

## CAPÍTULO I

### 1.1.-Introduccion

Las mezclas asfálticas están compuestas básicamente de cuatro materiales: Agregado pétreo, ligante o concreto asfáltico, aire y agua en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

Las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas son afectadas por distintos factores como ser: abundante agua o humedad, rayos UVE y UVA, temperatura, tráfico y cargas.

El presente trabajo tiene como enfoque principal el efecto que puede causar el agua en la ***Variación de las propiedades físico mecánicas de las mezclas asfálticas tal efecto*** se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso en el interior de su microestructura.

Principalmente el daño producido por el agua es causado por una pérdida de cohesión en la mezcla y/o una pérdida de adhesión entre el ligante y los áridos (conocido como “**stripping**” o “**pérdida recubrimiento**”), lo que lleva a la reducción de la vida útil de las mezclas asfálticas.

Existen distintos proyectos de investigación realizados en distintos país como los realizados en Colombia por la ***Universidad Militar de Nueva Granada*** y por la ***Universidad Católica de Colombia***, denominado ***Método para evaluar el envejecimiento acelerado en mezclas asfálticas***, en distintos congresos como el Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto I a XVI denominado ***Sensibilidad del agua a las mezclas asfálticas*** son proyectos en los cuales se ha verificado la teoría de la influencia o sensibilidad que pueden tener las mezclas asfálticas al agua, los deterioros que se pueden producir a causa de esto y la variación de sus propiedades tales como la resistencia, la adhesión y la durabilidad.

La investigación se basa en la metodología utilizada en un artículo publicado por la Universidad de los Andes de Bogotá denominado “**Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante**” lo cual requiere de toda la aplicación práctica utilizada para el diseño de las mezclas asfálticas.

Esta investigación se realiza debido a que en la construcción de pavimentos se encuentra que en la mayoría de los casos aunque se tenga un buen diseño de estructura de pavimento, un buen diseño de mezcla asfáltica y una adecuada ejecución del proceso constructivo, se sigue teniendo un deterioro prematuro de la carpeta asfáltica debido a la poca importancia que se le da al **efecto que tiene el agua sobre el agregado pétreo y el ligante asfáltico** disminuyendo el buen desempeño de esta. Esto ocasiona que en repetidas ocasiones sea necesaria la intervención para reparar, o reconstruir partes de la carpeta asfáltica debido a los daños que se van presentando antes del tiempo previsto. Lo que lleva a que se produzcan efectos negativos para los usuarios dado que genera embotellamientos vehiculares innecesarios sin mencionar el costo que representa para la ejecución de estas labores de reparación.

Por lo anterior, se ejecutara una fase experimental tendiente a analizar la influencia del ligante asfáltico en el fenómeno de *desprendimiento ligante-agregado*, **a fin de evaluar solo el efecto del agua**, es decir, no se tendrá en cuenta el efecto que puede causar el aire y los cambios de presión o la combinación aire-agua-temperatura, tal como ocurre in situ. Para tal fin, se sumergirán en agua durante 65 días aproximadamente (días con lluvia en Tarija) láminas muy delgadas (2 mm de espesor aprox.) de cemento asfáltico tipo CA 85-100 y mezclas asfálticas convencionales previo acondicionamiento seco y húmedo.

Cada 20 días se retiran del agua las mezclas asfálticas del tipo convencionales y se obtendrá la resistencia al desgaste tanto para el grupo seco como para el grupo húmedo.

Se optó por utilizar cemento asfáltico tipo 85-100 debido que es el más utilizado en los valles y en la ciudad de Tarija para conformar capas de rodadura y bacheos, respectivamente, y son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente.

A las láminas de cemento asfáltico sumergidas se les realizara ensayos de penetración para medir si la consistencia del ligante varía cuando era sumergida en agua.

Se realizara una comparación de resultados para ver la variación de las propiedades de la mezcla sumergida elaborada de manera convencional y la mezcla sin sumergir y la variación existente se determina que es la influencia que puede tener el agua.

### **1.2.-Revisión bibliográfica.-**

La investigación está basada en un artículo publicado por la Universidad de los Andes de Bogotá **“Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante”** Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado **“Desarrollo de un método de ensayo acelerado para evaluar el envejecimiento de mezclas asfálticas, registrado en la Universidad Católica de Colombia”**.

Esta investigación se realiza debido que muy poca atención se presta a la influencia del ligante, debido a que es de amplio conocimiento que el asfalto es un material impermeable que reacciona muy poco ante la presencia de agentes químicos externos; sin embargo, el agua presenta como uno de sus componentes químicos esenciales oxígeno y otros compuestos capaces de generar cambios en las propiedades químicas y físicas del asfalto, a largo plazo (oxidación y endurecimiento), en especial cuando la interconexión ligante-pétreo es muy delgada.

Existen numerosas investigaciones realizadas a lo largo de los años por diversos autores con distintas metodologías y criterios en las que podemos destacar las siguientes:

**Ridgeway, 1976** atribuye los mayores daños en los pavimentos a la infiltración de agua por las fisuras que se generan en la carpeta de rodadura. El agua tiene una

tensión superficial menor que la del asfalto, lo que le permite moverse lentamente hacia el asfalto, y destruir las fuerzas que mantienen unida la capa de agregado y asfalto, el agua que penetra en los poros de la mezcla asfáltica cambia el equilibrio de fuerzas y puede actuar de diferentes maneras:

- La penetración de agua en la interface asfalto-agregado, provoca que la fuerza de cohesión de la mezcla se degraden. (Cheng, 2002)
- La difusión a través de la película asfáltica, debilitan la cohesión del material.
- El debilitamiento de la fuerza de cohesión del agregado (Curtis, 1993).

**Caro et al. (2008).** Los daños por humedad en las mezclas asfálticas se presentan cuando el agua se encuentra en forma líquida o de vapor en la mezcla. Una definición muy acertada sobre el daño por humedad es la propuesta por Kiggundu y Roberts (1988) como *“el deterioro funcional progresivo de una mezcla asfáltica por la pérdida de adhesión entre el cemento asfáltico y la superficie de agregado y/o la pérdida de resistencia cohesiva del cemento asfáltico principalmente ante la acción del agua”*.

Los daños por humedad finalmente afectan la cohesión (fuerza de atracción en un mismo cuerpo) y la adhesión (fuerza de atracción entre partículas de diferentes cuerpos).

Se realizaron otras investigaciones como ***“Nueva metodología para la valoración de la adherencia árido ligante” realizada por LEMaC - Centro de Investigaciones Viales*** en este trabajo, es la segunda parte del desarrollo que valora la adherencia entre árido y ligante utilizando una metodología que ponen de manifiesto la pérdida de cohesión de las mezclas asfálticas cuando éstas entran en contacto con el agua. Este estudio considerará tres tipos de áridos que son utilizados en la provincia de Buenos Aires.

La mezcla asfáltica adoptada como de referencia para el presente trabajo es del tipo “Denso” de uso corriente en nuestra región. Se hace hincapié, en cada uno de los

materiales intervinientes; áridos, ligante y mejorador; de modo de conocerlos, tanto en forma individual como desde el punto de vista de la interacción entre los mismos.

**Covarrubias et al. (2009)** estudió la susceptibilidad al agua en mezclas asfálticas mediante la pérdida del módulo resiliente por inmersión en agua. Tomando como hipótesis que la durabilidad de las mezclas depende del grado de adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo, y que la cantidad de asfalto hace impermeables las mezclas, siendo esto lo que determina su durabilidad, se mostró que uno de los factores que tiene relación directa respecto a la durabilidad del asfalto es la acción del agua. Así igualmente se encontró que existe una relación de afectación en la disminución del módulo resiliente con el tipo de asfalto ensayado. Así también Covarrubias et al., (2009), elaboro un estudio consistente en la comparación entre los diferentes métodos para investigar cuándo una mezcla es susceptible al agua según el protocolo de AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto, *Asociación Civil sin fines de lucro*) del mismo año, el cual describe una serie de ensayos en los ligantes. La forma de evaluar la susceptibilidad se dividió en dos categorías: La primera en inspección visual, y la segunda en pruebas mecánicas.

En ésta investigación se estudiaron diferentes asfaltos y agregados pétreos, los cuales fueron sometidos a las diferentes pruebas mencionadas. Tomando como hipótesis que la durabilidad de las mezclas depende del grado de adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo. De lo cual se obtuvo que el módulo resiliente se incrementara con la temperatura hasta llegar a un valor constante.

***Estudio sobre la influencia de la acción del agua en el módulo complejo de mezclas asfálticas densas (B.Barra, L.Momm, Y.G.Perez)*** realizan este estudio analizan las mezclas asfálticas en estado seco y después en un periodo de ciclado alternado a 60°C sometido a inmersión de agua y en el horno .Los resultados presentados en este trabajo indican que existe un aumento en el módulo de rigidez en ambas mezclas mencionadas después de los previos condicionamiento alternado. Entre tanto esto no ocurre debido a la mejoría de las características físicas del ligante bituminoso sino en

función del envejecimiento del material que a pesar de ponerlo más rígido al mismo tiempo le confiere un comportamiento más frágil.

***Análisis de la influencia de agregados pétreos sobre la susceptibilidad a la humedad de Mezclas Asfálticas en Cliente (Y.F.Lopez)*** Después de una completa caracterización de los agregados y asfaltos es posible predecir la fuerza de los enlaces desarrollado entre los principales componentes de la mezcla asfáltica y por consiguiente la resistencia que desarrollaron bajo la acción de la humedad y el tráfico. Esto con el fin de contribuir con el diseño de las mezclas asfálticas que produzcan pavimentos más resistentes y durables y con tiempos de vida mayores.

El daño producido por el agua en mezclas bituminosas, se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso en el interior de su microestructura.

Los daños más comunes por este fenómeno son las manifestaciones en el firme, debidas al deterioro causado por la presencia del agua, son similares a las producidas por otros aspectos como los materiales, el diseño de la mezcla bituminosa y su construcción.

Se produce una reducción de la resistencia en la mezcla bituminosa. La reducción de la resistencia puede contribuir al desarrollo de diversas formas de deterioro del firme, como el agrietamiento y la formación de roderas, reduciendo así la vida del firme.

Este tipo de investigación es tema de estudio en diversas universidades de tesis de grado, maestría y tesis doctorales y fueron tema de exposición en varios congresos realizados del asfalto ya que se pretende dar una solución al deterioro prematuro de las mezclas asfálticas causadas por condiciones climáticas y ambientales siendo el agua uno de los agentes importantes en la ocurrencia de dichos deterioros.

Dicha investigación se basa en ensayos ya estandarizados que tienen sus propias normas para llegar a determinar las propiedades requeridas en dichos ensayos con normas y parámetros ya establecidos y estandarizados.

El tema de estudio es un tema de indagación que en base a la literatura e investigaciones ya realizadas es un tema que requiere de mucha lectura y recopilación de toda la información ya existente sobre el tema para poder sacar conclusiones exactas después también se debe tener una base de datos importante para tener más dominio del tema y poder realizar un análisis más realista de todos los parámetros empleados en la metodología utilizada escogida para dicha investigación.

La principal causa de realización de todas estas investigaciones ya realizadas es poder dar una solución a los deterioros, fallas fisuras presentados a edad temprana en pavimentos que son causados por factores ambientales que deben ser estudiados por separados debido a que es un tema complejo simular la vida útil de un pavimento en laboratorio y no existen los equipos de laboratorio necesarios para pruebas más reales para poder conocer la influencia de cada uno en la variación de las propiedades de las mezclas asfálticas .

En estas investigaciones se trata de buscar cómo se van manifestando los deterioros en función del tiempo para en un futuro poder dar una solución adecuada para poder disminuir dichos fenómenos causados por la presencia del agua en las mezclas asfálticas.

### **1.3.-Diseño teórico**

#### **1.3.1.-Determinacion del problema**

¿Cuáles son las variaciones de las propiedades físico mecánicas producidas por el efecto destructivo del agua en las mezclas asfálticas sumergidas en un determinado tiempo?

##### **1.3.1.1.-Situacion problemica**

En nuestro medio no se brinda el interés necesario a la incidencia que tiene el agua sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas. Y si a esto agregamos que la elección del asfalto para el diseño de una mezcla se basa en procedimientos de clasificación de asfaltos a partir de ensayos físicos determinados en laboratorio y otros procesos experimentales que solo pueden garantizar que la carpeta asfáltica

soporte la carga de diseño, nos vemos en el problema de no poder garantizar un buen desempeño de la carpeta asfáltica ante condiciones de humedad que se pueden presentar.

El efecto destructivo del agua: La capacidad de soportar tráfico de un camino disminuye mucho cuando éste se humedece. La humedad puede venir de la lluvia, pero también llegar por capilaridad desde cunetas o niveles freáticos elevados los cuales pueden causar daños a corto y largo plazo en el periodo de vida útil del pavimento.

El daño que causa la humedad en las mezclas asfálticas es evidente y puede ser propiciado por diversos mecanismos físico-químicos, por lo que es necesario utilizar uno o varios métodos que puedan indicar este daño.

Los principales factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas, asumiendo que se encuentran bien construidas, son la edad de envejecimiento y el daño por humedad .Es decir, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no sólo para que resista las cargas impuestas por el tránsito, sino también la acción del medio ambiente. Cuantificar la influencia del ambiente en el comportamiento de este tipo de material no es una tarea fácil. La forma como se realiza actualmente es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, aire, temperatura y rayos ultravioleta) y evaluando la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico) de manera separada sobre el ligarte y las mezclas.

El daño por agua en los pavimentos asfálticos puede ser causado por varios mecanismos, entre ellos la falta de adhesión entre el agregado y el asfalto, la falta de cohesión entre las moléculas del asfalto, la falta de cohesión entre las moléculas del agregado, la emulsificación espontánea del asfalto y, en climas extremos, el congelamiento del agua atrapada en la mezcla asfáltica.

En dichos mecanismos podemos distinguir entre físicos y químicos. Los químicos son aquellos que afectan la interacción en la superficie existente entre las moléculas del asfalto y las del agregado. Los mecanismos físicos se relacionan con la penetración

del agua en dicha superficie, es necesario identificar a qué tipo pertenecen para evitar su presencia en las mezclas asfálticas y así revisar brevemente cada uno de ellos.

El principal mecanismo de daño a los pavimentos asfálticos por la acción del agua es el desprendimiento (stripping) entre el asfalto y el agregado. Este desprendimiento se basa en un fenómeno químico en el que las moléculas de agua alteran las interacciones en la superficie que está entre ambos. Todos los agregados presentan mayor afinidad hacia el agua, por lo que son más rápidamente humectados por ésta que por el asfalto.

La presencia de agua se observa cuándo existe detención de ésta sobre la superficie de una vía que es generalmente provocada por falta de drenajes subsuperficiales, y en otras ocasiones puede ser causada por mal drenaje superficial e incluso de la vía misma (malas pendientes, falta de bombeo, cunetas deficientes, etc.); así como también puede ser ocasionada por casos no previstos en el alineamiento de carreteras, como desbordamientos de cuerpos de agua aledaños, represas, rompimiento de tuberías subterráneas; dado que, es muy común observar vías asfaltadas en que han sido afectadas a causa del agua, por cualquiera de los motivos anteriores y la iteración de este fenómeno altera los periodos de durabilidad de las mismas.

Como consecuencia de lo anterior los niveles de funcionamiento y servicio se vuelven inadecuados y se requieren programar trabajos de mantenimiento costosos que no son previstos en la planeación del proyecto, dificultando la consecuencia en los recursos económicos necesarios para afrontarlos y perjudicando en gran medida a los usuarios.

### **1.3.2.-Objetivos del trabajo**

#### **1.3.2.1.-Objetivo general**

- Analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas sumergidas en agua a través de diversos ensayos de laboratorio para conocer la variación de las propiedades físico-mecánicas, daños y efectos, con el fin de determinar las alteraciones que sufren las mezclas asfálticas al estar sumergidas durante un periodo de tiempo de 65 días.

#### **1.3.2.2.-Objetivos específicos**

Los objetivos específicos que persigue alcanzar el proyecto son los siguientes:

- Analizar los diversos factores que intervienen en el diseño de las mezclas asfálticas.
- Evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas producidas en laboratorio después de ser sometidas a cada tiempo y temperatura especificada.
- Efectuar el diseño de la mezclas asfáltica mediante la metodología de Marshall.
- Realizar los ensayos necesarios para controlar que los agregados se encuentren dentro de los parámetros establecidos por la metodología.
- Recolectar toda la información sobre los efectos del agua en las mezclas asfálticas.
- Medir la variación de la penetración del ligante en función al tiempo de sumersión en el agua
- Sumergir en agua las probetas elaboradas de manera convencional, para luego ensayarlas en la máquina de desgaste de los Ángeles para cada periodo de tiempo correspondiente y temperatura.

- Realizar la comparación correspondiente de los valores obtenidos por medio de la máquina de desgaste de los Ángeles para los dos tipos de muestras acondicionadas.
- Establecer la existencia de la variación respecto a las características iniciales, causada por efecto del agua al sumergir el asfalto, para los diferentes tiempos de inmersión.

### **1.3.3.-Hipotesis**

Si realizamos los ensayos de laboratorio necesarios para determinar la variación de las propiedades físico- mecánicas que son afectadas en las mezclas asfálticas después de un proceso de saturación cronológica se conocerá que propiedades son las afectadas por el proceso de sumersión en agua de las mezclas asfálticas.

#### **1.3.3.1.-Tipo de estudio:**

**Explicativo.**-Se trata de un estudio explicativo ya que se busca determinar las propiedades que se ven afectadas en las mezclas asfálticas causadas por la presencia del agua en dichas mezclas y las consecuencias que puede tener dicha incidencia(desprendimientos falta de adherencia).

#### **1.3.3.2.- Elementos de la hipótesis:**

**Unidad de observación:** Mezclas asfálticas saturadas en agua cronológicamente

**Variable 1(dependiente):** Variación de propiedades físicas (penetración) y mecánica (resistencia) dependientes del tiempo de saturación.

**Variable 2(independiente):** Tiempo de saturación.

### **1.3.4.-Diseño metodológico:**

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

##### **1.3.4.1.1.-Unidad de estudio.-**

*-Variación de las propiedades de las mezclas asfálticas en función del tiempo de saturación y temperatura.*

Se escoge esta unidad de estudio por que el objetivo del trabajo es determinar la influencia que tiene el agua en las mezclas asfálticas después de un proceso de saturación en agua que propiedades son las que varían.

#### **1.3.4.1.2.-Poblacion.-**

-Mezclas asfálticas convencionales.

#### **1.3.4.1.3.-Muestra.-**

-Mezclas asfálticas convencionales elaboradas con cemento asfáltico 85-100.

#### **1.3.4.1.4.-Muestreo.-**

**Se realizó de la siguiente manera:**

**-Mezclas asfálticas convencional con cemento asfáltico 85-100 sumergidas en agua durante 65 días a distintas temperaturas.**

**-Mezclas asfálticas convencional con cemento asfáltico 85-100 sin sumergir expuestas a distintas temperaturas durante 65 días.**

**-Láminas de ligante asfáltico sumergidas en agua a distintas temperaturas durante 65 días.**

Se determina como muestreo estos dos tipos de muestras analizadas de esta manera ya que se pretende verificar la influencia del agua sobre las mezclas asfálticas comparando la variación que existe entre el grupo seco y húmedo.

En las láminas se verificara los cambios que puede producir el agua específicamente sobre el asfalto.

#### **1.3.4.2.-Metodos y técnicas de procedimientos**

##### **1.3.4.2.1.-Método experimental**

**Experimento:** Contara con ensayos realizados en laboratorio de asfaltos y suelos en base a normativa ya establecida, para caracterización de agregados, cemento asfáltico y diseño de la mezcla asfáltica convencional para luego ser acondicionados para llegar al objetivo buscado.

### 1.3.4.3.-Procedimiento:

Se efectuaran los siguientes ensayos a los materiales que son parte del diseño de una mezcla asfáltica que deben cumplir con las características requeridas para el diseño que son los siguientes:

#### 1.3.4.3.1.-Agregados pétreos.-

Estos materiales se les realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones y normas establecidas:

- ✓ Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (ASTM D-421)
- ✓ Peso específico y Absorción de agregados finos (ASTM C-128)

$$\text{Gravedad específico aparente}(Gs) = \frac{A}{B + D - C}$$

$$\text{Gravedad específico seco bulk } (Gsb) = \frac{D}{B + D - C}$$

$$\text{Gravedad específico saturado sup. seco}(Gsss) = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\% \text{de absorcion} = \frac{D - A}{A} * 100$$

A= Peso de muestra seca al horno (gr)

B= Peso del agua (gr)

C= peso de muestra más agua (gr)

D= Peso de muestra superficialmente seca(gr)

- ✓ Peso específico y absorción de agregados gruesos.(ASTM C-127)

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico condicion saturada y sup. seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Dónde:

A: masa en el aire del agregado seco al horno (g)

B: masa en el aire del agregado saturado superficialmente seco (g)

C: masa del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua (g)

- ✓ Resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de ¾”) por medio de la máquina de Los Ángeles (ASTM C-535)

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

P<sub>inicial</sub>=Peso total de la muestra (gr)

P<sub>Final</sub>=Peso retenido tamiz N°12 (gr)

- ✓ Partículas fracturadas.(ASTM D-5821-95)

$$\% \text{ caras fracturadas} = \frac{B}{A} * 100$$

B=Peso total de caras fracturadas (gr)

A=Peso total de la muestra (gr)

- ✓ Equivalente de arena.(ASTM D-2419)

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura arcilla}} * 100$$

#### 1.3.4.3.2.-Cementos asfálticos

Se les realizaran los ensayos típicos que exigen las especificaciones para caracterizar el cemento asfáltico:

- Penetración (Método AASHTO T49 y en el ASTM D5.)
- Viscosidad (ASTM D445.)
- Ductilidad (Métodos AASHTO T51 y ASTM D113.)
- Punto de ablandamiento (Métodos AASHTO T53 y ASTM D36.)
- Punto de inflamación (métodos AASHTO T48 y ASTM D92.)
- Peso específico (métodos AASHTO T43 y ASTM D70.)

