en el % V.A.M, % de Vacíos, y P.V.S.S de los especímenes es casi igual al del capítulo anterior por lo que se considera que es aceptable su comportamiento con un ligero cambio en los valores obtenidos.

Se puede decir, que en cuanto lo obtenido del capítulo anterior, un contenido óptimo de 5.5 % del cemento asfáltico que se calculó y que es el más apropiado para la estabilidad y el flujo. Para el caso del **contenido óptimo del caucho molido reciclado** se pudo tomar el de **1%** puesto que en las gráficas indican que en este porcentaje, se tiene la mayor estabilidad de **1017.23 Kg/cm<sup>2</sup>** y un flujo de **3.34 mm**.

En conclusión podemos decir que el caucho molido reciclado cumplió con las expectativas satisfactoriamente incrementando la estabilidad y manteniendo el flujo, el % V.A.M, el % de Vacíos, y P.V.S.S que es lo más importante para una vía de comunicación de este tipo.

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES GENERALES

En el estudio o serie de pruebas que se le realizó al material pétreo se encontró con que la curva granulométrica se sale un poco del rango conforme a las especificaciones que da la norma de la SCT, pero para fines de práctica se optó por dejarla así, ya que así la obtuvimos del banco para carpeta asfáltica supuestamente con un tamaño nominal del material pétreo de 19mm (3/4") , se observó que este material está en el límite de la densidad relativa y de una absorción media por lo que cumple muy a penas con las especificaciones ya que es un material de tipo volcánico lo cual es característico de este material, otra de las características de este material es que presenta pocas partículas de forma laja o alargadas. Otra de las cosas es que también se presentó un desgaste considerable en la prueba del desgaste de Los Ángeles pero en un rango permisible en las especificaciones de la norma. En lo que se considera este material presenta buenas características para una mezcla asfáltica de granulometría densa realizada en caliente.

Por lo que respecta a las pruebas realizadas al cemento asfáltico, se puede observar que es un producto asfáltico del tipo AC-20 de buena calidad ya que las pruebas que se le realizaron dan resultados que están en el rango permisible de las especificaciones de la norma que da la SCT.

Se utilizó el método de la Prueba Marshall para la obtención del contenido óptimo de cemento asfáltico este método de prueba se caracteriza por utilizar las condiciones más desfavorables, tales como probar los especímenes a una temperatura de 60 °C y en sentido diametral. En estos resultados se obtuvo una resistencia estructural o estabilidad Marshall y una deformación o flujo, estos dos valores son los más representativos en la obtención del contenido óptimo del cemento asfáltico el cual resultó de **5.5%** por tener la mayor resistencia o estabilidad y una deformación promedio de todos los resultados obtenidos.

Se optó por utilizar caucho molido reciclado ya que es un producto sacado de las llantas usadas de los automóviles para mantener nuestro ecosistema equilibrado, también es un buen aditivo para la carpeta asfáltica. Aun que es un poco cara su obtención y elaboración. La obtención del contenido óptimo se realizó mediante la Prueba Marshall y el resultado fue del **1%** de caucho molido reciclado.

Finalmente por todo lo dicho anteriormente, es conveniente el uso de aditivos que mejoren el comportamiento de las carpetas asfálticas en todos los aspectos y condiciones de intemperismo, para que se vea mejorado en la durabilidad, ya que si se tiene una carpeta más durable, el mantenimiento disminuye considerablemente y claro, donde la sociedad se sienta satisfecha al transcurrir por ellas y pueda comunicarse fácilmente con todo el país.

# REFERENCIAS

**REFERENCIAS**

- **Vías de Comunicación, Caminos, Ferrocarriles, Aeropuertos, Puentes y Puertos**  
Ing., Carlos Crespo Villalaz. Ed.Limusa
- **SCT Michoacán, Libro: Características de los materiales, Parte: Materiales para pavimentos.** NORMA(N-CMT-4-04/08), NORMA (N-CMT-4-05-001/05), NORMA(N-CMT-4-05-003/08)
- **Ingeniería de Pavimentos para Carreteras.** Tomo 1, segunda edición 1998 Ed. universidad católica de Colombia. Alfonso Montejo Fonseca
- **Manual del Asfalto.** The Asphalt Institute
- **Manual de Practicas de Laboratorio de Pavimentos.** Departamento de Mezclas Asfálticas. Facultad de Ingeniería Civil. UMSNH
- **Apuntes de Pavimentos Flexibles** – J. Luis Becerra Magaña  
Ed. Luysil de México, S.A.
- **Tesis “Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada en Condiciones de Saturación”**  
P.I.C. Gabriel Pérez Camarena