### 1.3.4.3.3.-Mezclas asfálticas método Marshall

- ✓ -Cálculo de la densidad de la mezcla compactada según AASHTO T 166-05.  
Antes y después del acondicionamiento.

Se la calcula con la siguiente formula:

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

Gmb=gravedad especifica de la mezcla compactada.

W<sub>MUESTRA</sub>=Peso de la muestra seca al aire.

W<sub>sss</sub>=peso de la muestra superficialmente seca.

W<sub>sumergido</sub>=peso de la muestra sumergida

- ✓ Variación de la densidad después del acondicionamiento se calcula con la siguiente formula:

$$\% \text{ de perdida de densidad} = \frac{Gmb \text{ inicial} - Gmb \text{ final}}{Gmb \text{ inicial}} * 100$$

Gmb<sub>inicial</sub>=Peso total de la muestra inicial antes del acondicionamiento (gr)

Gmb<sub>Final</sub>=Peso final después del acondicionamiento (gr)

- ✓ Realizar la prueba de desgaste de los Ángeles y cálculo de densidad tanto grupo seco como húmedo para cada periodo de tiempo determinado.

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

P<sub>inicial</sub>=Peso total de la muestra al inicio (gr)

P<sub>Final</sub>=Peso de la briqueta al salir de la máquina de desgaste (gr)

- ✓ Indicé conservación de la resistencia:

$$I_c = \frac{\text{Resistencia grupo humedo}}{\text{Resistencia grupo seco}}$$

#### **1.3.4.3.4.-Laminas de cemento asfáltico**

Realizar el ensayo de penetración establecido según norma (Método AASHTO T49 y en el ASTM D5.) para cada tiempo de sumersión y temperatura.

#### **1.3.4.3.-Diseño de la mezcla asfáltica:**

##### ***-Selección del tipo de mezcla o granulometría***

Para el presente trabajo se utilizara un tipo de mezcla convencional y se escoge una granulometría perteneciente a los rangos establecidos por el tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$ " según la norma de *Graduaciones propuestas para mezclas cerradas ASTM D3515*.

##### ***-Secado del material***

Secar el material hasta obtener un peso constante del mismo que determina que dicho material está libre de humedad para evitar posibles desprendimientos.

##### ***-Contenido óptimo de asfalto***

Después de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos se fabricaron tres briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto entre 4% y 6,5%, con el fin de realizar el diseño de Marshall. Esto con el objeto de determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas convencionales elaboradas con asfaltos de 85-100.

Para cumplir con las especificaciones para fabricar las mezclas asfálticas se debe modificar la granulometría original de los agregados si así lo requiere, tomando como referencia los valores promedios en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las briquetas del ensayo de Marshall.

##### ***-Fases experimentales para alcanzar el objetivo:***

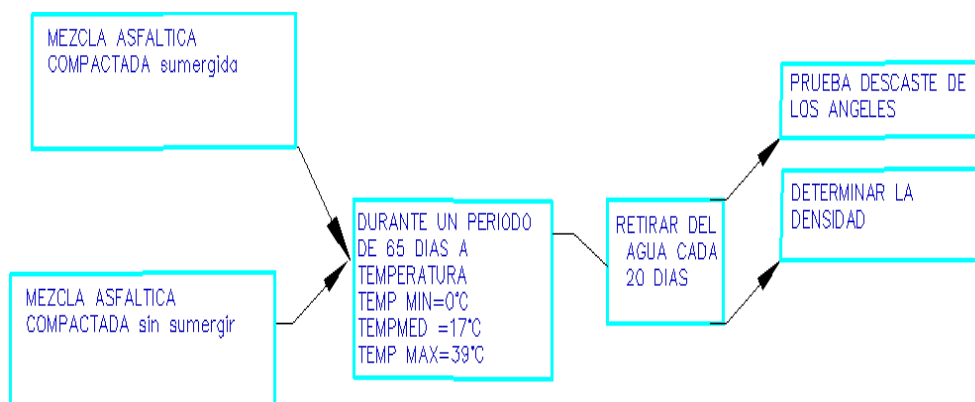
El fenómeno de *stripping* es la separación del agregado pétreo del ligante debido a la presencia de agua en la mezcla asfáltica, lo que disminuye su resistencia bajo carga monotónica y cíclica. Es decir, este fenómeno ocurre en la interconexión ligante-agregados pétreos.

Para entender el efecto que genera el agua en la mezcla asfáltica y la influencia de este en el *stripping*, se compararan dos fases experimentales ejecutadas de la siguiente forma:

**Fase 1:** Mezclas asfálticas elaboradas de manera convencional sumergidas en agua a distintas temperaturas sometidas a un previo acondicionamiento (Grupo húmedo) por un periodo de 65 días (días con lluvia en Tja).

**Fase 2:** Mezclas asfálticas elaboradas de manera convencional sin sumergir expuestas a distintas temperaturas sometidas a un previo acondicionamiento (Grupo seco) por un periodo de 65 días (días con lluvia en Tja).

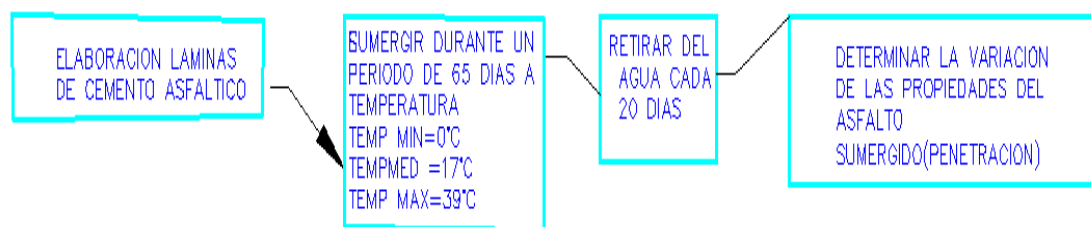
Figura N°1 Esquema de la metodología para las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

**Fase 3:** Se realizarán láminas de cemento asfáltico de espesor aproximado de 2mm que serán sumergidas en agua a distintas temperaturas durante 65 días.

Figura N°2 Esquema metodológico de las láminas de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

-En la siguiente tabla N°1 se expresa el número de mezclas asfálticas para cada periodo esta tabla se tendrá en cuenta tanto para el grupo seco como el húmedo:

Tabla N°1 Numero de mezclas a ser evaluadas según temperatura y tiempo

|                    | TIEMPO EN DIAS |    |    |       |       |
|--------------------|----------------|----|----|-------|-------|
| TEMPERATURAS       | 0              | 20 | 40 | 65    | TOTAL |
| TEMPERATURA MAXIMA | 3              | 3  | 3  | 3     | 12    |
| TEMPERATURA MEDIA  | 3              | 3  | 3  | 3     | 12    |
| TEMPERATURA MINIMA | 3              | 3  | 3  | 3     | 12    |
|                    |                |    |    | TOTAL | 36    |

Fuente: Elaboración propia

-Para las láminas de cemento asfáltico se les realizara ensayo de Penetración para determinar la variación de consistencia en función del tiempo de sumersión y temperatura cada 20 días (Ver tabla 1).

#### ***Descripción del método Marshall***

- El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y  $\frac{1}{2}$ " de espesor por 4" de diámetro (64 x 102 mm).
- Seleccionar el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.
- Determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.

- Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Adicionalmente se deben incluir 6 briquetas para determinar los efectos del agua en la estabilidad y el flujo. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb). Además se requerirá aproximadamente un galón de asfalto.

### ***Equipo***

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- ✓ Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- ✓ Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50 °F (10 °C) y 450 °F (232 °C).
- ✓ Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- ✓ Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).
- ✓ Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- ✓ Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 <sup>7</sup>/<sub>8</sub>" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.

- ✓ Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- ✓ Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- ✓ Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

#### 1.3.4.4.-Tratamiento estadístico

**-Tabulación y recolección:** Toda la información será debidamente ordenada y tabulada.

De la siguiente manera:

**-Validez de los datos:** La validez, se refiere al número de veces que se realiza el ensayo bajo las mismas condiciones del mismo sujeto u objeto, tiene que producir resultados iguales.

**- Confiabilidad de los datos:** La confiabilidad de los datos estará referida a la buena aplicación del instrumento.

**-Medidas de tendencia central:** Se realizara el cálculo de estas medidas para ver el comportamiento de las muestras para cada punto o tiempo de estudio para ver el comportamiento y la variación que existe en relación a los de más tiempo de estudio determinado. Se realizaran estas medidas para tener un valor específico por cada tiempo escogido.

La media se la determina de la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X}{N}$$

**-Representación de resultados:** Los resultados obtenidos serán mostrados en gráficos de diagramas de barras para poder apreciar la variación existente entre cada uno de los grupos estudiados.

**-Comparación de resultados:** Los resultados de la fase 2 se compararon con los de la fase 1 para analizar la influencia que tiene el concreto asfáltico en la variación de las propiedades de las mezclas asfálticas cuando se evalúa tan sólo el efecto del agua.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **2.1.-Introduccion.-**

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. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado o en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados que se está usando en la planta de producción de mezcla.

El objetivo principal de este trabajo fue buscar una metodología que pusiera de manifiesto en forma clara los fenómenos de adherencia árido-ligante en las mezclas asfálticas tomando como causa principal de este fenómeno de pérdida de adherencia el agua.

La falta de adherencia entre el árido y el ligante asfáltico, ha sido tema de numerosos análisis tendientes a solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos como consecuencia de este fenómeno. La misma genera la formación de desprendimientos, los que afectan negativamente a la estructura, ya sea, a nivel de superficie de rodadura o favoreciendo el ingreso de los agentes agresivos a las carpetas inferiores del paquete estructural.

El estado de deterioro de una mezcla asfáltica se presenta debido a varias condiciones entre las cuales se destacan, el exceso de tráfico pesado, los factores

climáticos, mal proceso constructivo y la incidencia del agua, entre otros. La infiltración, vapor de agua y capilaridad son factores que proporcionan una exposición directa de la capa de asfáltica a la acción del agua, elevando así la presencia de humedad en su estructura.

Dicha humedad se convierte entonces en un factor determinante en el comportamiento de la mezcla agregado-asfalto.

El tema de la adherencia entre el ligante y el árido es complejo, interviniendo en su estudio un número considerable de variables. La adhesividad se define como “La capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura”.

A los fines de analizar la adherencia árido - ligante, existen innumerables métodos en la gran mayoría de ellos la evaluación se efectúa a partir de una valoración visual del Desprendimiento también denominado “stripping”. Esta valoración se lleva a cabo luego de poner en contacto a la mezcla asfáltica (ó una determinada fracción de la misma) con agua bajo condiciones y tiempo determinadas conforme a cada uno de los métodos particulares.

Estas metodologías poseen algunos aspectos discutibles dentro de los cuales se destacan los relacionados a la representatividad de los mismos en el campo y la subjetividad en la cual podemos caer a la hora de efectuar la valoración.

Esto nos lleva a buscar una forma de valorar el fenómeno a través de otro tipo de ensayos o metodologías que, en principio, pongan en evidencia uno de los principales problemas a los cuales conduce una inadecuada adherencia entre árido y ligante, al menos desde el punto de vista estructural, que permita valorar la pérdida de cohesión interna con la posterior disminución de la capacidad de resistencia.

En adelante nos orientaremos al análisis de la pérdida de cohesión de las mezclas asfálticas originadas por el contacto de las mismas con agua.

## **2.2.-Componentes de las mezclas asfálticas**

### **2.2.1.-Agregado pétreo**

Agregado, es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado 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.

El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado, su origen y además deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

#### **2.2.1.1.-Importancia del agregado en una mezcla asfáltica**

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados y el asfalto; 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 agregados que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado ó en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados que se están usando en la planta de producción de mezcla lo cual puede comprender:

- Control de calidad del agregado que se produce en la planta trituradora.

- Acopio de agregados.
- Alimentación de agregados.

El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado, su origen y además deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

#### **2.2.1.2.-Clasificación de los agregados**

##### **2.2.1.2.1.-Según origen de los agregados**

Los agregados usados en pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: Agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

##### **2.2.1.2.1.1.- Agregados naturales**

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, y los químicos.

La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que tamiz No. 4. La arena se define como partículas de un tamaño menor que tamiz No. 4 pero mayor que el tamiz No. 200. Las partículas de tamaño menor que 75  $\mu\text{m}$  (tamiz No. 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

#### **2.2.1.2.1.2.-Agregados procesados**

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: Gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras antes de ser usados en la pavimentación. De la calidad de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La roca es triturada por tres razones:

- Para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa.
- Para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular.
- Para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

En la cantera, antes de trasladar las rocas en su tamaño adecuado a la trituradora, es controlada visualmente la calidad de la roca que se está extrayendo ya que puede darse el caso que las rocas no sean apropiadas para producir agregado de buena calidad que cumpla con todos los requisitos que se establecen para agregado de mezclas asfálticas o cualquier otro uso. El propósito de la trituración de las rocas es principalmente reducirlas a un tamaño.

#### **2.2.1.2.1.3.-Agregados sintéticos**

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

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

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomacea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste.

#### **2.2.1.3.- Clasificación de agregado:**

Las rocas se dividen en tres tipos generales: Sedimentarias, ígneas y metamórficas. Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

##### **2.2.1.3.1.-Rocas sedimentarias**

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de la areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas calizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceos y calcáreos. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un alto porcentaje de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, normalmente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

#### **2.2.1.3.2.- Rocas ígneas.-**

Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: Extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en canteras y posteriormente usadas.

#### **2.2.1.3.3.-Rocas metamórficas.-**

Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas

En la siguiente tablaN°2 se muestra la clasificación general de las rocas:

Tabla N°2 Clasificación de las rocas

| CLASIFICACION GENERAL DE ROCAS |             |                                                                                       |
|--------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Clase                          | Tipo        | Familia                                                                               |
| Sedimentarias                  | Calcáreas   | Caliza<br>Dolomita                                                                    |
|                                | Silíceas    | Arcilla esquistosa<br>Arenisca<br>Horsteno<br>Conglomerado<br>Breccia                 |
| Metamórficas                   | Foliadas    | Gneis<br>Esquisto<br>Anfibolita<br>Pizarra                                            |
|                                | No foliadas | Cuarcita<br>Mármol<br>Serpentina                                                      |
| Igneas                         | Intrusivas  | Granito<br>Sienita<br>Diorita<br>Gabbro<br>Periodotila<br>Piroxenita<br>Hornablendita |
|                                | Extrusivas  | Obsidiana<br>Pómez<br>Tufa<br>Riolita<br>Traquita<br>Andesita<br>Basalto<br>Diabasa   |

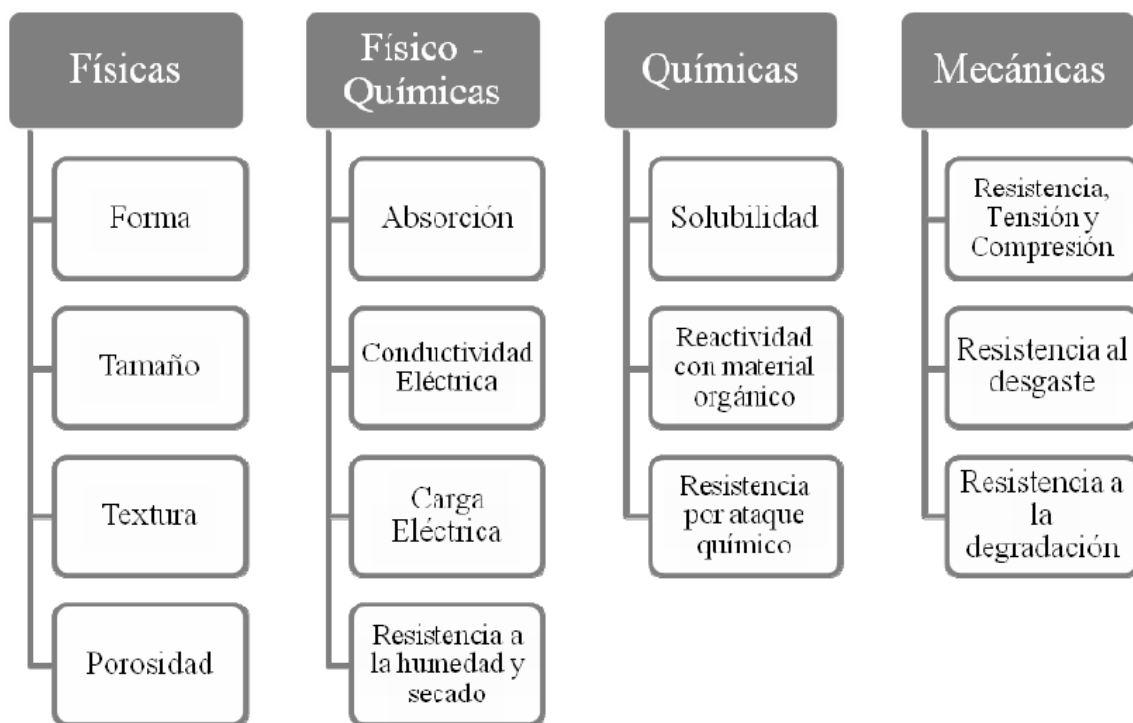
Fuente: Serie de Manuales N°.22 (MS-22).

#### 2.2.1.4.-Propiedades de los agregados utilizados en mezclas asfálticas en caliente

En una mezcla asfáltica en caliente bien graduada, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento de la carpeta de rodadura. Debido a su naturaleza los agregados pueden presentar distintas características e influir de manera diferente en el comportamiento de la Mezcla Asfáltica.

En la Figura n°3 se muestra un resumen de las propiedades de los agregados para mezclas asfálticas en caliente. Los diferentes tipos de agregados en cuanto a forma, fuente, tamaño o combinaciones deben cumplir los requerimientos de las especificaciones de la mezcla que van a constituir. Estos materiales pueden tener diferentes propiedades que podrían cambiar las características de construcción de la mezcla. El tipo de trituración usada para procesar el agregado puede afectar la forma de partícula, la cual en últimas circunstancias puede influir en los vacíos del agregado mineral y en el grado de fricción entre ellas. Se prefieren las partículas que se acerquen a la forma cúbica, para las mezclas.

Figura N°3 Propiedades en los agregados



Fuente: Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas Asfálticas en caliente en el salvador

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

#### 2.2.1.4.1.-Gradación y tamaño máximo de partícula

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones (huso granulométrico). Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la granulometría del agregado cumple o no con las especificaciones.

- **Tamaño máximo de partícula**

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

- **Tamaño máximo nominal de partícula**, designado como el tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

- **Tamaño máximo de partícula**, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

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

#### **Granulometría del agregado**

La granulometría de partículas es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis de tamices consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Los concretos asfálticos son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen. Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

- **Agregado grueso**, material retenido por el tamiz de 2.36mm (No.8).
- **Agregado fino**, material que pasa el tamiz de 2.36mm (No.8).
- **Relleno mineral**, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm (No.30).
- **Polvo mineral**, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075mm (No.200).

El relleno mineral y el polvo mineral están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca.

Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o de menos, de relleno o polvo mineral, puede causar que la mezcla aparezca excesivamente seca o excesivamente rica (o sea, la mezcla de pavimentación aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto). Dichos cambios en la mezcla pueden ocurrir con pequeños cambios en la cantidad o en el tipo de relleno o polvo mineral utilizado. Por consiguiente, el tipo y la cantidad de relleno y polvo mineral usados en cualquier mezcla asfáltica de pavimentación deberán ser cuidadosamente controlados.

#### **2.2.1.4.2.-Limpieza**

Las especificaciones de obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075mm (No.200). El ensayo de equivalente arena (ASTM D-2419) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75mm (No.4).

#### **2.2.1.4.3.-Dureza**

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito.

El ensayo de abrasión por la máquina de Los Ángeles (ASTM C-131) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión.

#### **2.2.1.4.4.-Forma de partícula**

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

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente se da con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración.

Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

#### **2.2.1.4.5.-Textura superficial**

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no sólo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El triturado produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

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

#### **2.2.1.4.6.-Capacidad de absorción**

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

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las que requieren un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción.

#### **2.2.1.4.7.-Peso específico**

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

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

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es que este ayuda en el cálculo del porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas.

Todos los agregados son, hasta cierto punto, porosos. Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente
- Peso específico efectivo

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra.

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

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto.

El peso específico total asume que los poros que absorben agua no absorben asfalto.

El peso específico aparente asume que todos los poros que son permeables al agua absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera.

Por lo tanto, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

#### **2.2.1.4.8.-Afinidad con el asfalto**

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas trapeanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua.

Los agregados silíceos (ej. cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con precaución.

#### **2.2.1.5.-Importancia del muestreo de agregado.**

Los buenos procedimientos de control de calidad requieren de pruebas durante los procesos de producción, acopiado, y manejo, para:

- Asegurar que solamente se use material satisfactorio en la mezcla de pavimentación.
- Proporcionar un registro permanente como evidencia de que los materiales cumplen con las especificaciones de la obra.

Obviamente, no resulta práctico ensayar todo el agregado que está siendo producido o ensayar todo el contenido del acopio. Solo es posible ensayar muestras de estos materiales. La muestra seleccionada debe ser verdaderamente representativa de todo el agregado para que los resultados de los ensayos sean confiables.

#### **2.2.2.-Cemento asfáltico**

El asfalto es un material viscoso, pegajoso de color negro, usado como aglomerante cementante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas. También es utilizado como impermeabilizante. Su consistencia es entre sólido y semisólido a temperaturas ambientales. El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo XIX, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz.

El ligante asfáltico, comúnmente llamado asfalto, betún, bitumen o cemento asfáltico, es un material de color oscuro procedente de la destilación del petróleo y está compuesto por asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados, en una proporción tal que hacen de este un material muy viscoso a temperatura ambiente, y su viscosidad

disminuye con el incremento de dicha temperatura y su propiedad principal es la de ser aglutinante o ligante.

Las cualidades fundamentales del asfalto son: su alta adhesividad (capacidad de aglomerar áridos dando cohesión, duradera y su capacidad de impermeabilizar, por lo cual es un material idóneo para su empleo en pavimentación. Es comúnmente utilizado como cementante en mezclas de concreto asfáltico, para la construcción de carreteras, y aunque tiene diversos usos y aplicaciones en otros aspectos de la ingeniería y la industria petroquímica, su principal campo de aplicación es en la ingeniería de pavimentos.

#### **2.2.2.1.-Clasificación del Cemento Asfáltico (CA)**

La clasificación de los cementos asfálticos, ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de métodos de ensayos que en su mayoría son empíricos; lo anterior, principalmente debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades o características químicas de los asfaltos. Los sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

- 1) Sistema de Clasificación por Penetración
- 2) Sistema de Clasificación por Viscosidad.

##### **2.2.2.1.1.-Sistema de clasificación por penetración**

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras en la región. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administración, FHWH), y posteriormente en 1931, la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la clasificación de asfaltos por penetración. Asimismo, en 1921 la ASTM desarrolló la primera especificación para cementos asfálticos clasificados por penetración para propósitos de pavimentación, la cual sufrió un cambio significativo en 1968, al reducir el número de tipos de cemento asfáltico de 10 a 5.

Cabe señalar que la clasificación del asfalto por penetración, conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la norma ASTM D 946, “Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction”. A continuación, en la Tabla 5, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

Tabla N°3 Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-

| Ensayo                                                                             | Norma de ensayo ASTM | Clasificación por Penetración (Grados de Penetración) |     |         |     |          |     |         |     |         |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|-----|---------|-----|----------|-----|---------|-----|---------|-----|
|                                                                                    |                      | 40 - 50                                               |     | 60 - 70 |     | 85 - 100 |     | 120-150 |     | 200-300 |     |
|                                                                                    |                      | Mín                                                   | Máx | Mín     | Máx | Mín      | Máx | Mín     | Máx | Mín     | Máx |
| Penetración (0.1mm)                                                                | D 5                  | 40                                                    | 50  | 60      | 70  | 85       | 100 | 120     | 150 | 200     | 300 |
| Flash Point (°C)                                                                   | D 92                 | 232                                                   | --- | 232     | --- | 232      | --- | 218     | --- | 177     | --- |
| Ductilidad (cm)                                                                    | D 113                | 100                                                   | --- | 100     | --- | 100      | --- | 100     | --- | 100     | --- |
| Solubilidad (%)                                                                    | D 2042               | 99.0                                                  | --- | 99.0    | --- | 99.0     | --- | 99.0    | --- | 99.0    | --- |
| Ensayos en Residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D 1754. |                      |                                                       |     |         |     |          |     |         |     |         |     |
| Penetración (%)                                                                    | D 5                  | 55+                                                   | --- | 52+     | --- | 47+      | --- | 42+     | --- | 37+     | --- |
| Ductilidad (cm)                                                                    | D 113                | ---                                                   | --- | 50      | --- | 75       | --- | 100     | --- | 100     | --- |

Fuente: Especificación ASTM D 946-82 (Re aprobada 2005)

#### 2.2.2.1.2 Sistema de clasificación por viscosidad

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960, mediante el cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos. Dicho sistema de clasificación fue concebido debido a las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración, que posee la imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto o no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación de la mezcla asfáltica.

#### 2.2.2.2.-Propiedades físicas del asfalto

Antes que el intercambio de crudo en el mercado fuera algo corriente, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo a que las

fuentes de asfalto tuvieran propiedades consistentes. Al integrarse el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas.

De estas variaciones, salió la necesidad de poderse evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

#### **2.2.2.2.1.- Adhesión y Cohesión**

El tema de la adherencia entre el ligante y el agregado es complejo, interviniendo en su estudio un número considerable de variables. La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado.

La falta de adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico, ha sido tema de numerosos análisis tendientes a solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos como consecuencia de este fenómeno. La misma genera la formación de desprendimientos, los que afectan negativamente a la estructura, ya sea, a nivel de superficie de rodadura o favoreciendo el ingreso de los agentes agresivos a las carpetas inferiores del paquete estructural.

A los fines de analizar la adherencia agregado - ligante, existen innumerables métodos en la gran mayoría de ellos la evaluación se efectúa a partir de una valoración visual del desprendimiento también denominado “stripping”. Esta valoración se lleva a cabo luego de poner en contacto a la mezcla asfáltica (o una determinada fracción de la misma) con agua bajo condiciones y tiempo determinadas conforme a cada uno de los métodos particulares.

Esto nos lleva a buscar una forma de valorar el fenómeno a través de otro tipo de ensayos o metodologías que, en principio, pongan en evidencia uno de los principales

problemas a los cuales conduce una inadecuada adherencia entre agregado y ligante, al menos desde el punto de vista estructural, que consiste en la pérdida de cohesión interna con la posterior disminución de la capacidad portante de las mismas, tal el caso del ensayo de módulo.

Figura N° 4 Acción desenvuelta del agua



Fuente: Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua a las mezclas  
asfálticas

#### 2.2.2.2.2.- Susceptibilidad Térmica

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

#### **2.2.2.2.3.- Durabilidad**

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

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). Ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.

Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura.

Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

#### **2.2.3.-Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de asfalto. Se elaboran en una planta que calienta el material pétreo a una temperatura de 140 ó 150 °C y el cemento asfáltico a una temperatura de 110 a 130 °C.

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

Después que el material pétreo esté caliente y seco se mezclan sus componentes de acuerdo a una composición granulométrica aprobada, incorporándole a continuación el cemento asfáltico en una cantidad previamente definida.

Las mezclas terminadas se extienden en capas uniformes en el espesor y ancho requeridos, para luego ser compactadas a temperaturas superiores a los 90 °C.

Un pavimento de concreto asfáltico debe cumplir los siguientes objetivos principales:

- a. Suficiente estabilidad** en la mezcla como para satisfacer las exigencias del servicio y las demandas del tránsito sin distorsiones o desplazamientos.
- b. Suficiente asfalto** para asegurar la obtención de un pavimento durable, que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- c. Suficiente trabajabilidad** como para permitir una eficiente operación constructiva en la elaboración de la mezcla y su compactación.
- d. Suficientes vacíos** en la mezcla compactada, para proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional, afloramientos de asfalto y pérdidas de estabilidad

Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall y el Método Superpave. En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall. Ambos métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas

asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

### **2.2.3.1.- Clasificación de las mezclas asfálticas.**

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

#### **a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.**

- **Masilla asfáltica:** Polvo mineral más cemento asfáltico.
- **Mortero asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto asfáltico:** Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- **Macadam asfáltico:** Capa de rodadura formada por una sucesión de capas de mezcla asfáltica con materiales pétreos de diferentes granulometrías, colocando las de mayor granulometría abajo, y arriba la de menor granulometría. Luego se procede a la compactación con rodos y camiones.

#### **b) Por la Temperatura de puesta en obra.**

- ✓ **Mezclas asfálticas en Caliente:** El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C. Las plantas para la producción de mezclas en caliente se construyen de tal manera que, después de secar y calentar los agregados, los separa en diferentes grupos de tamaños, los recombina en las proporciones adecuadas, los mezcla con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportadores, que a su vez la colocan en la máquina pavimentadora para que esta la deposite sobre la vía con un espesor uniforme, después se

compacta mediante rodillos mientras la temperatura se conserva dentro de los rangos de especificación.

- ✓ **Mezclas asfálticas en Frío:** El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- ✓ **Mezclas asfálticas Tibias:** Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales. El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente.

#### c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- **Mezclas Cerradas o Densas:** Contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
- **Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- **Mezclas Abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12 %.

- **Mezclas Porosas o Drenantes:** Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre sí. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

**d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.**

- **Mezclas Gruesas:** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- **Mezclas Finas:** También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

**e) Por la Estructura del agregado pétreo.**

- ✚ **Mezclas con Esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- ✚ **Mezclas sin Esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas

**f) Por la Granulometría.**

- **Mezclas Continuas:** Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).

- *Mezclas Discontinuas*: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

### 2.2.3.2.-Características de la mezcla asfáltica

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

**-Densidad de la mezcla.-** La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

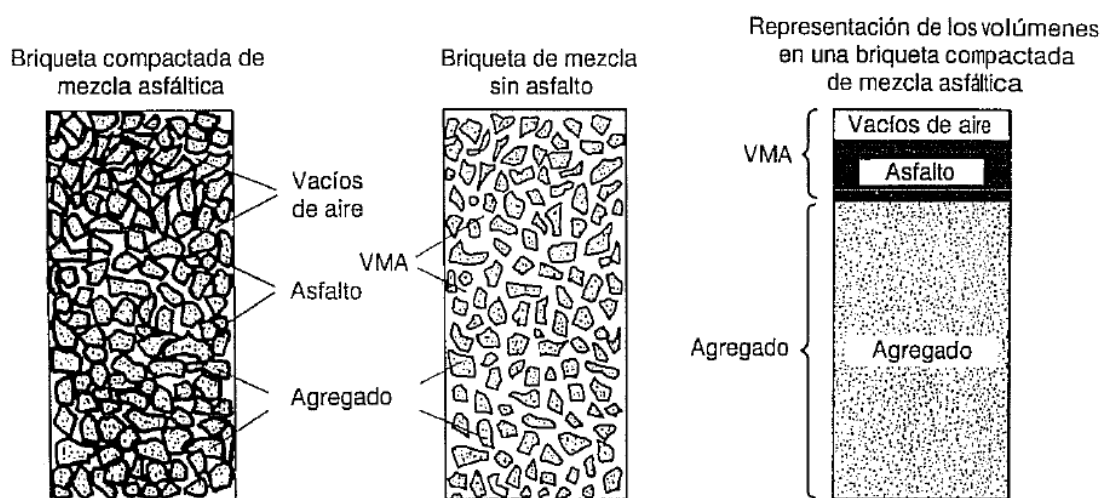
En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados.

**-Vacíos de aire, o simplemente vacíos.-** Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

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

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

Figura N° 5 Ilustración de VMA en una probeta compactada



Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

**-Vacíos en el agregado mineral.-** Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla.

Tabla N° 4 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

| Máximo tamaño de partícula nominal |       | Porcentaje mínimo VMA            |      |      |
|------------------------------------|-------|----------------------------------|------|------|
|                                    |       | Porcentaje diseño vacíos de aire |      |      |
| mm                                 | in    | 3.0                              | 4.0  | 5.0  |
| 1.18                               | No.16 | 21.5                             | 22.5 | 23.5 |
| 2.36                               | No.8  | 19.0                             | 20.0 | 21.0 |
| 4.75                               | No.6  | 16.0                             | 17.0 | 18.0 |
| 9.5                                | 3/8.  | 14.0                             | 15.0 | 16.0 |
| 12.5                               | 1/2.  | 13.0                             | 14.0 | 15.0 |
| 19                                 | 3/4.  | 12.0                             | 13.0 | 14.0 |
| 25                                 | 1.0   | 11.0                             | 12.0 | 13.0 |
| 37.5                               | 1.5   | 10.0                             | 11.0 | 12.0 |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

**-Contenido de asfalto.-** La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (N° 200). Los pequeños incrementos en la

cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: Poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad

### **2.2.3.3.- Propiedades de la mezcla asfáltica**

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

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

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben

ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito.

*Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.*

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

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

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

Tabla n° 5 Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

| CAUSAS                                                       | EFFECTOS                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exceso de asfalto en la mezcla                               | Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.                                                              |
| Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla                 | Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación. |
| Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas | Ahuellamiento y canalización.                                                                                         |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente

### ***-Durabilidad***

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

*Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son:*

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

Una **graduación densa** de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla.

Un **agregado firme y duro** resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

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

Tabla N° 6 Causas y efectos de un poco durabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

### ***-Flexibilidad***

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

### ***--Resistencia a la fatiga***

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

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

Tabla N° 7 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

| CAUSAS                          | EFFECTOS                                                                   |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Bajo contenido de asfalto       | Agrietamiento por fatiga                                                   |
| Vacios altos de diseño          | Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga. |
| Falta de compactación           | Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga. |
| Espesor inadecuado de pavimento | Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.                    |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

#### **-Resistencia al deslizamiento.-**

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los

agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla N°8 Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

| CAUSAS                                   | EFFECTOS                                     |
|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Exceso de asfalto                        | Exudación, poca resistencia al deslizamiento |
| Agregado mal graduado o con mala textura | Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo   |
| Agregado pulido en la mezcla             | Poca resistencia al deslizamiento            |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

### **--Impermeabilidad**

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. *Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada*, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

Tabla N° 9 Causas y efectos de la permeabilidad

| CAUSAS                                          | EFFECTOS                                                                                                       |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bajo contenido de asfalto                       | Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla. |
| Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño | El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación Y desintegración de la mezcla.  |
| Compactación inadecuada.                        | Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.     |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

### **--Trabajabilidad**

*La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada.* Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno

mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla N°10 Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

| CAUSAS                             | EFFECTOS                                                                            |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tamaño máximo de partícula: grande | Superficie áspera, difícil de colocar.                                              |
| Demasiado agregado grueso          | Puede ser difícil de compactar                                                      |
| Temperatura muy baja de mezcla     | Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar. |
| Demasiada arena de tamaño medio    | La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.             |
| Bajo contenido de relleno mineral  | Mezcla tierna, altamente permeable                                                  |
| Alto contenido de relleno mineral  | Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.                               |

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

#### 2.2.3.4.-Metodología de diseño Marshall

##### 2.2.3.4.1.-Consideraciones preliminares

El Método de dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla.

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall,

determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C (140 °F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

Tabla N° 11 Criterio de diseño Marshall

| Método Marshall                                               | Tráfico ligero |      | Tráfico medio  |      | Tráfico pesado |      |
|---------------------------------------------------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|                                                               | Carpeta y base |      | carpeta y base |      | carpeta y base |      |
| Criterio de mezcla                                            | Mín            | Máx  | Mín            | Máx  | Mín            | Máx  |
| Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes | 35             |      | 50             |      | 75             |      |
| Estabilidad, (N)<br>(lb)                                      | 3336           |      | 5338           |      | 8006           |      |
|                                                               | 750            | ---- | 1200           | ---- | 1800           | ---- |
| Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)                                    | 8              | 18   | 8              | 16   | 8              | 14   |
| Porcentaje de vacíos                                          | 3              | 5    | 3              | 5    | 3              | 5    |
| Porcentaje de vacíos en los agregados minerales               |                |      |                |      |                |      |
| Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto                      | 70             | 80   | 65             | 78   | 65             | 75   |

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado.

Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del Flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia para

alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.

El **contenido óptimo de asfalto** se determina, de acuerdo a recomendación del Instituto del Asfalto (Manual MS - 2), a través de la media aritmética de los porcentajes que llevan a:

- La máxima estabilidad
- La máxima densidad de la mezcla
- Volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la Fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto ( $V_b$ ) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire ( $V_v$ ) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

#### **2.2.3.4.2.- Valor de Estabilidad Marshall**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador de cuadrante. Luego se suspende la carga una vez que se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el Valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

#### **2.2.3.4.3.- Valor de Fluencia Marshall**

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

#### **2.2.3.4.4.- Relaciones y Observaciones de los Resultados de los Ensayos**

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas.

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

## 2.3.-Efectos del agua sobre mezcla asfáltica

### 2.3.1.-Definición.-

El daño por humedad en mezclas asfálticas se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior de su microestructura. Una revisión literaria en este tema revela que aunque el efecto adverso del agua en las propiedades de adhesión de sistemas agregado-cemento asfáltico se empezó a investigar desde la primera mitad del siglo pasado, este fenómeno solo llamó la atención de las agencias encargadas de administrar las redes de infraestructura vial en la década de 1.980.

En la actualidad, la mayoría de estas agencias en Estados Unidos y Europa cuentan con especificaciones para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como con procedimientos para emplear modificadores que promuevan dicha resistencia. No obstante, y a pesar de que en las últimas tres décadas ha aumentado sustancialmente la inversión en investigación sobre los efectos adversos del agua en las mezclas asfálticas, los mecanismos asociados a este fenómeno en el nivel microestructural aún no se comprenden en su totalidad

Figura N°6 Desprendimiento del ligante del agregado



El daño por la acción del agua en los pavimentos asfálticos es un serio problema en todo el mundo, demostrado tanto por estudios en laboratorio como por daños

evidentes observados en campo. Una investigación realizada por el Departamento del Transporte (DOT) de Colorado, EU, reporta que 82% de los estados de ese país requieren algún tratamiento para evitar el desprendimiento del asfalto por la acción del agua; para resolver este problema, 52% de éstos utiliza aditivos químicos líquidos, 15% usa aditivos químicos líquidos y cal, y 29% sólo utiliza cal.

Figura N° 7 Estructura dañada por la humedad



Fuente: Métodos prácticos para determinar la sensibilidad al agua de las mezclas  
asfálticas

El problema del daño por humedad conocido como stripping (DESPRENDIMIENTO), es un problema que está regido por el transporte de agua en medios porosos y la interacción con los materiales que componen la mezcla asfáltica. Los efectos derivados del stripping corresponden a una reducción en la cohesión de la carpeta asfáltica y la pérdida de adhesión entre la carpeta de asfalto y la superficie del agregado. En consecuencia, este daño afecta el desempeño del pavimento asfáltico con respecto a su módulo dinámico y la resistencia a la tensión. Según inspecciones de campo se ha encontrado que el stripping comienza en el fondo de la capa y trabaja hacia arriba atacando sobretodo el agregado grueso. En comparación con el envejecimiento el stripping genera daños respecto de la cohesión y adhesividad del asfalto en la mezcla evolucionando de manera vertical de abajo hacia arriba mientras que el envejecimiento produce el endurecimiento de la carpeta asfáltica por efecto de

los mecanismos mencionados y su evolución se produce desde la superficie hacia abajo.

El stripping es considerado como un daño funcional del pavimento mientras que el envejecimiento se considera como un daño superficial pero que a la postre contribuye en el deterioro del pavimento ya que al producirse el endurecimiento y fragilidad de la película de asfalto, se forma agrietamiento que permite el ingreso del agua al interior de la capa de pavimento.

Para que esto ocurra es necesario que exista algún elemento que permita el ingreso de agua o vapor dentro de la mezcla y esta situación es atribuible a una deficiente superficie de rodadura y a problemas de drenaje.

El stripping es asociado a cinco diferentes mecanismos de funcionamiento, los cuales operan de manera individual o algunas veces de manera conjunta.

Los mecanismos asociados al stripping son:

- ✓ El desprendimiento asociado por el rompimiento de los vínculos generados por la polaridad de los materiales y el agua.
- ✓ El desplazamiento por efecto de la penetración del agua en el agregado a causa del rompimiento de la película de asfalto.
- ✓ La formación de emulsiones espontaneas donde el asfalto representa la fase continua y el agua la fase discontinua.
- ✓ La presión de poros excesiva en mezclas asfálticas con alto contenido de vacíos producida por el tráfico el cual induce presiones sobre el agua contenida en los poros.
- ✓ El bombeo de agua producido por las llantas de los vehículos sobre las mezclas asfálticas saturadas.

### **2.3.2.- Mecanismos de los daños producidos por el agua**

El daño producido por el agua en las mezclas bituminosas en caliente, puede ser causado por la pérdida de adhesión entre el ligante y los áridos así como por la

pérdida de cohesión en la mezcla. Se puede diferenciar entre fallo adhesivo y fallo cohesivo.

--El **fallo adhesivo** ocurre entre el ligante y el árido. Cuando el agua penetra en la interface entre el árido y el ligante, se reduce el contacto entre los dos materiales y causa un fallo de adherencia (Viswanathan, 2005; Arambula, 2007).

Figura N°8 Presencia de agua en el agregado

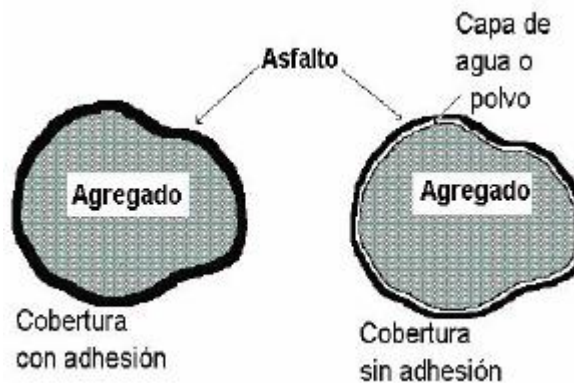
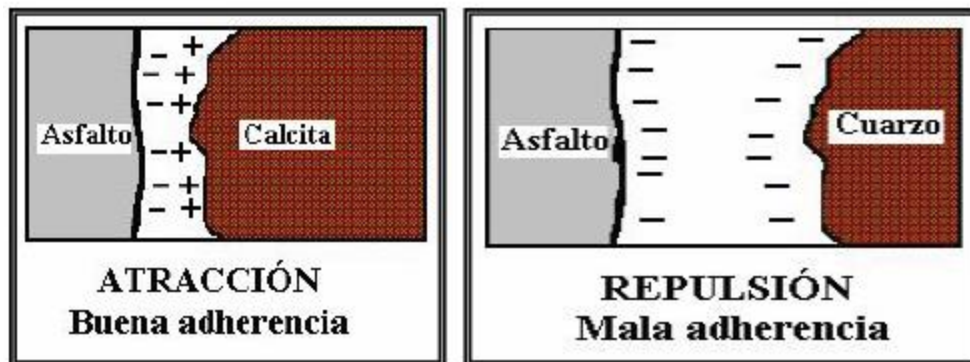


Figura 9 Afinidad entre el asfalto y agregados



#### Falta de adhesión entre el agregado y el asfalto

El principal mecanismo de daño a los pavimentos asfálticos por la acción del agua es el desprendimiento (stripping) entre el asfalto y el agregado. Este desprendimiento se basa en un fenómeno químico en el que las moléculas de agua alteran las interacciones en la superficie que está entre ambos. Todos los agregados presentan

mayor afinidad hacia el agua, por lo que son más rápidamente humectados por ésta que por el asfalto.

La adhesión, hablando de la interacción agregado-asfalto, se define como la formación de un enlace (puente) químico entre éstos. Está ampliamente documentado y demostrado que el agua penetra en la mezcla asfáltica por ósmosis. La cantidad que puede pasar a través de la película de asfalto depende del espesor de éste, así como de su dureza.

--El **fallo cohesivo** tiene lugar dentro del ligante (Asphalt Institute, 2007), reduce la fuerza de cohesión del aglutinante del ligante (los enlaces entre las moléculas de ligante se rompen), da lugar a su dispersión o pérdida de concentración y causa una reducción máxima en la rigidez de la mezcla. También puede ocurrir una ruptura de los enlaces árido-a-árido por la acción del agua (relacionado directamente con la solubilidad de los áridos).

Algunos investigadores (Terrel et al., 1994; Kanitpong et al., 2003), consideran que los daños por humedad en las mezclas bituminosas en caliente se deben más a un fallo adhesivo que a un fallo cohesivo, a pesar de ello otros investigadores sugieren que la probabilidad de que se produzca un fallo cohesivo es mayor.

Sin embargo, dado que el mecanismo de fallo cohesivo lleva, en última instancia, a un fallo adhesivo, la mayoría de los casos de fallo cohesivo sólo pueden deducirse en lugar de observarse, y el mecanismo final, es decir, el adhesivo, se indica como la causa. Así, aunque la definición de daño producido por el agua en mezclas bituminosas, ha sido considerado como el fallo de las uniones adhesivas y cohesivas entre el ligante y los áridos en presencia de agua, se ha demostrado que es difícil de distinguir entre ambos modos de fallo, a menos que la superficie de fallo en la mezcla bituminosa se inspeccione visualmente a posterior (Sunghwan et al., 2005).

### **Falta de cohesión entre las moléculas del asfalto**

La fuerza con la que se unen las moléculas del asfalto se denomina cohesión. Cuando la cohesión es grande, ya sea por su naturaleza misma o por la incorporación de

polímeros, la resistencia de la mezcla al daño causado por la humedad aumenta. El agua que queda atrapada en los vacíos de la mezcla asfáltica se evapora conforme aumenta la temperatura, lo que rompe la película de asfalto.

### **Falta de cohesión entre las moléculas del agregado**

Algunos investigadores proponen que otra de las causas del daño por la humedad en las mezclas asfálticas es la falta de cohesión entre las moléculas del agregado, ya que una vez que el agua penetró por la película de asfalto, llegando hasta el agregado, éste es disuelto, lo cual genera esta falta de cohesión

Los mecanismos que contribuyen al daño producido por el agua, son el desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión en los poros, lavado hidráulico, así como el pH del agua, estos pueden actuar por separado o de forma conjunta (Shah, 2003; Solamanian et al., 2003; Bagampadde et al., 2004). A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

- **Desprendimiento:** Es la separación microscópica de la película de ligante de la superficie del árido por una delgada capa de agua sin la ruptura de la película de ligante.
- **Desplazamiento:** Se produce cuando el ligante es eliminado de la superficie del árido por el agua. En comparación con el desprendimiento, el agua libre llega a la superficie del árido a través de una rotura en la capa del ligante. La rotura se produce en los puntos de contacto con los áridos. El origen de la ruptura puede ser debida a un revestimiento incompleto de los áridos durante la mezcla, a partículas de polvo en los áridos, a las cargas producidas por el tráfico o por condiciones ambientales como ciclos de congelación-descongelación (Kiggundu et al., 1988; Little et al., 2003; Viswanathan, 2005).
- **Emulsificación espontánea:** Se produce cuando se forma una emulsión inversa de gotas de agua en el ligante. Esto puede ocurrir cuando se encuentran presentes minerales de la arcilla u otro tipo de aditivos (Asphalt Institute, 2007). Hay dos tipos de emulsiones posibles entre el agua y el

ligante. La primera es la típica emulsión asfáltica donde el aceite/ligante está disperso en agua. La segunda es una emulsión invertida donde el agua está dispersa en el ligante.

- **Presión en los poros:** El agua queda atrapada en los huecos de aire de la mezcla, el aumento de la temperatura y las cargas producidas por el tráfico, posibilitan la evaporación del agua que puede generar suficiente presión como para ocasionar la ruptura de la película de ligante (Qing et al., 2005)
- **Lavado hidráulico:** Es debido al movimiento de los neumáticos sobre la superficie saturada del firme (Qing et al., 2005; Caro et al., 2008; Mehrara et al., 2011). Cuando la rueda de un vehículo pesado se mueve sobre un firme saturado, el agua es presurizada dentro de los espacios vacíos del firme delante de la carga móvil e inmediatamente aliviada detrás de ella. Así, el ligante se elimina de las capas superficiales, donde la carga impuesta por tráfico es la más alta (Kim et al., 2004). Este ciclo de compresión-tensión es probable que contribuya a la pérdida de la película de ligante de la superficie total. Teniendo en cuenta que las capas inferiores de firme están sometidas a una exposición prolongada al agua, y estas capas están en tensión bajo la aplicación de cargas de tráfico, se podría pensar que la pérdida de recubrimiento comienza en las capas inferiores y progresa hacia arriba (Kandhal et al., 2001b).
- **pH del agua de contacto:** Afecta a la adherencia entre el árido y el ligante. La estabilización del pH en la interface árido-ligante puede minimizar la ruptura del enlace, proporcionar enlaces fuertes y duraderos y reducir la pérdida de recubrimiento (Little et al., 2003).

### 2.3.3.-Modos de transporte del agua en mezclas bituminosas

Los mecanismos de daño producidos por el agua en mezclas bituminosas se inician con los modos de transporte mediante los cuales el agua alcanza el interior de la estructura del material (el agua en estado líquido o vapor se infiltra en la mezcla bituminosa así como al ligante o mastico y alcanza la interface árido-ligante) y se

producen cambios en la estructura interna que conducen a una pérdida de capacidad de carga del material, y culminan con las diversas manifestaciones de este deterioro.

Los fallos adhesivo y cohesivo son el último paso en un proceso que comienza con diferentes modos de transporte del agua y que dan lugar a la generación de los daños producidos por el agua (Caro et al., 2008).

Existen tres modos principales de transporte de agua al interior de las mezclas bituminosas en un pavimento (Hunter et al., 2002; Caro et al., 2008; Breakah et al., 2009) que dependen de las condiciones ambientales y de la estructura de los huecos en la mezcla bituminosa:

- **Infiltración de agua líquida** desde la superficie del pavimento hacia el interior de la mezcla a través de los huecos interconectados, *permeabilidad*: la permeabilidad puede definirse como la capacidad de un material poroso para permitir el flujo de agua a través de sus huecos. Varios investigadores han llevado a cabo estudios para medir, calcular y simular la permeabilidad (Mohammad et al., 2003; Masad et al., 2006). Los resultados de muchos de estos estudios muestran que la estructura de los huecos aire, el tamaño y la granulometría de los áridos así como el espesor de la capa, y procesos de compactación son las variables que afectan a la permeabilidad. Sin embargo, debido a la naturaleza y heterogeneidad de la mezcla bituminosa, no siempre es fácil desarrollar una relación directa entre estas variables y la permeabilidad.
- **Ascensión capilar** de agua líquida proveniente de la superficie inferior de la mezcla (Caro et al., 2008). Ascenso capilar se define como el aumento de un líquido por encima del nivel de presión cero, debido a una fuerza ascendente total producida por la atracción de las moléculas del líquido a una superficie sólida. En los firmes, el ascenso capilar permite que el agua del subsuelo pueda ser transportada a través de los “capilares” formados por los huecos interconectados. La altura final de la columna de agua por encima de la superficie de saturación, así como la tasa de subida, dependerá de: (1) las

características geométricas de los capilares, (2) la tensión superficial del agua, (3) la densidad del agua y (4) el ángulo de contacto entre el líquido y sólido.

- ***Difusión del agua líquida y/o vapor de agua*** a través de los componentes constitutivos de la mezcla: la cantidad de vapor de agua y la velocidad a la que se acumula en una mezcla bituminosa dependerá de tres factores principales (Caro et al., 2008): (1) humedad relativa, (2) coeficientes de difusión y (3) tipo de almacenamiento y capacidad de almacenamiento (también llamado potencial de retención de agua). La humedad relativa del aire depende de las condiciones ambientales, mientras que el coeficiente de difusión y la capacidad de almacenamiento son propiedades del material. La tasa de almacenamiento y capacidad de almacenamiento dependerá de las propiedades químicas y termodinámicas del material.

#### **2.3.4.-Manifestaciones en el firme de los daños producidos por el agua en las mezclas bituminosas**

Las manifestaciones en el firme, debidas al deterioro causado por la presencia del agua, son similares a las producidas por otros aspectos como los materiales, el diseño de la mezcla bituminosa y su construcción.

Se produce una reducción de la resistencia en la mezcla bituminosa. La reducción de la resistencia puede contribuir al desarrollo de diversas formas de deterioro del firme, como el agrietamiento y la formación de roderas (Boadu, 2005; Sengoz et al., 2007), reduciendo así la vida del firme (Qing et al., 2005). Muchas veces resulta difícil de identificar porque los indicadores en la superficie pueden llevar años para mostrarse (Shah, 2003).

Los tipos de daños que se pueden presentar son (Solamania et al., 2003):

***Exudaciones, grietas y roderas:*** Causadas por una parcial o completa pérdida de adhesión entre la superficie del árido y el ligante, que puede ser debida a la presencia de agua en la mezcla por inadecuado secado de los áridos, mal drenaje o una mala

compactación. Se ve agravado por la presencia de los ciclos de tráfico y de congelación-descongelación.

***Raveling***: Consiste en el desprendimiento progresivo de los áridos de la superficie de la mezcla, agravado por los neumáticos de los vehículos sobre la mezcla bituminosa. (Qing et al., 2005; Arambula, 2007; Caro et al., 2008). Puede ser causada por una mala compactación, contenido de ligante bajo y/o alto contenido de finos.

#### **2.4.5.- Factores que influyen en los daños producidos por el agua**

Los daños producidos por el agua en una mezcla bituminosa en caliente, tienen un impacto económico significativo en términos de mantenimiento excesivo y costos de rehabilitación.

La sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas depende de los efectos combinados de las propiedades del material utilizado, los parámetros de diseño de la mezcla, el nivel de tráfico al que se ve sometida y los factores ambientales.

Se van a distinguir entre factores internos y factores externos.

##### **2.3.5.1.- Factores Internos**

Los factores internos que influyen en el daño provocado por el agua están directamente relacionados con las propiedades de los materiales que forman la mezcla bituminosa, los áridos y el ligante.

##### ***Áridos***

Los áridos constituyen la mayor parte de la mezcla bituminosa (alrededor del 94% en peso) y proporcionan la superficie sobre la que el ligante se adhiere. Los áridos varían ampliamente en términos de composición, superficie química, morfología, distribución del tamaño de los poros, entre otros. Por lo tanto el árido ya sea el grueso o el fino debe ser examinado cuidadosamente en la evaluación de los daños por el agua (Jahromi, 2009). En la mayoría de los casos, el desprendimiento (stripping), tiene lugar en la porción del árido grueso de la mezcla bituminosa, aunque hay otros

casos en los que el árido fino es sensible al agua, y el desprendimiento se produce en esta parte de la mezcla (Sengoz et al., 2007).

Las características físicas de los áridos: Angularidad, porosidad, forma, textura, juegan un papel importante. Si el árido es angular y tiene una textura áspera, la adhesión con el ligante es mayor que si el árido tiene una textura lisa y redondeada (Cheng et al., 2002). Sin embargo si los áridos son muy angulares en algunos casos son difíciles de recubrir uniformemente y sus bordes pueden perforar la película de ligante haciendo que la mezcla sea más susceptible al agua (Abo-Qudais et al., 2007).

La alta porosidad y capacidad de absorción del árido permite que el ligante penetre más profundamente en los poros del árido y mejora la unión ligante-árido. Sin embargo, en proceso de secado, lo que es perjudicial (Abo-Qudais et al., 2007).

Cuando el árido tiene un área de superficie alta, forma una mejor unión con el ligante ya que la región de contacto entre los dos materiales es mayor. Cuando los áridos están húmedos o cubiertos de polvo, el polvo aumenta la viscosidad del ligante y en contacto con agua se rompe el vínculo árido-ligante.

La composición mineralógica del árido en términos de su naturaleza hidrófila e hidrófoba y su afinidad con el ligante, también son importantes (Arámbula, 2007). Los áridos están formados, en su mayoría, por compuestos inorgánicos polares que difieren en sus propiedades. Los áridos con alto contenido en carbonato (hidrófobo/básico) forman uniones más fuertes con el ligante que los áridos con alto contenido en sílice (hidrófobo /ácido). Así, mezclas bituminosas con áridos calizos, cuyo componente principal es el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), son más resistentes a los daños por agua. Los áridos calizos, después de la molienda, exponen los iones calcio con características electropositivas, estos iones compiten en la unión con el agua y el ligante. Debido a su carácter básico forman enlaces más fuertes con los ácidos del ligante, creando sales hidrófobas. Mezclas bituminosas con áridos con altos contenidos en sílice, como el granito o como el basalto, son más susceptibles al agua, debido a que los enlaces que forman con el ligante son más débiles (Bagampadde et al., 2005; Gorkem et al., 2009).

### ***Ligante***

El betún es una mezcla de compuestos orgánicos en su mayoría hidrocarburos con distintas estructuras y peso molecular, no polares en comparación con los áridos. Además de los hidrocarburos, el betún contiene cierta cantidad de compuestos orgánicos polares. Los compuestos orgánicos polares incluyen ácidos y bases. Hay compuestos orgánicos ácidos como los ácidos carboxílicos y anhídridos. El betún se compone de un número elevado de hidrocarburos con diferentes heteroátomos (nitrógeno, oxígeno y azufre) y/o trazas de metales (por ejemplo hierro, vanadio y níquel). Los heteroátomos forman compuestos (grupos funcionales) heterocíclicos como pirrolidina, piridina, quinolina, sulfóxidos, cetonas y ácidos carboxílicos. Tales grupos funcionales juegan un papel importante en la interacción entre el betún y la superficie de los áridos, y por consiguiente, en la resistencia de las mezclas a los daños producidos por el agua. La resistencia en la unión interfacial árido ligante depende de la tendencia de los grupos funcionales a ser absorbidos sobre la superficie de los áridos y a la desorción relativa por el agua. En general, los compuestos polares parecen ser los más fácilmente desplazados por el agua (como los ácidos carboxílicos, sulfóxidos y anhídridos). La resistencia más alta al agua se ha asociado a los fenoles, cetonas y bases nitrogenadas (Bagampadde et al., 2004; Arambula, 2007).

El ligante en presencia de agua, modifica su consistencia y aumenta su rigidez, el incremento de rigidez causa contracción del ligante sin cambio de volumen, lo cuál puede ser una causa de stripping. El endurecimiento va a influir en el enlace árido-ligante, debido a los cambios en la composición química que se producen durante el envejecimiento (Curtis et al., 1993).

Los betunes modificados con polímeros, como elastómeros y plastómeros, disminuyen la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas con respecto a los betunes base (Gorkem et al., 2009).

El espesor de la película de ligante es otro de los factores a tener en cuenta en los daños causados por el agua, el fracaso adhesivo suele ocurrir cuando las películas de ligante son más delgadas (Arambula, 2007). Sengoz et al. (2007) determinaron,

mediante la Modified Lottman Test, que el intervalo óptimo de espesor de la película de ligante está entre 9,5 y 10,5 mm.

El grado en el que afecta el betún va a depender de los áridos que se utilicen en la mezcla bituminosa (Lu et al., 2007), por lo tanto el betún es menos dominante, en este sentido, que los áridos (Sengoz et al., 2007).

### ***Enlace árido-ligante***

Los áridos y el ligante son los dos principales componentes de una mezcla bituminosa. Cada uno de estos componentes tiene sus propiedades químicas y físicas separadas, como se ha comentado anteriormente. Estas propiedades interactúan entre sí cuando ambos están en contacto. La adhesión entre el árido y el betún es un factor clave que determina la sensibilidad al agua de una mezcla bituminosa (Bhasin, 2006). La reacción química que tiene lugar entre ellos, ha sido generalmente aceptada para explicar por qué diferentes tipos de áridos presentan distintos grados de adherencia con el ligante en presencia de agua (Sunghwan et al., 2005). Las reacciones químicas se producen en el momento del mezclado de ligante y los áridos. A efectos de largo plazo estas reacciones químicas pueden afectar la durabilidad del firme. Cuando el ligante está caliente tiende a entrar en cualquier poro o grieta que posea el árido.

Los áridos proporcionan una superficie heterogénea que presenta varios sitios activos e inactivos que desempeñan un papel importante en la interacción con las moléculas de ligante (Curtis et al., 1993). Los sitios activos del árido contienen cargas que atraen y orientan a los compuestos polares del ligante. Los grupos polares que están presentes en el punto de contacto del ligante y el árido, se adhieren a la superficie debido a fuerzas electrostáticas, fuerzas de Van der Waal o enlace covalente (Caro et al., 2008). Cuando el betún moja a los áridos, en la interface se produce una absorción selectiva, seguida por una reacción química entre el material adsorbido y los compuestos de los áridos. En estas condiciones, los componentes ácidos de los materiales bituminosos reaccionan con los áridos básicos para formar compuestos insolubles en agua.

En este contexto, áridos básicos como la caliza, necesitan de los compuestos ácidos del ligante para formar enlaces químicos. Por ejemplo, el carbonato cálcico de la caliza reacciona con los ácidos carboxílicos del ligante, a altas temperaturas se forman sales insolubles.

Mientras que áridos silicios, como la cuarcita y el granito (Bagampadde et al., 2005), tienen compuestos ácidos que no formarán enlaces con los ácidos del ligante, aunque el árido puede ser cubierto por el ligante si se aplica suficiente calor y fuerza mecánica durante el mezclado (Asphalt Institute, 2007).

En la mayoría de los casos las mezclas bituminosas están formadas por diferentes tipos de áridos de distinta procedencia, por lo que tendrán también distinta composición química.

Hay que tener en cuenta que las moléculas de agua (dipolar) son atraídas a la superficie del árido con mayor fuerza que los compuestos del ligante (generalmente no polares, aunque contienen algunos componentes polares, como se comentó anteriormente) para satisfacer las demandas de energía en la superficie, por lo tanto el agua tenderá a desplazar el ligante del árido. Son varios los estudios (Cheng et al., 2002; Kim et al., 2004; Bhasin, 2006; Copeland 2007; Howson et al., 2007) que indican que este fenómeno es termodinámicamente favorable. Desde el punto de vista termodinámico es posible cuantificar la calidad de la adhesión del sistema árido-ligante y su susceptibilidad a la pérdida de adhesión por la presencia de agua mediante el empleo de la Energía Libre Superficial (ELS) de los materiales que están involucrados en el proceso.

### ***Permeabilidad y huecos aire***

El contenido de huecos aire y la permeabilidad de la mezcla, están influenciados por el contenido de ligante, la proporción de los áridos y el grado de compactación.

La permeabilidad puede definirse como la capacidad de un material poroso para permitir el flujo de agua a través de sus huecos (Arámbula, 2007). Altos contenidos de huecos de aire en las capas del firme permite la circulación del agua a través de

estos espacios. Los estudios han demostrado que con un contenido de huecos aire menor de 4% a 5%, los huecos están por lo general no interconectados y, por lo tanto, son impermeables al agua. Si el firme permanece permeable durante un período de tiempo prolongado, la pérdida por revestimiento (stripping) es probable que ocurra debido a la entrada de agua y a las presiones producidas en el poro inducida por el tráfico (Johnson et al, 2002).

#### **2.3.5.2 Factores Externos**

Algunos de los factores externos que influyen en el daño producido por el agua son la construcción, la producción, el nivel de tráfico y las condiciones ambientales.

##### ***-Fabricación de la mezcla bituminosa***

Los áridos que se emplean para la fabricación de la mezcla bituminosa se encuentran acopiados, si hay exceso de polvo o arcilla sobre ellos, la unión con el ligante no va a ser la adecuada, por lo que los áridos deben mantenerse limpios y separados unos de otros para evitar la contaminación.

También hay que prestar atención a las condiciones climáticas a las que se encuentran expuestos los acopios de los áridos, si llueve el árido puede absorber el agua. Una forma de aliviar esta situación es acopiar los áridos con una ligera pendiente, y en caso de los áridos finos cubrirlos (Asphalt Institute, 2007). Si el árido no se seca de manera adecuada, cuando se mezcle con el ligante, la adhesión va a ser menor en comparación con una superficie seca (Viswanathan, 2005).

El contenido de ligante debe ser el adecuado para que no se produzcan escurrimientos.

La mezcla bituminosa fabricada en planta debe ser trasladada rápidamente para evitar un enfriamiento excesivo.

##### ***-Proceso de construcción***

El proceso de construcción es también importante para crear un firme con buena resistencia a los daños producidos por el agua.

La compactación tiene como objetivo lograr la densidad adecuada durante el extendido de la mezcla bituminosa. Una compactación insuficiente será más susceptible a la entrada de agua. El equipo utilizado para la compactación debe ser el adecuado para evitar la fractura de los áridos, si esto ocurre los áridos que estaban cubiertos de ligante quedan expuestos a las condiciones ambientales. Probablemente, las juntas longitudinales es donde la densidad sea más difícil de alcanzar (Arambula, 2007; Asphalt Institute, 2007; Sengoz et al., 2007).

### ***-Tráfico***

Tanto el tipo como el volumen de tráfico son variables importantes. Cuando el firme se encuentra en un estado saturado, el agua contenida en la mezcla dentro de los huecos puede producir presión que junto con el paso de las ruedas de los vehículos produce estados de tensión-deformación que pueden acelerar la aparición de daños producidos por el agua (Shah et al., 2003; Sengoz et al., 2007).

### ***-Condiciones ambientales***

Las fluctuaciones de temperatura, los ciclos congelación-descongelación, los ciclos de lluvia-seco así como el pH del agua, son factores que provocan daños.

Cuando la temperatura del aire o el material de base son demasiado bajos, no se aconseja la construcción del firme, ya que la densidad adecuada puede ser difícil de lograr.

Los ciclos de congelación-descongelación producen que el agua que se encuentra dentro de los huecos aumente su volumen y al producirse la descongelación aparecen daños.

Los ciclos de mojado-seco dictan la cantidad de precipitaciones y las fluctuaciones en la capa freática por debajo del firme.

Cuanto mayor es el pH del agua más susceptible son las mezclas bituminosas al agua.

## **2.4.-Ensayos de laboratorio para caracterización de materiales componentes de la mezcla asfáltica.-**

### **2.4.1.-Ensayos para determinar las propiedades de los materiales pétreos**

#### **2.4.1.1.-Tamaño de partículas y graduación de los agregados (T27 de la AASHTO)**

Se usa un análisis granulométrico para determinar las propiedades relativas de los diferentes tamaños de partículas en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas o tamices cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente. Los tamices se agrupan colocando hasta arriba los que tienen la abertura mayor y debajo aquellos con aberturas sucesivamente más pequeñas. La muestra de agregado se agita con un vibrador mecánico de mallas y se determina el peso del material retenido en cada tamiz, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original. En el método T27 de la AASHTO se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de  $2\frac{1}{2}$ , 2,  $1\frac{1}{2}$ , 1,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{8}$  de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100, y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como No. 4, No. 10, etc.

**-Agregado Grueso:** Agregado que pasa el tamiz de 3'' y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)

**- Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75µm (No. 200)

**- Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75µm (No. 200).

**- Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.

**-Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos. -

**Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.

**-Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ningún llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.

**-Agregado Bien Graduado:** Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de un llenante mineral.

Tabla N°12 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas

| Aberturas de los tamices                                      | Mezclas Cerradas                   |                      |                    |                    |                    |                     |                   |                   |                    |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|                                                               | Tamaño Máximo Nominal del Agregado |                      |                    |                    |                    |                     |                   |                   |                    |
|                                                               | 2 pulg<br>(50.0mm)                 | 1 ½ pulg<br>(37.5mm) | 1 pulg<br>(25.0mm) | ¾ pulg<br>(19.0mm) | ½ pulg<br>(12.5mm) | 3/8 pulg<br>(9.5mm) | No. 4<br>(4.75mm) | No. 8<br>(2.36mm) | No. 16<br>(1.18mm) |
| Gradaciones para Mezclas de Agregados (Grueso, Fino y Filler) |                                    |                      |                    |                    |                    |                     |                   |                   |                    |
| 2 ½" (63 mm)                                                  | 100                                | ---                  | ---                | ---                | ---                | ---                 | ---               | ---               | ---                |
| 2" (50 mm)                                                    | 90-100                             | 100                  | ---                | ---                | ---                | ---                 | ---               | ---               | ---                |
| 1 ½" (37.5 mm)                                                | ---                                | 90-100               | 100                | ---                | ---                | ---                 | ---               | ---               | ---                |
| 1" (25.0 mm)                                                  | 60-80                              | ---                  | 90-100             | 100                | ---                | ---                 | ---               | ---               | ---                |
| ¾" (19.0 mm)                                                  | ---                                | 56-80                | ---                | 90-100             | 100                | ---                 | ---               | ---               | ---                |
| ½" (12.5 mm)                                                  | 35-65                              | ---                  | 56-80              | ---                | 90-100             | 100                 | ---               | ---               | ---                |
| 3/8" (9.5 mm)                                                 | ---                                | ---                  | ---                | ---                | ---                | 90-100              | 100               | ---               | ---                |
| No. 4 (4.75 mm)                                               | 14-47                              | 23-53                | 29-59              | 35-65              | 44-74              | 55-85               | 80-100            | ---               | ---                |
| No. 8 (2.36 mm)                                               | 10-36                              | 15-41                | 19-45              | 23-49              | 28-58              | 32-67               | 65-100            | ---               | 100                |
| No. 16 (1.18 mm)                                              | ---                                | ---                  | ---                | ---                | ---                | ---                 | 40-80             | ---               | 95-100             |
| No. 30 (600µm)                                                | ---                                | ---                  | ---                | ---                | ---                | ---                 | 35-65             | ---               | 70-95              |
| No. 50 (300 µm)                                               | 3-15                               | 4-16                 | 5-17               | 5-19               | 5-21               | 7-23                | 7-40              | ---               | 45-75              |
| No. 100 (150 µm)                                              | ---                                | ---                  | ---                | ---                | ---                | ---                 | 3-20              | ---               | 20-40              |
| No. 200 (75 µm)                                               | 0-5                                | 0-6                  | 1-7                | 2-8                | 2-10               | 2-10                | 2-10              | ---               | 9-20               |
| Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla.  |                                    |                      |                    |                    |                    |                     |                   |                   |                    |
|                                                               | 2-7                                | 3-8                  | 3-9                | 4-10               | 4-11               | 5-12                | 6-12              | 7-12              | 8-12               |

Fuente: ASTM D3515 Standard Specification for Hot-Mixed Hot Bituminous Mixtures

#### 2.4.1.2.-. Resistencia al desgaste (T96 de AASHTO)

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de Los Ángeles. La máquina que se usa en la prueba de Los Ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes en posición horizontal.

Para ejecutar la prueba de abrasión de Los Ángeles, se coloca dentro el cilindro una muestra limpia del agregado que se ha de probar junto con un peso estándar de esferas de acero como carga abrasiva. El tambor se hace girar 500 veces a una velocidad de 30 a 33 rpm, después de lo cual se retira la muestra de agregado y se agita en una malla del No. 12 (1,70 mm). El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa fina de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original.

El tipo de gradación selecciona será en función del tipo de materiales utilizados para el diseño de la mezcla.

Tabla N°13 Peso de agregado y N° de esferas para agregados gruesos hasta 1 ½  
ASTM C131

| MÉTODO                   |          | A                                   | B        | C        | D        |
|--------------------------|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| DIÁMETRO                 |          | CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr) |          |          |          |
| Pasa                     | Retenido |                                     |          |          |          |
| 1 ½"                     | 1"       | 1 250±25                            |          |          |          |
| 1"                       | ¾"       | 1 250±25                            |          |          |          |
| ¾"                       | ½"       | 1 250±10                            | 2 500±10 |          |          |
| ½"                       | 3/8"     | 1 250±10                            | 2 500±10 |          |          |
| 3/8"                     | ¼"       |                                     |          | 2 500±10 |          |
| ¼"                       | Nº4      |                                     |          | 2 500±10 |          |
| Nº4                      | Nº8      |                                     |          |          | 5 000±10 |
| PESO TOTAL               |          | 5 000±10                            | 5 000±10 | 5 000±10 | 5 000±10 |
| Nº de esferas            |          | 12                                  | 11       | 8        | 6        |
| Nº de revoluciones       |          | 500                                 | 500      | 500      | 500      |
| Tiempo de rotación, min. |          | 15                                  | 15       | 15       | 15       |

Fuente: Manual de diseño de pavimentos

#### **2.4.1.3.-Durabilidad o resistencia al intemperismo T104 de AASHTO**

Comúnmente, la durabilidad de los agregados se mide con una prueba de integridad, como se describe en el método T104 de AASHTO. Esta prueba mide la resistencia de los agregados a la desintegración en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Simula el intemperismo de los agregados que existen en la naturaleza.

Para la prueba se sumergen fracciones conocidas del agregado que se ha de probar en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Luego se retira el agregado y se seca en un horno hasta que alcance una masa constante. Se repite este proceso para un número especificado de ciclos, normalmente cinco. Después de los ciclos alternados de mojado y desecación, se divide al agregado en fracciones haciéndolo pasar por las mallas y se determina para cada fracción el porcentaje de pérdida de peso. El porcentaje de pérdida se expresa como un promedio pesado. Para un tamaño dado de malla, el porcentaje de pérdida promedio por peso es el producto del porcentaje que pasa por esa malla y el porcentaje que pasa por esa malla en el material original. El total de estos valores es el valor de prueba de pérdida en porcentaje.

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

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

La densidad relativa aparente,  $G_A$ , se calcula con base en el volumen neto de los agregados, esto es, sin contar los huecos permeables al agua.

La diferencia entre las densidades relativas aparente y la total equivalen a los huecos permeables al agua de los agregados. El volumen de estos huecos se puede medir pesando los agregados secos y en condiciones superficiales secas y saturadas, esto es,

con todos los vacíos permeables llenos de agua. La diferencia entre las dos masas es la masa absorbida. Normalmente se expresa a la absorción de agua como un porcentaje de la masa del agregado seco,

#### **2.4.1.5.-Partículas Planas y Alargadas ASTM D 4791**

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la norma ASTM D 4791 "Partículas alargadas y planas en agregados gruesos" y se aplica a agregados gruesos mayores de 4.75 mm.

#### **2.4.1.6.-Equivalente de arena ASTM D 2419**

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

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

#### **2.4.1.7.-Requisitos que deben cumplir los agregados**

##### **2.4.1.7.1.- Agregado Grueso.**

El material debe consistir en piedra o grava de buena calidad triturada (Retenidos en la malla de 4.75 mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a

uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos generales siguientes:

- ✓ Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 40% máx.
- ✓ Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104 12% máx.
- ✓ Caras fracturadas, ASTM D 5821 75% mín.
- ✓ Índice durabilidad (agregado grueso), AASHTO T 210 35% mín.

#### **2.4.1.7.2.-Agregado Fino.**

El material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según **AASHTO M 29** incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos generales siguientes:

- ✓ Equivalente de arena, AASHTO T 176 45% mín.
- ✓ Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 210 35% min.

#### **2.4.2.-Ensayos al Cemento Asfáltico**

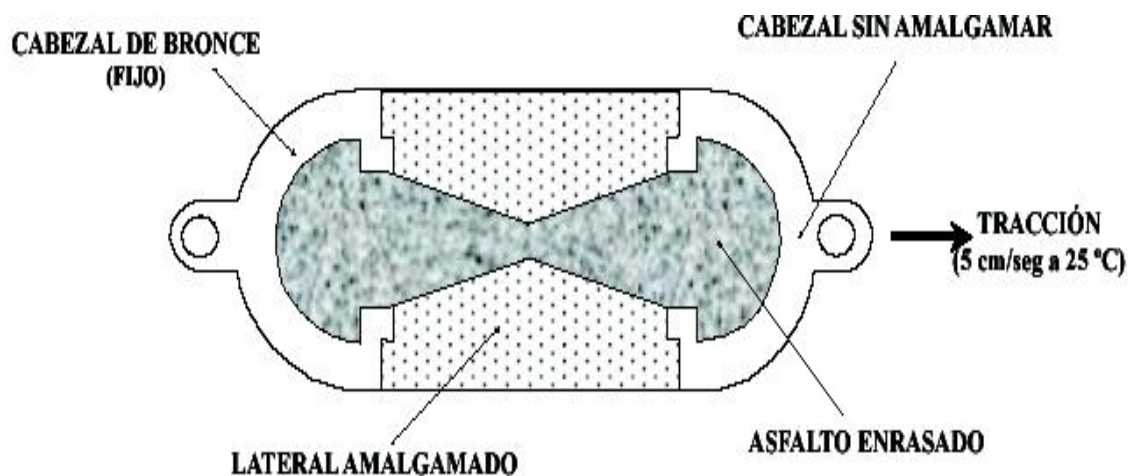
##### **2.4.2.1.-Ductilidad (ASTM D113-07)**

La ductilidad de un cemento asfáltico se mide con un ensayo tipo "extensión" para el que se moldea una probeta de cemento asfáltico en condiciones y medidas normalizadas. Se la lleva a la temperatura de ensayo de la norma, generalmente 25°C (77°F) y se separa una parte de la probeta de la otra a cierta velocidad, normalmente 5 cm por minuto, hasta que se rompa el hilo de asfalto que une ambos extremos de la muestra. La ductilidad del asfalto es la distancia (en centímetros) a la cual se rompe dicho hilo.

Algunos ingenieros consideran que la ductilidad es una característica importante de los cementos asfálticos. Sin embargo, generalmente se considera más significativa la presencia o ausencia de la misma, que su grado real. Algunos cementos asfálticos que tienen un grado muy alto de ductilidad son también más susceptibles a la temperatura.

Es decir, que la variación de la consistencia puede ser mayor debido al cambio de temperatura.

Figura 10 Ensayo de ductilidad

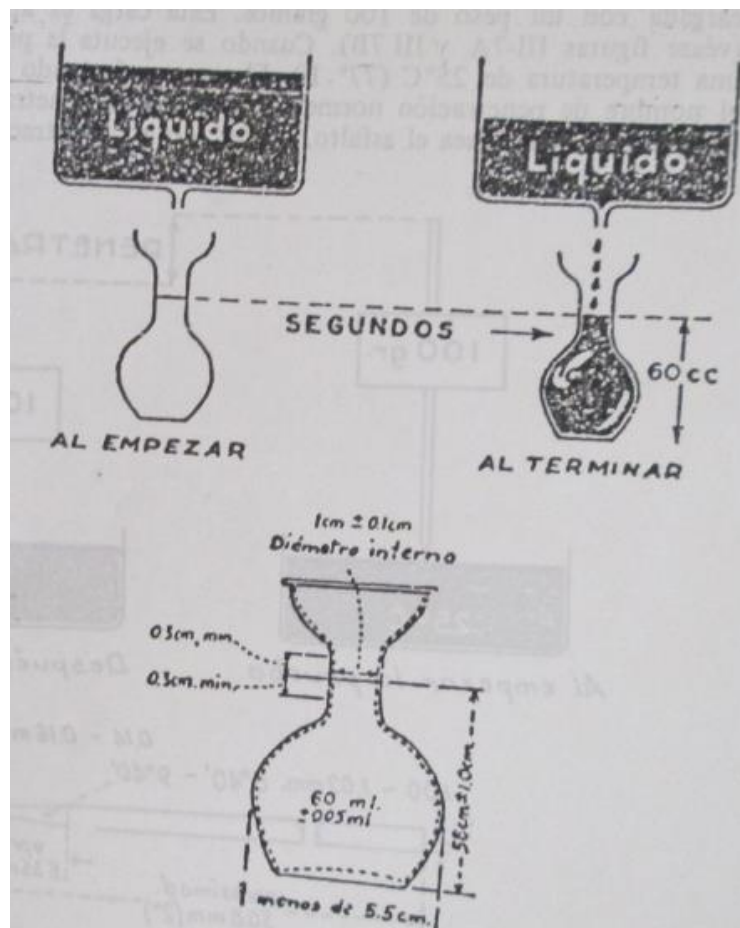


Fuente: Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento

#### 2.4.2.2.-Viscosidad (ASTM D2170-95)

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 °C y 135 °C. La viscosidad a 60 °C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado. Con el ensayo de viscosidad se puede determinar la temperatura de mezcla y de compactación hasta la cual se debe llevar el asfalto para conformar la mezcla.

Figura N°11 Ensayo de Viscosidad



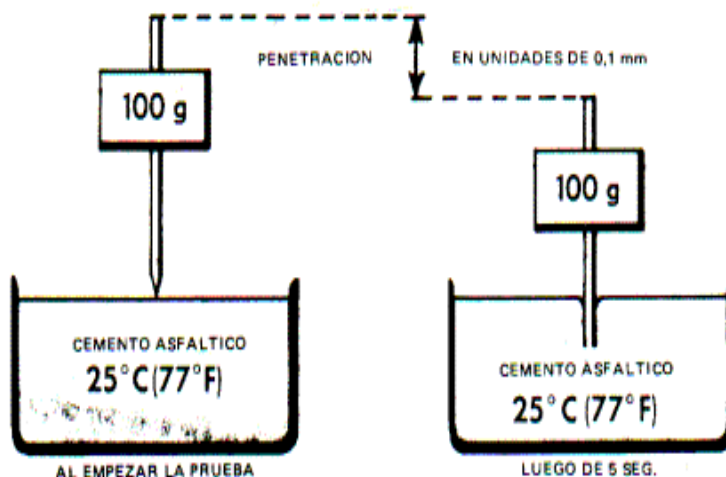
Fuente: Principios generales de la mecánica de suelos aplicados a la pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles.

#### 2.4.2.3. Penetración (ASTM D5-06)

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25 °C. Este es un ensayo aplicable tanto a cementos asfálticos sólidos como a residuos de destilación de asfaltos líquidos, en donde se determina la consistencia del producto bituminoso. Los asfaltos presentan a temperaturas moderadas, viscosidades muy altas que no pueden cuantificarse con equipos convencionales, para esta prueba utilizamos el

penetrómetro esta prueba busca determinar la dureza del asfalto a diferentes temperaturas.

**Figura N°12 Ensayo de penetración**



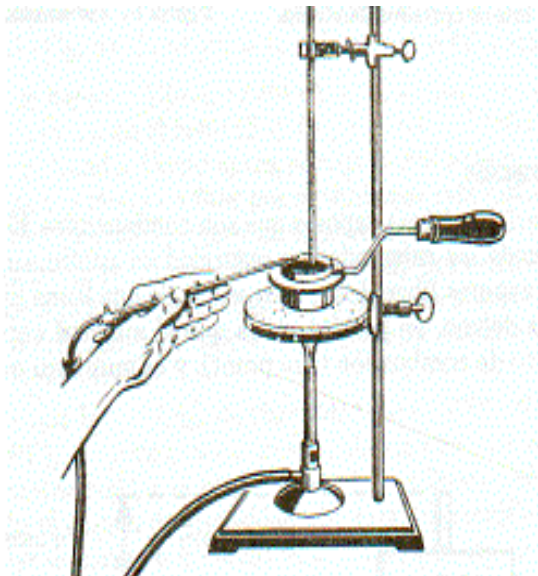
Fuente: Principios generales de la mecánica de suelos aplicados a la pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles.

#### **2.4.2.4.-Punto de Inflamación (ASTM D92-05)**

El punto de flama y de llama de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un destello en presencia de una llama abierta. El punto de flama y de llama no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se está separando del asfalto.

El punto de flama y de llama de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficientemente baja para que el material pueda ser bombeado.

Figura N°13 Punto de inflamación



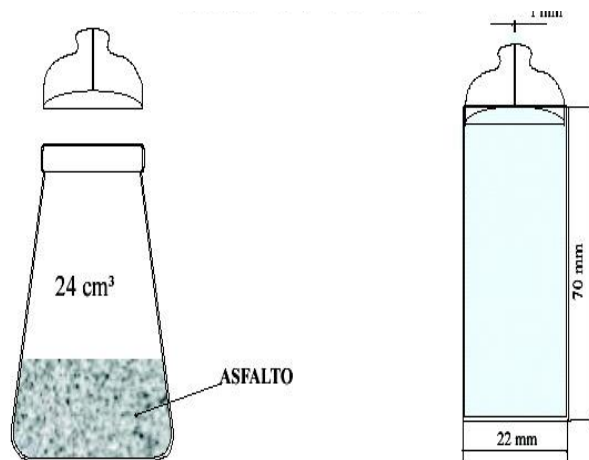
Fuente: Principios generales de la mecánica de suelos aplicados a la pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles.

#### **2.4.2.5.- Peso Específico (ASTM D 70-86)**

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado.

El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

Figura N°14 Esquema peso específico



Fuente: Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento”

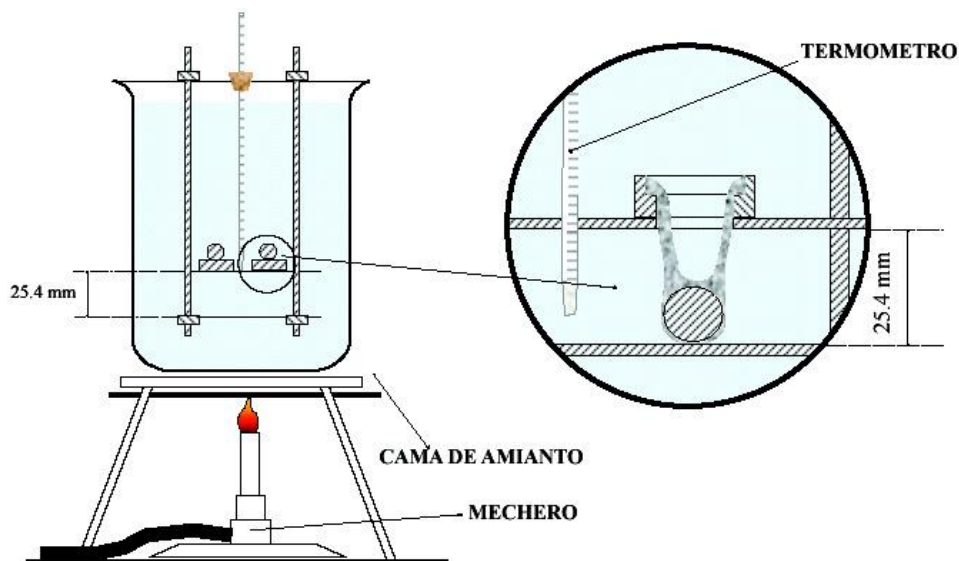
#### **2.4.2.6.-Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36)**

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos. Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, de manera de comparar resultados.

Es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

Figura N° 15 Equipo de punto de ablandamiento



Fuente: Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento

### 2.4.3.-Mezclas asfálticas

#### 2.4.3.1.-Diseño Marshall

El objetivo de un diseño de mezcla asfáltica en caliente es desarrollar una mezcla económica de agregados y asfalto que cumpla con las necesidades especificadas para cada pavimento. En general, en cualquier diseño de mezcla en caliente, lo primero es determinar las características de los agregados disponibles para el proyecto, luego, se debe elegir una granulometría que sea factible de producir y que satisfaga los requisitos. Después, debe determinarse los porcentajes de cada material y ensayar probetas usando diferentes proporciones de asfalto. Luego se analizan para determinar el contenido óptimo de asfalto sin descuidar las demás exigencias.

Históricamente las mezclas asfálticas se han diseñado usando el método Marshall o Hveem. El método más común ha sido el Marshall. En 1995 el procedimiento de diseño de mezclas Superpave comenzó a usarse. Las principales ensayos y análisis son: cálculo de la densidad; estabilidad y fluencia y análisis de huecos.

Para el cálculo de la estabilidad y fluencia las probetas son ensayadas a 60° mediante la máquina de ensayo Marshall, aplicándose una carga a velocidad de deformación definida hasta que se produzca la falla. La carga (en N) obtenida se denomina la estabilidad Marshall de la probeta. La deformación asociada a esta carga se define como la fluidez de la probeta y se expresa en unidades de 0.25 mm.

Los resultados de los ensayos se representan en gráficos de:

- Estabilidad v/s % de asfalto
- Fluencia v/s % de asfalto
- Densidad v/s % de asfalto
- Huecos en la mezcla v/s % de asfalto
- VAM v/s % de asfalto

El contenido de asfalto óptimo de la mezcla se determina promediando los porcentajes de asfalto que indique la estabilidad máxima, densidad máxima y valor medio de las especificaciones de huecos en la mezcla. Una vez encontrado el óptimo debe comprobarse que se encuentre dentro de los rangos aceptables para los demás parámetros estudiados.

Los elementos que se ocuparan para este ensayo son: pailas para calentar el agregado, bolos para la mezcla de asfalto y agregado, horno, termómetro, balanza, mezclador mecánico, pedestal de compactación, moldes de compactación, martillo de compactación, máquina de ensayo Marshall, baño de agua, sujetador de molde, extractor de probeta.

#### **2.4.3.2.- Preparación de las Muestras de Ensayo**

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- ✓ El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½” de espesor por 4” de diámetro (64 x 102 mm).

- ✓ Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.
- ✓ Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Adicionalmente se deben incluir 6 briquetas para determinar los efectos del agua en la estabilidad y el flujo. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb).
- ✓ El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- ✓ Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de mezcla al golpearla.
- ✓ Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos.
- ✓ Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

#### 2.4.3.3.-Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada ( $G_{mb}$ )

Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05. Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una textura superficialmente densa e impermeable, su peso específico ( $G_{mb}$ ) se determina de manera sencilla mediante la expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

$W_a$  = Peso de la probeta en el aire.

$W_{ss}$  = Peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente húmeda.

$W_w$  = Peso de la probeta en el agua.

#### 2.4.3.4.-Gravedad específica máxima ( $G_{mm}$ ).

Para esta prueba no se contaba con el equipo necesario para realizarlo según la Norma ASTM D2047, por lo que se recurrió a una fórmula de aproximación:

$$G_{mm} = \frac{W_a}{W_a - W_w}$$

$W_a$  = Peso de la probeta en el aire.

$W_w$  = Peso de la probeta en el agua.

#### 2.4.3.5.-Vacíos del agregado mineral

Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de la mezcla asfáltica compactada que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo expresado en un porcentaje de volumen total de la muestra

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_a}{G_{sb}}$$

$G_{mb}$  = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta total del agregado.

$P_a$  = contenido de agregado porcentaje total de la masa en la mezcla asfáltica.

#### **2.4.3.6.-Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo y estabilidad Plástico Utilizando el Aparato Marshall**

Basado en norma AASHTO: T 245-97(2004), El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Sumergir el espécimen en un baño María a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocará la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newton (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 “) será el valor del flujo Marshall.

#### **2.4.3.7-Desgaste de briquetas máquina de los Ángeles**

El desgaste de las briquetas se realizara para cada una de las temperatura especificada y para cada grupo seco y húmedo, en el proceso de desgaste no se incluye carga de abrasión es decir las esferas no son incluidas en el ensayo.

El número de revoluciones es de 300 revoluciones.

Se obtendrá los siguientes resultados:

-Resistencia al desgaste.

-Índice de conservación de resistencia.

**2.4.3.8.-Ensayo de penetración al asfalto obtenido de las láminas de asfalto**

Se realiza en ensayo de penetración según norma establecida a las láminas de asfalto para cada una de las temperaturas y tiempos especificados según la metodología.

## CAPÍTULO III

### APLICACIÓN PRÁCTICA

#### 3.1.-Caracterización de los agregados

##### 3.1.1.-Granulometría (ASTM C-71).

###### 3.1.1.1.-Objetivo.-

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar los gránulos según su tamaño, esta separación se realiza mediante una colección de tamices de malla cuadrada.

###### 3.1.1.2.-Equipo

- Balanza A  $\pm 0.01$  gr.
- Tamices de malla cuadrada (1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°30, N°50, N°100, N°200.)

Tabla N°14 Serie de tamices

| Tamaños nominales de abertura |            |
|-------------------------------|------------|
| (mm)                          | ASTM       |
| 75                            | ( 3" )     |
| 63                            | ( 2 ½" )   |
| 50                            | ( 2" )     |
| 37,5                          | ( 1 ½" )   |
| 25                            | ( 1" )     |
| 19                            | ( ¾" )     |
| 9,5                           | ( ⅜" )     |
| 4,75                          | ( N° 4 )   |
| 2                             | ( N° 10 )  |
| 0,425                         | ( N° 40 )  |
| 0,075                         | ( N° 200 ) |

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

- Bandejas metálicas.
- Cepillo de acero.

- Brocha.
- Agregado fino
- Agregado grueso

### 3.1.1.3.-Procedimiento.

- Realizar un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo, colocar la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.
- El tamaño de la muestra escogida se determina mediante el tamaño máximo absoluto de la muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

Tabla N°15 Cantidad mínima requerida para el agregado grueso

| Tamaño Máximo Absoluto (mm) | Cantidad mínima de Muestra a extraer en Terreno (Kg.) | Cantidad mínima de Muestra para el ensaye (Kg.) |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 5                           | 2                                                     | 0,5                                             |
| 10                          | 8                                                     | 2                                               |
| 20                          | 20                                                    | 5                                               |
| 25                          | 40                                                    | 10                                              |
| 50                          | 60                                                    | 15                                              |
| 80                          | 80                                                    | 20                                              |
| 100                         | 120                                                   | 30                                              |
| 150                         | 160                                                   | 40                                              |

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Tabla N°16 Cantidad mínima requerida para el agregado fino

| Tamiz   | % Retenido | Masa mínima de la muestra (g) |
|---------|------------|-------------------------------|
| 4,75 mm | ≤ 5 %      | 500                           |
| 2,36mm  | ≤ 5 %      | 100                           |

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

- Colocar la muestra sobre la torre de cedazos conformado por los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°16, N°40, N°50, N°80, N°200 y la base,

posteriormente con movimientos circulares se facilita que las partículas puedan retenerse o pasar en cada uno de los tamices.

- Quitar la tapa y separar los tamices, vaciando las fracciones de muestra que quedaron retenidos en cada uno de ellos para ello utilizar un cepillo de acero, incluyendo en la base.

Figura N°16 a) Juego de tamices b) Análisis granulométrico



Fuente: Elaboración Propia

- Pesar cada fracción de árido retenido en cada tamiz y registrar.

Figura N°17 Porcentajes de material retenidos en cada tamiz



Fuente: Elaboración Propia

#### 3.1.1.4.-.-Cálculo

- Calcular la masa retenida acumulada en cada tamiz.

- Calcular el porcentaje retenido en cada tamiz , estos pesos acumulados dividiendo para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100
- Calcular el porcentaje que pasa cada tamiz haciendo la diferencia de 100 entre el % retenido de cada tamiz
- Graficar la curva granulométrica en un sistema de coordenadas ortogonales cuya abscisa en escala logarítmica indique las aberturas nominales de los tamices y en las ordenadas a escala lineal los valores.

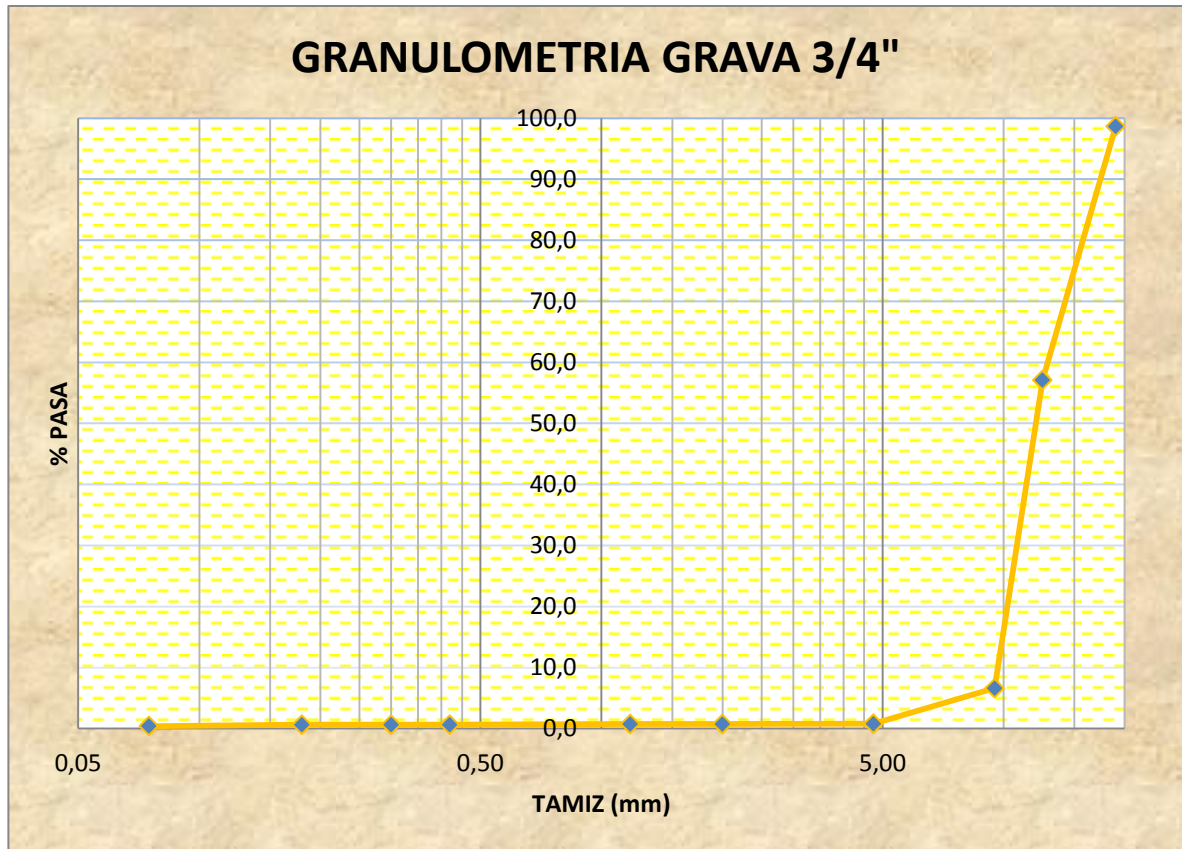
Extracción de agregado: San José de Charaja (Planta de asfalto SEDECA)

Tabla N°17 Granulometría tamaño máximo nominal  $\frac{3}{4}$ "

| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL 3/4 |               |                         |                   | Mt=                 | 5000,0 gr |
|---------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| TAMIZ                     | RETENIDO (gr) | RETENIDO ACUMULADO (gr) | %RETENIDO PARCIAL | %RETENIDO ACUMULADO | %PASA     |
| 3/4                       | 68,3          | 68,3                    | 1,4               | 1,4                 | 98,6      |
| 1/2                       | 2077,1        | 2145,4                  | 41,5              | 42,9                | 57,1      |
| 3/8                       | 2524,6        | 4670,0                  | 50,5              | 93,4                | 6,6       |
| N°4                       | 290,2         | 4960,2                  | 5,8               | 99,2                | 0,8       |
| N°10                      | 3,1           | 4963,3                  | 0,1               | 99,3                | 0,7       |
| N°16                      | 0,0           | 4963,3                  | 0,0               | 99,3                | 0,7       |
| N°40                      | 5,5           | 4968,8                  | 0,1               | 99,4                | 0,6       |
| N°50                      | 0,0           | 4968,8                  | 0,0               | 99,4                | 0,6       |
| N°80                      | 0,0           | 4968,8                  | 0,0               | 99,4                | 0,6       |
| N°200                     | 11,2          | 4980,0                  | 0,2               | 99,6                | 0,4       |
| PAS 200                   | 20,0          | 5000,0                  | 0,4               | 100,0               | 0,0       |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°1 Curva granulométrica grava tamaño máximo nominal  $\frac{3}{4}$ "



Fuente: Elaboración Propia

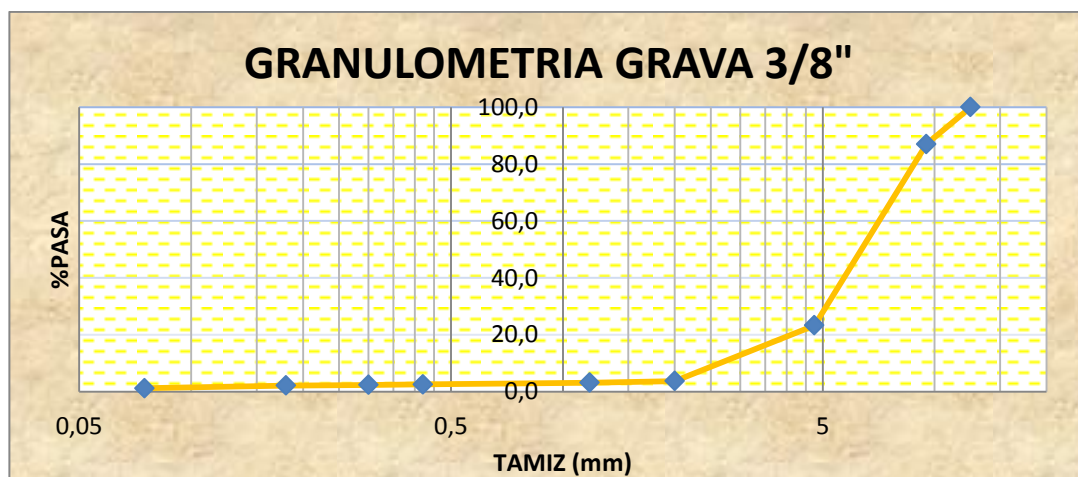
La curva granulométrica de la grava  $\frac{3}{4}$ " representa los porcentajes de material que pasa en cada tamiz utilizado en la granulometría, según la gráfica se observa que la mayor cantidad de material queda retenido entre los tamices de  $\frac{3}{8}$ " y de  $\frac{1}{2}$ ".

Tabla N°18 Granulometría tamaño máximo nominal 3/8"

| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL 3/8 |               |                         |                   | Mt=                 | 5000,0 gr |
|---------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| TAMIZ                     | RETENIDO (gr) | RETENIDO ACUMULADO (gr) | %RETENIDO PARCIAL | %RETENIDO ACUMULADO | %PASA     |
| 1/2                       | 0,0           | 0,0                     | 0,0               | 0,0                 | 100,0     |
| 3/8                       | 648,6         | 648,6                   | 13,0              | 13,0                | 87,0      |
| N°4                       | 3186,0        | 3834,6                  | 63,7              | 76,7                | 23,3      |
| N°10                      | 980,1         | 4814,7                  | 19,6              | 96,3                | 3,7       |
| N°16                      | 28,3          | 4843,0                  | 0,6               | 96,9                | 3,1       |
| N°40                      | 31,8          | 4874,8                  | 0,6               | 97,5                | 2,5       |
| N°50                      | 7,9           | 4882,7                  | 0,2               | 97,7                | 2,3       |
| N°80                      | 11,2          | 4893,9                  | 0,2               | 97,9                | 2,1       |
| N°200                     | 47,1          | 4941,0                  | 0,9               | 98,8                | 1,2       |
| PASA 200                  | 59,0          | 5000,0                  | 1,2               | 100,0               | 0,0       |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°2 Curva granulométrica grava tamaño máximo nominal 3/8"



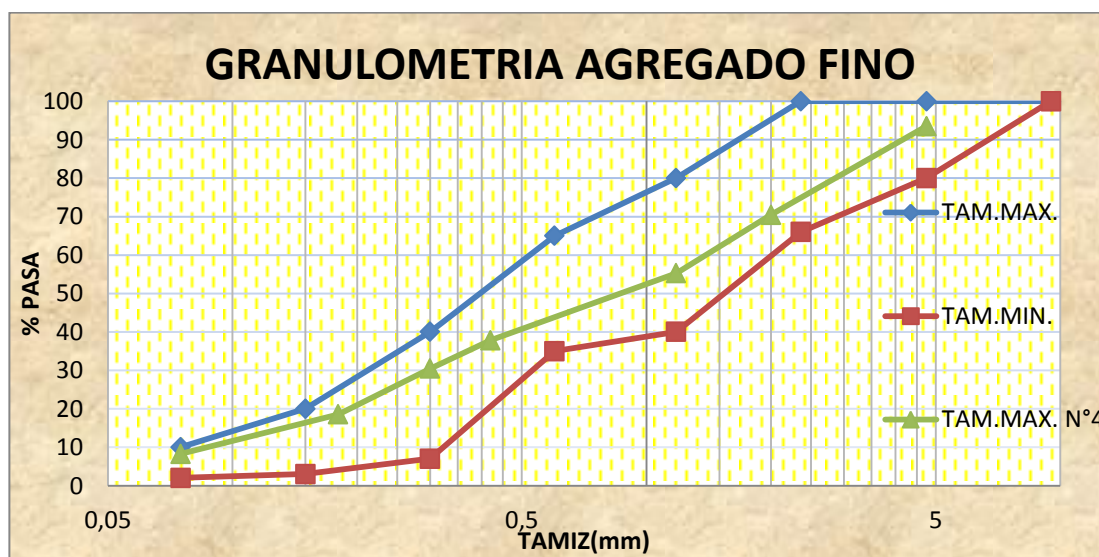
Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 19 Granulometría agregado fino

| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL N°4 |               |                         |                   | Mt=                 | 2000,0 |
|---------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------------|--------|
| TAMIZ                     | RETENIDO (gr) | RETENIDO ACUMULADO (gr) | %RETENIDO PARCIAL | %RETENIDO ACUMULADO | %PASA  |
| N°4                       | 129,8         | 129,8                   | 6,5               | 6,5                 | 93,5   |
| N°10                      | 461,4         | 591,2                   | 23,1              | 29,6                | 70,4   |
| N°16                      | 303,9         | 895,1                   | 15,2              | 44,8                | 55,2   |
| N°40                      | 348,4         | 1243,5                  | 17,4              | 62,2                | 37,8   |
| N°50                      | 147,6         | 1391,1                  | 7,4               | 69,6                | 30,4   |
| N°80                      | 238,0         | 1629,1                  | 11,9              | 81,5                | 18,5   |
| N°200                     | 205,6         | 1834,7                  | 10,3              | 91,7                | 8,3    |
| PASA 200                  | 165,3         | 2000,0                  | 8,3               | 100,0               | 0,0    |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°3 Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2.-Peso específico y absorción agregados

La gravedad específica del agregado es necesaria para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, la *gravedad específica* de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C (73.4°F). La ecuación usada es:

$$Gravedad\ especifico = \frac{peso}{volumen * peso\ especifico\ del\ agua}$$

En el SI, el peso específico del agua es 1.0gr/cm<sup>3</sup>, convirtiendo la ecuación de la gravedad específica en:

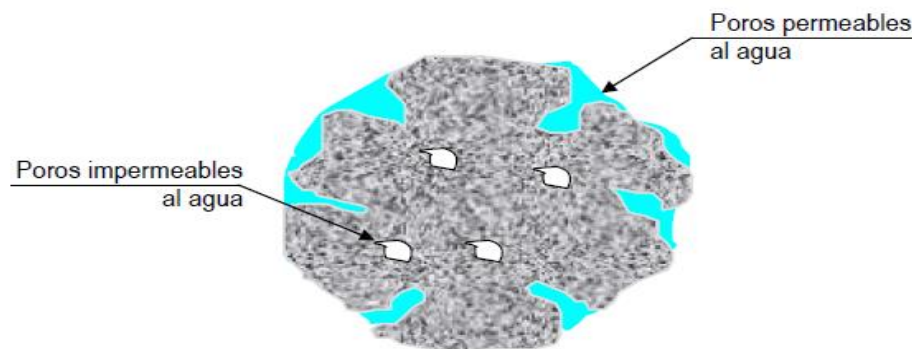
$$Gravedad\ especifico = \frac{peso}{volumen}$$

Existen tres diferentes gravedades específicas relacionadas al diseño de mezclas asfálticas en caliente que definen el volumen de las partículas de agregados:

- Gravedad Específica Seca Aparente
- Gravedad Específica Seca Bulk (Base Seca) y Saturada Superficialmente Seca Bulk
- Gravedad Específica Efectiva

Para los conceptos listados se utilizara el esquema peso-volumen de la partícula de agregado:

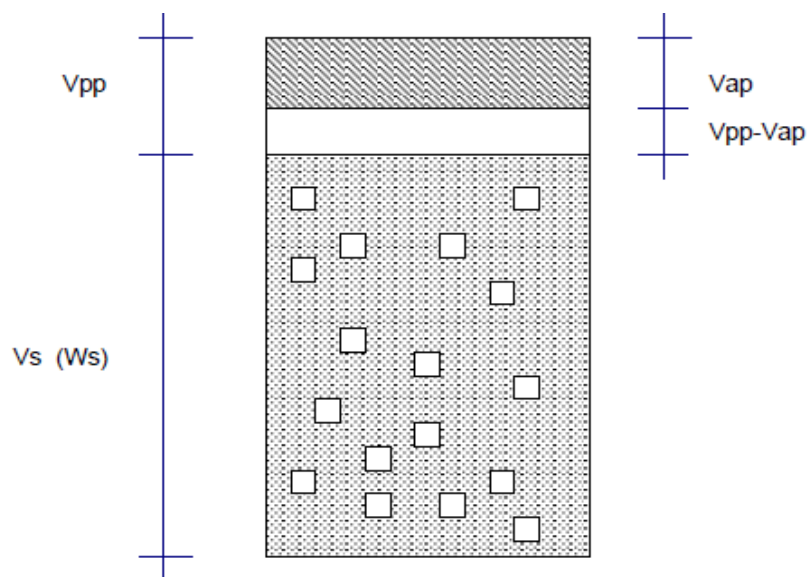
Figura N°18 Esquema de peso y volumen de la partícula de agregado



Fuente: Diseño Moderno de pavimentos asfálticos

Esquemáticamente las relaciones peso-volumen se muestran a continuación:

Figura N°19 Esquema de Relaciones entre las Diferentes Gravedades Específicas de una partícula de agregado



Fuente: Diseño Moderno de pavimentos asfálticos

Dónde:

$V_s$ : Volumen del agregado seco incluyendo los vacíos impermeables

$V_{pp}$ : Volumen de poros permeables al agua

$V_{ap}$ : Volumen de poros que absorbieron asfalto

$V_{pp-Vap}$ : Volumen de poros permeables al agua menos los poros que absorbieron asfalto

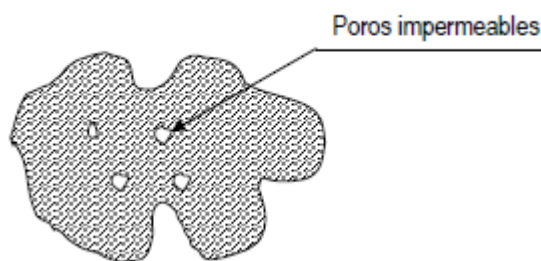
$W_s$ : Peso de agregado secado al horno

**Nota:**

El agregado contiene poros impermeables que no se detallarán en las ecuaciones pero que es implícito se están considerando.

### Gravedad Específica Seca Aparente

Figura N°20 Poros impermeables en el agregado



Fuente: Diseño Moderno de pavimentos asfálticos

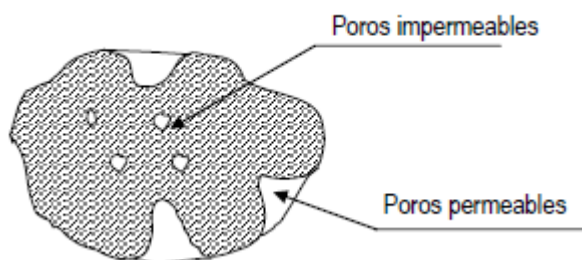
$$\text{Gravedad específica seca aparente} = G_{sa} = \frac{\text{peso del agregado seco}}{\text{volumen del agregado}}$$

$$\text{Gravedad específica seca aparente} = G_{sa} = \frac{W_s}{V_s}$$

La gravedad específica seca aparente incluye solamente el volumen de las partículas de agregado más los poros impermeables.

### -Gravedad Específica Seca Bulk (Base Seca)

Figura N°21 Figura N° Poros impermeables y permeables en el agregado



Fuente: Diseño Moderno de pavimentos asfálticos

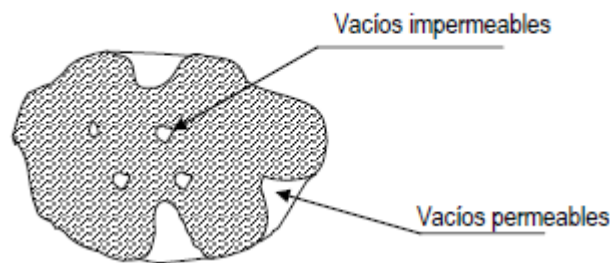
$$\text{Gravedad esp. seca Bulk} = \frac{\text{peso del agregado seco}}{\text{vol. del agregado mas los poros permeab}}$$

$$\text{Gravedad específica seca Bulk} = G_{sb} = \frac{W_s}{V_s + V_{pp}}$$

Se incluirán el volumen total de las partículas de agregados más el volumen de poros llenos con agua luego de 24 horas de inmersión.

#### -Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk

Figura N°22 Vacíos impermeables y permeables en el agregado



Fuente: Diseño Moderno de pavimentos asfálticos

$$\text{Grav. Esp. Sat. Sup. Seca Bulk} = \frac{\text{peso agregado sat. sup. seco}}{\text{Vol. del agregado mas los poros perm.}}$$

$$\text{Grav. Esp. Sat. Sup. Seca Bulk} = G_{sss}b = \frac{W_{sss}}{(V_s + V_{pp})}$$

Dónde:

WSSS =Peso del Suelo Saturado Superficialmente Seco

La gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk define la relación entre el peso del agregado en su condición saturada superficialmente seca, que se obtiene secando las partículas con un paño luego de la inmersión, y el volumen del agregado más los vacíos permeables.

La gravedad específica Saturada Superficialmente Seca Bulk es usada por la U.S. Corps of Engineers para el diseño y control de Mezclas Asfálticas en Caliente cuando se usan agregados con porcentajes de absorción mayores que 2.5%.

La gravedad específica Seca Bulk y Seca Aparente de agregados gruesos y finos se pueden determinar con las normas ASTM C-127 y C-128, respectivamente.

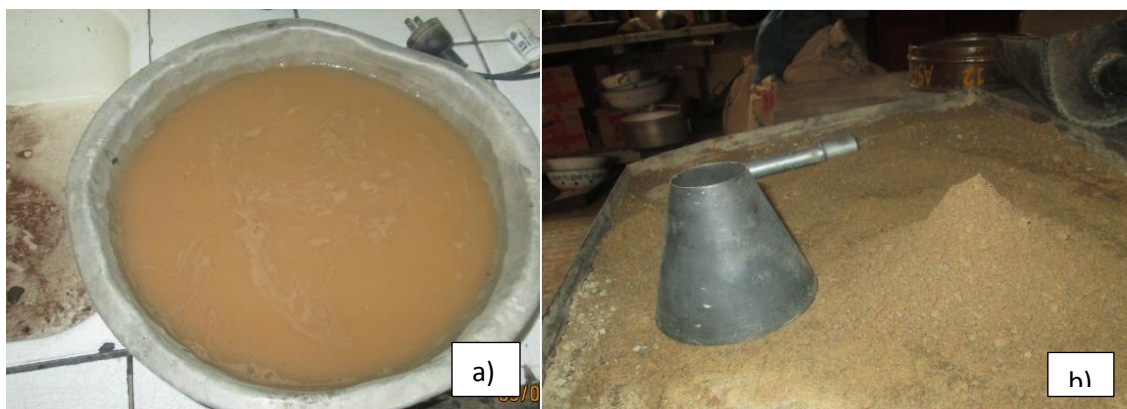
#### **4.1.2.1.- Gravedad específica en agregados finos (ASTM C-128)**

El método es el siguiente:

##### **3.1.2.1.1.-Procedimiento.-**

1. Seleccionar 1000 gr. de agregado fino secar a peso constante.
2. Sumergir el material por 24 horas en agua.
3. La muestra se extiende en una superficie plana y se expone a una corriente de aire caliente.
4. La condición saturada superficialmente seca alcanza cuando el material cae al invertirse el cono, en el que la muestra del material fue suavemente compactada.

Figura N° 23 a) Saturación del agregado b) Verificación de la humedad



Fuente: Elaboración Propia

5. Aproximadamente 500 gr. del material en la condición saturada superficialmente seca colocar en un matraz llenar de agua, eliminar los aires atrapados.
6. Sacar el agregado del matraz y secar en el horno

Figura N°24 a) Matraz con muestra y agua b) Muestra antes de entrar en el horno



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2.1.2.-Calculos

Gravedad específica saturada Superficialmente Seca Bulk:

$$G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$$

Gravedad específica seca Bulk:

$$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$$

Gravedad específica seca aparente:

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$$

Absorción (%):

$$Absorción(\%) = \left( \frac{D - A}{A} \right) * 100$$

A= peso en el aire del agregado seco al horno, gr.,

B =peso del matraz (picnómetro) con agua, gr.

C= peso del matraz (picnómetro) con el agregado y agua hasta la marca, gr.

D =Peso del material saturado superficialmente seco (500+10 gr)

Tabla N°20 Datos y resultados de la gravedad específica y absorción

| Numero de ensayo                                        |               | 1       | 2       | PROMEDIO |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------|---------|----------|
| Peso del matraz(gr)                                     |               | 119,300 | 117,300 | 118,300  |
| Peso matraz +muestra(gr)                                |               | 369,300 | 367,300 | 368,300  |
| Peso de muestra superficialmente seca(gr)               | D             | 250,000 | 250,000 | 250,000  |
| Peso de muestra seca al horno(gr)                       | A             | 244,100 | 243,000 | 243,550  |
| Peso del agua(gr)                                       | B             | 241,000 | 241,100 | 241,050  |
| Peso de muestra más agua(gr)                            | C             | 397,200 | 395,000 | 396,100  |
| Gravedad especifica seco bulk(Gsb)(gr/cm <sup>3</sup> ) | $A/(B+D-C)$   | 2,602   | 2,529   | 2,565    |
| Grav. Esp.Sat.Sup. Seco (Gsss)(gr/cm <sup>3</sup> )     | $D/(B+D-C)$   | 2,665   | 2,601   | 2,633    |
| Gravedad Esp. aparente (Gsa)(gr/cm <sup>3</sup> )       | $A/(B+A-C)$   | 2,777   | 2,727   | 2,752    |
| % de Absorción                                          | $(D-A)/A*100$ | 2,417   | 2,881   | 2,649    |

Fuente: Elaboración Propia

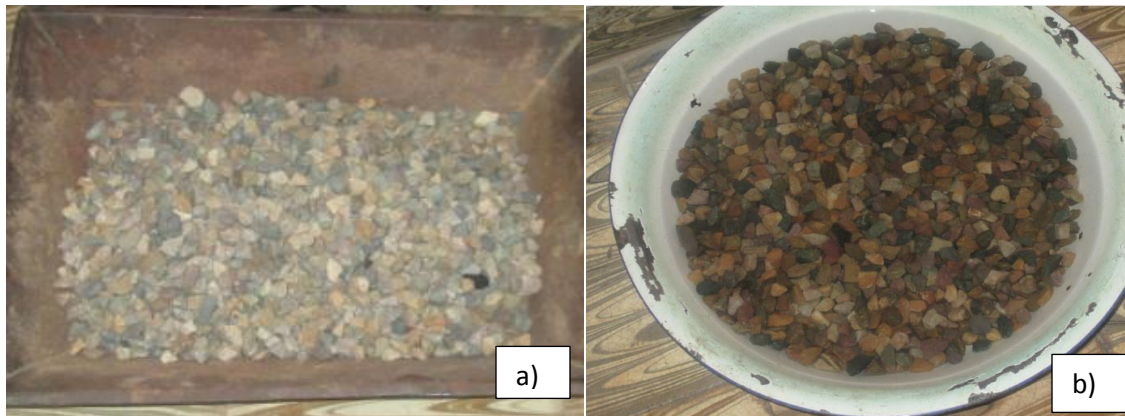
### 3.1.2.2.-Gravedad específica en agregados gruesos, ASTM-C-127

La muestra a ser evaluada se satura y pesa en su condición saturada superficialmente seca. El procedimiento es el siguiente:

1. Lavar y secar aproximadamente 5 kg de material retenidos en la malla N°4 (4.75 mm) hasta que alcance peso constante.

2. Sumergir la muestra seca por 24 horas en agua.

Figura N°25 a) Muestra seleccionada b) Saturación de la muestra



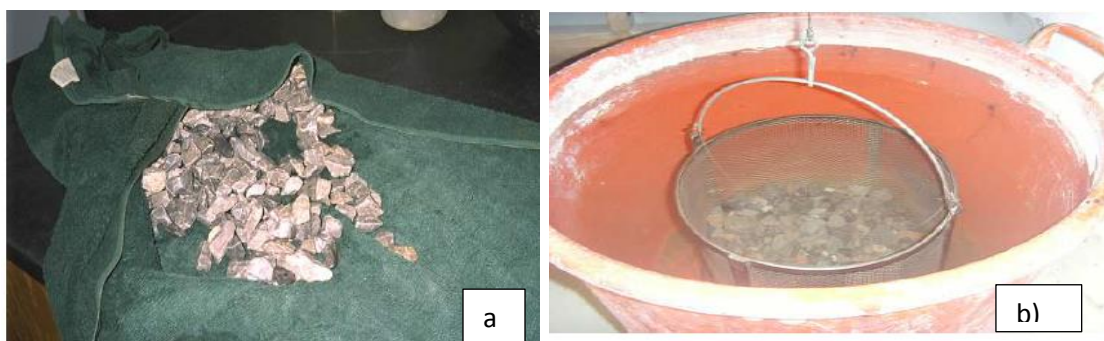
Fuente: Elaboración Propia

3. Sacar los agregados del agua y secar superficialmente con ayuda de una toalla.

4. Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.

5. Colocar la muestra saturada superficialmente seca en una cesta de alambre y determinar el peso de la muestra sumergido en agua.

Figura N°26 a) Muestra superficialmente b) Peso sumergido



Fuente: Elaboración Propia

6. Secar la muestra en el horno hasta obtener peso constante.

--Cálculos:

A= peso en el aire del agregado seco al horno, gr.,

B= peso en el aire del agregado saturado superficialmente seco, gr.

C =peso del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua, gr.

Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk:

$$G_{sssb} = \frac{B}{B - C}$$

Gravedad específica seca Bulk:

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$$

Gravedad específica seca aparente:

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$$

Absorción (%):

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

Tabla N°21 Valores de gravedad específica y absorción del agregado grueso

|                                                      |                    |          |                    |
|------------------------------------------------------|--------------------|----------|--------------------|
| <b>Peso de la muestra seca en el horno</b>           | <b>A</b>           | 4950,300 | gr                 |
| <b>Peso de la muestra sat. superficialmente seco</b> | <b>B</b>           | 5010,300 | gr                 |
| <b>Peso de la muestra sumergida en el agua</b>       | <b>C</b>           | 3137,500 | gr                 |
| <b>Peso específico aparente(Gsa)</b>                 | <b>A/(A-C)</b>     | 2,731    | gr/cm <sup>3</sup> |
| <b>Peso específico a granel(Gsb)</b>                 | <b>A/(B-C)</b>     | 2,643    | gr/cm <sup>3</sup> |
| <b>Peso esp. saturado con superficie seca(Gsss)</b>  | <b>B/(B-C)</b>     | 2,675    | gr/cm <sup>3</sup> |
| <b>Porcentaje de absorción (%)</b>                   | <b>(B-A)/A*100</b> | 1,212    | %                  |

Fuente: Elaboración Propia

### **3.1.3.-Equivalente de arena (ASTM D 2419)**

#### **3.1.3.1.- Fundamento**

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

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

#### **3.1.3.2.-Equipos de laboratorio**

- Cilindro graduado de plástico, con diámetro interior de  $31.75 \pm 0.381$  mm ( $1\frac{1}{4} \pm 0.015$ ") y altura de 431.8 mm (17") aproximadamente, graduado en espacios de 2.54mm (0.1"), desde el fondo hasta una altura de 381 mm (15").
- Tapón macizo de caucho.
- Tuvo irrigador.
- Tubo flexible de plástico con 4.7 mm de diámetro.
- Un botellón de 3.785 litros.
- Dispositivo para tomar lecturas.
- Recipiente metálico.
- Embudo de boca ancha.
- Cronómetro.
- Tamiz N° 4.
- Solución (Cloruro de Calcio).

### **3.1.3.3.- Procedimiento de ensayo**

#### **1.-. Preparación de la muestra**

- a. Separar aproximadamente 1500 gr de material que pase el tamiz N° 4 (4.75 mm)
- b. Verificar las condiciones de humedad del material apretando con la mano una porción de material, formar una masilla que permite abrir la mano sin romperse, la mezcla tiene el rango correcto de humedad.

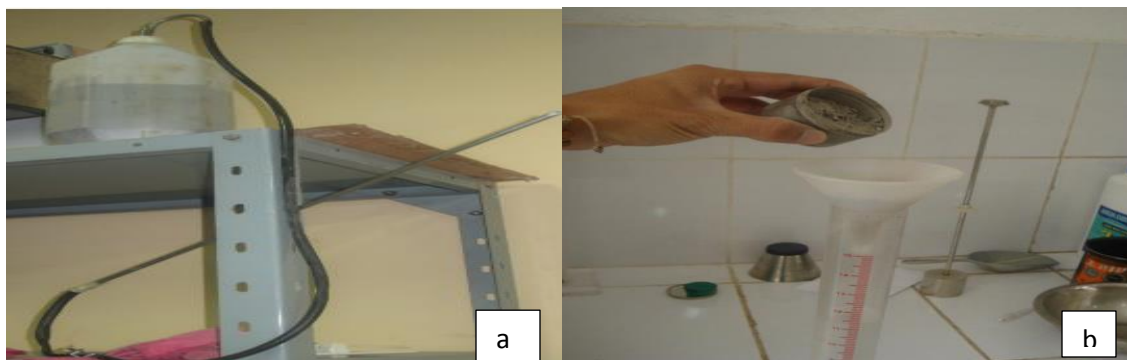
Si existe demasiada humedad deberá secarse al aire, mezclándola frecuentemente para asegurar uniformidad y ensayándola nuevamente.

2. La humedad inicial debe estar dentro de los límites descritos, así la muestra puede ensayar inmediatamente.
3. Después de transcurrido el tiempo mínimo, remezclar por 1 min. Sin agua, formando un cono con el material, utilizando una paleta.
4. Tomar el recipiente metálico en una mano y presionar contra la base del cono mientras se sostiene a éste con la mano libre.
5. A medida que el recipiente atraviesa el cono mantener suficiente presión en la mano para que el material lo llene por completo. Presionar firmemente con la palma de la mano compactando el material hasta que éste se consolide, el exceso debe ser retirado y desechado, enrasar con la paleta a nivel del borde del recipiente.

#### **6. Procedimiento**

- 6.1. Mediante el sifón verter  $102 \pm 3$  mm de solución de trabajo de cloruro de calcio, en la probeta.
- 6.2. Verter en la probeta,  $85 \pm 5$  cm<sup>3</sup> del suelo preparado mediante el embudo.
- 6.3. Golpear la parte baja del cilindro varias veces con la palma de la mano para desalojar las posibles burbujas de aire y para humedecer completamente la muestra. Dejar reposar durante  $10 \pm 1$  min.

Figura N° 27 a) Equipo de irrigación b) Material introducido a la probeta



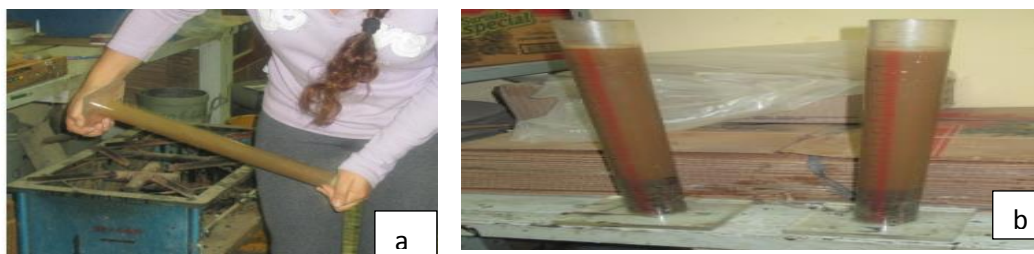
Fuente: Elaboración Propia

6.4. Transcurridos los 10 min., tapar la probeta con un tapón; soltar el material del fondo invirtiendo parcialmente el cilindro y agitar a la vez. El material puede ser agitado de la siguiente manera:

*Método manual*

- Sujetar la probeta en posición horizontal y sacudirla vigorosamente de izquierda a derecha.
- Agitar el cilindro 90 ciclos en 30 segundos, usando un recorrido de  $23 \pm 3$  cm. Un ciclo se define como el movimiento completo a la derecha seguido por otro a la izquierda. El operador deberá mover solamente los antebrazos manteniendo el cuerpo y hombros relajados.

Figura N°28 a) Agitar de 90 ciclos b) Probetas después de la agitación



Fuente: Elaboración Propia

- Introducir el tubo irrigador en la parte superior de la probeta, soltar la abrazadera de la manguera y limpiar el material de las paredes de la probeta mientras el irrigador baja.

#### 7. Lectura de arcilla.

- Dejar reposar durante 20 min.  $\pm$  15 s. Comenzar a medir el tiempo luego de retirar el tubo irrigador.
- Al término de los 20 min., leer el nivel superior de la suspensión de arcilla.

#### 8. Lectura de arena.

Después de la lectura de arcilla, introducir en la probeta el ensamblaje del pie (conjunto del disco, varilla y sobrepeso) y bajar lentamente hasta llegar sobre la arena.

- Cuando el conjunto toque la arena con uno de los tornillos de ensamblaje hacia la línea de graduación de la probeta, leer y anotar lectura de arena.

#### 3.1.3.4.- Cálculo e informe

1. Calcule el equivalente de arena con aproximación a 0.1% como sigue:

$$SE = \frac{Lectura\ arena}{Lectura\ arcilla} * 100$$

Dónde:

SE=Equivalente de arena expresado en porcentaje

Tabla N°22 Datos y resultados de equivalente de arena

| Numero de ensayo               |             | 1    | 2    | Promedio |
|--------------------------------|-------------|------|------|----------|
| Lectura inicial de arcilla(gr) | A           | 11,9 | 12,2 | 12,05    |
| Lectura de arena(gr)           | B           | 6,3  | 6,6  | 6,45     |
| % de Arena=SE                  | $B/A * 100$ | 53   | 55   | 54       |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.4.-Ensayo de Abrasión por Medio de la Máquina de Los Ángeles (ASTM C-131 y ASTM C-535)

#### 3.1.4.1.- Objetivo

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles.

#### 3.1.4.2.- Equipos de laboratorio

- Máquina de desgaste de Los Ángeles.
- Tamices: 3”, 2 ½”, 2”, 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, N°4, N°8. Un tamiz N°12 para el cálculo del desgaste Esferas de acero: de 46.38 a 47.63 mm de diámetro y entre 390 a 445 gr.
- Horno: para mantener una temperatura de 110±5 °C
- Balanza: aproximación de 1 gr.

#### 3.1.4.3.- Material y carga abrasiva a utilizar

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso. En la Tabla N°23, se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que se use

deberá ser representativa de la gradación original del material suministrado para la obra.

Tabla N°23 Métodos para determinar la cantidad de material ASTM C 131

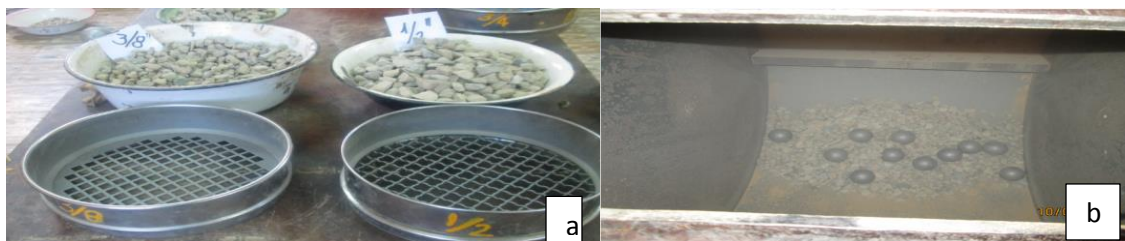
| MÉTODO                   |          | A                                   | B        | C        | D        |
|--------------------------|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| DIÁMETRO                 |          | CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr) |          |          |          |
| Pasa                     | Retenido |                                     |          |          |          |
| 1 ½"                     | 1"       | 1 250±25                            |          |          |          |
| 1"                       | ¾"       | 1 250±25                            |          |          |          |
| ¾"                       | ½"       | 1 250±10                            | 2 500±10 |          |          |
| ½"                       | 3/8"     | 1 250±10                            | 2 500±10 |          |          |
| 3/8"                     | ¼"       |                                     |          | 2 500±10 |          |
| ¼"                       | Nº4      |                                     |          | 2 500±10 |          |
| Nº4                      | Nº8      |                                     |          |          | 5 000±10 |
| PESO TOTAL               |          | 5 000±10                            | 5 000±10 | 5 000±10 | 5 000±10 |
| Nº de esferas            |          | 12                                  | 11       | 8        | 6        |
| Nº de revoluciones       |          | 500                                 | 500      | 500      | 500      |
| Tiempo de rotación, min. |          | 15                                  | 15       | 15       | 15       |

Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos

#### 3.1.4.4.- Procedimiento de ensayo

1. La muestra deberá ser identificada. Para muestras cuyo tamaño máximo sea menor a 1 ½" ó mayor de ¾" el procedimiento es el mismo.
2. Lavar y secar el material en el horno a temperatura constante de 105-110°C, y tamizado según las mallas que se indican. Mezclar las cantidades que el método indique, según la Tabla No. 23.
3. Introducir la muestra de ensayo junto con la carga abrasiva en la máquina de Los Ángeles, cerrar la tapa del cilindro.

Figura N°29 a) Material para el desgaste b) Material con carga abrasión



Fuente: Elaboración propia

4. Activar la máquina, regular el número de revoluciones indicado por el método.

5. Finalizado el tiempo de rotación, retirar las cargas y el material. Tamizar por la malla N°12.

6. El material retenido en el tamiz N°12 lavar y posteriormente secar en el horno, a una temperatura constante entre 105° a 110°C. Pesar la muestra seca.

Figura N°30 a) Material desgastado b) Material lavado y secado en el horno 24hrs



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.4.5.- Cálculos

El porcentaje de desgaste es la relación entre el material que retiene el tamiz No. 12 y el peso inicial.

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

$P_{inicial}$ =Peso total de la muestra (gr)

$P_{Final}$ =Peso retenido tamiz N°12 (gr)

Tabla N° 24 Datos y resultados del desgaste por medio máquina de los Ángeles

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| <b>NUMERO DE ENSAYO</b>              | <b>1</b> |
| <b>Numero de esferas</b>             | 11       |
| <b>Ensayo de graduación</b>          | B        |
| <b>Peso inicial (gr)</b>             | 5000     |
| <b>Peso retenido malla N°12 (gr)</b> | 3883     |
| <b>Diferencia (gr)</b>               | 1117     |
| <b>Porcentaje de desgaste (%)</b>    | 22,34    |

Fuente: Elaboración Propia

**3.1.5.-Porcentaje de caras Fracturadas (ASTM D 5821-95)****3.1.5.1.- Objetivo**

Este método permite determinar el porcentaje en peso, de una muestra de agregado grueso con una, dos o más caras fracturadas.

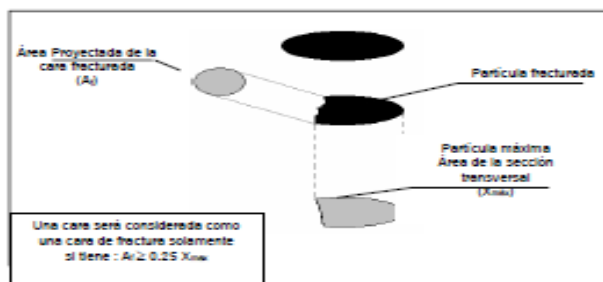
**3.1.5.2.- Definiciones**

*Cara Fracturada* una cara angular, lisa o superficie fracturada de una partícula de agregado formada por trituración, otros medios artificiales o por la naturaleza.

*Discusión para esta norma* una cara será considerada “Cara fracturada” solamente si su área mínima proyectada es tan grande como un cuarto de la máxima área proyectada (máxima área de la sección transversal) de la partícula y la cara tiene aristas bien definidas; esto excluye las pequeñas irregularidades.

*Partícula fracturada* una partícula de agregado es fracturada si tiene el número mínimo de caras fracturadas especificadas (usualmente uno o dos).

Figura N°31 Esquema de una particular fracturada con una fractura



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos

### 3.1.5.3.- Equipos de laboratorio

1. Balanza de 5 Kg. y sensibilidad al gramo
2. Tamices.
3. Partidor de muestras
4. Espátula

### 4.1.5.4.- Preparación de la muestra

1. Secar y cuartear la muestra para obtener una masa representativa.
2. Los pesos mínimos para el ensayo se muestran en la tabla 25.

Tabla N°25 Pesos requeridos según Tamaño Máximo Nominal para el ensayo de porcentaje de caras fracturadas

| Tamaño Máximo Nominal | Peso mínimo para el ensayo (gr) |
|-----------------------|---------------------------------|
| 3/8"                  | 200                             |
| 1/2"                  | 500                             |
| 3/4"                  | 1 500                           |
| 1"                    | 3 000                           |
| 1 1/2"                | 7 500                           |
| 2"                    | 15 000                          |
| 2 1/2"                | 30 000                          |
| 3"                    | 60 000                          |
| 3 1/2"                | 90 000                          |

Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos

3. Tamizar la muestra por la malla N°4
4. Muestras con tamaño máximo nominal mayor o igual a  $\frac{3}{4}$ ", pueden ser reducidas al ser tamizadas por la malla  $\frac{3}{8}$ ". Ensayar la muestra el material retenido en la malla  $\frac{3}{8}$ " y la fracción que pase puede reducirse de acuerdo con la norma ASTM C-702 hasta 200 gr. En este caso, sobre cada porción se determina el porcentaje de partículas fracturadas; y se calcula el promedio ponderado en función de la masa original.

#### 3.1.5.5.- Procedimiento

- 1.-Extender la muestra en un área suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula. Si es necesario lavar el agregado sucio. Esto facilitará la inspección y detección de las partículas fracturadas.
- 2.-Separar con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas.

Figura N°32 a) Partículas inspección visual b) Muestra utilizada



Fuente: Elaboración Propia

- 3.- Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasifica como "Partícula fracturada". Una partícula se considerará como fracturada cuando un 25% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las producidas por procedimientos mecánicos.

4.-Pesar las partículas fracturadas y anotar el valor.

Figura N°33 a) Selección por caras fracturadas b) Peso de partículas naturales



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.5.6.- Cálculo y resultados

- Anotar el peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo, comprendidas entre los tamaños antes especificados.
- Anotar el peso del material con caras fracturadas para cada tamaño.
- Finalmente calcular el porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño:

$$P(\%) = \frac{B}{A} * 100$$

A= Peso exacto de las muestras tomadas para el ensayo (g).

B= Peso del material con caras fracturadas para cada tamaño (g).

P= Porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño (%).

Tabla N° 26 Datos y resultados de porcentaje de caras fracturadas

|                                     |                | Grava 1/2" | Grava 3/8" |
|-------------------------------------|----------------|------------|------------|
| Peso de la muestra (gr)             | A              | 500        | 200        |
| Peso total de caras fracturadas(gr) | B              | 442        | 193        |
| Porcentaje de caras fracturadas     | $\%=(B/A)*100$ | 88,4       | 96,5       |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.-Caracterizacion del cemento asfaltico

#### 3.2.1.-Penetracion

##### 3.2.1.1.- Introducción

El ensayo de penetración es un método empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico. Por lo general la penetración se mide a 25°C que es el promedio de las temperaturas de servicio del pavimento.

Esta norma considera los cementos asfálticos con penetraciones menores de 350 dmm.

Materiales con penetraciones entre 350 y 500 requieren de aparatos especiales.

##### 3.2.1.2.- Definición

El ensayo de penetración consiste en colocar una muestra de asfalto en un recipiente estándar a una temperatura de 25°C, controlado por un baño de agua. La muestra es penetrada por una aguja de 100 gr. por 5 segundos. La profundidad de penetración se mide en décimas de milímetro (dmm) que son las unidades de penetración. Por ejemplo, si la aguja penetra 8 mm, la penetración del asfalto es 80.

El ensayo de penetración se puede realizar a otras temperaturas como 0, 4 y 46°C. Para estas corridas la carga de la aguja y el tiempo de penetración varía. Por ejemplo, a 4°C el cemento asfáltico es rígido, la penetración con una aguja de 100 gr por 5 s es inferior que si el ensayo se realizase a 25°C. A esta temperatura se emplea una aguja de 200 gr de peso y 60 segundos de penetración.

### 3.2.1.3.- Equipos

- ✓ *Equipo de Penetración:* Equipo que permita que el vástago de la aguja se mueva verticalmente sin fricción y que sea capaz de medir la profundidad de penetración con una aproximación de 0.1 mm. El peso del vástago será  $47.5 \pm 0.05\text{g}$ . El peso total de la aguja con el fijador será de  $50 \pm 0.05\text{g}$ . Deberá contar con pesos adicionales de  $50 \pm 0.05\text{g}$  y  $100 \pm 0.05\text{g}$ , para cargas totales de 100 g y 200 g, como se requieran en las condiciones del ensayo. El apoyo de la muestra, en el equipo de penetración, deberá ser una superficie plana, la aguja deberá formar aproximadamente 90° con esta superficie..
- ✓ *Aguja de Penetración:* La aguja debe ser de acero inoxidable de aproximadamente 50 mm (2 pulg.) de longitud y de 1.00 a 1.02 mm (0.0394 a 0.0402 pulg.) de diámetro. La aguja deberá estar montada rígidamente sobre un zuncho de bronce o de acero inoxidable, la longitud expuesta deberá estar entre los límites de 40 a 45 mm (1.57 y 1.77 pulg.). El peso del ensamblado aguja y zuncho deberá ser de  $2.50 \pm 0.05\text{g}$ .
- ✓ *Contenedor de Muestras:* El contenedor de muestra será de vidrio o metal, de forma cilíndrica y de fondo plano. Sus dimensiones serán de 55 mm de diámetro y 35 mm de altura interna para penetraciones debajo de 200 y 70 mm de diámetro y 45 mm de altura interna para penetraciones entre 200 y 350.
- ✓ *Baño de Agua:* La inmersión de la muestra se deberá contar con un baño de agua de por lo menos 10 l., que permita mantener la temperatura de ensayo. El baño deberá contar con una placa soporte perforada colocada a una distancia

no menor de 50 mm desde el fondo y no más de 100 mm debajo del nivel superior del líquido en el baño.

Si el ensayo se va realizar en el mismo baño de agua, se deberá disponer de una plataforma resistente para soportar el equipo de penetración.

- ✓ *Cápsula de Transferencia:* Deberá tener una capacidad de 350 ml y altura suficiente de agua para cubrir todo el recipiente. Deberá estar provisto con algunos medios para obtener un apoyo firme y prevenir el balanceo del recipiente. Un soporte de tres pies de contacto para el recipiente de la muestra es un medio conveniente para asegurarlo.
- ✓ *Medidor de tiempo:* Para penetrómetros operados manualmente se puede emplear un reloj eléctrico, un cronómetro u otro instrumento con aproximación a 0.1 s. en un intervalo de 60 s. Si el ensayo se realizara con penetrómetros automáticos, el dispositivo deberá estar calibrado para proporcionar el tiempo de ensayo con exactitud de  $\pm 0.1$  s. La precisión de todos los instrumentos de medición deberán ser verificados antes del inicio del ensayo.
- ✓ *Termómetros:* Estos termómetros serán de mercurio con varilla de vidrio y con error máximo de 0.1°C.

#### **3.2.1.4.- Preparación de la muestra**

1. Tomar una muestra de aproximadamente 400 a 500 gr. La muestra deberá ser representativa del total y no deberá estar contaminada.
2. Calentar la muestra hasta que este lo suficientemente fluida para vaciarla, removerla periódicamente de tal manera que no existan sobrecalentamientos. En ningún caso la temperatura de calentamiento será mayor de 100°C por encima del punto de ablandamiento. El tiempo total de calentamiento no exceder los 30 min, evitándose la formación de burbujas.
3. Vaciar el asfalto al contenedor de muestras, que también ha sido calentado a temperatura semejante a la del asfalto. La profundidad será tal que cuando alcance la temperatura de prueba, sea por lo menos 10 mm mayor que la profundidad a la cual

se espera que la aguja penetre. Se prepararán dos moldes para cada material a ser evaluado.

4. Dejar enfriar las muestras a temperatura ambiente. Los contenedores deberán ser cubiertos con vasos de vidrio invertidos para evitar que sean contaminados por polvo.

Se dejarán por un período de 1 a 1.5 horas para contenedores pequeños y de 1.5 a 2 horas para los más grandes. Luego de este tiempo se sumergen los moldes en el baño de agua a la temperatura de ensayo.

### 3.2.1.5 Condiciones de ensayo

Las condiciones de ensayo serán las indicadas en la tabla siguiente

Tabla N°27 Cargas según temperatura y tiempo para el ensayo de penetración

| Temperatura<br>°C (°F) | Carga<br>g | Tiempo<br>s |
|------------------------|------------|-------------|
| 0 (32)                 | 200        | 60          |
| 4 (39.2)               | 200        | 60          |
| 25 (77)                | 100        | 5           |
| 46.1 (115)             | 50         | 5           |

Fuente: Manual de carreteras V4A

Las condiciones de ensayo deberán indicarse; se realiza a 25°C.

### 3.2.1.6.- Ensayo

1. Limpiar la aguja de penetración con algún solvente adecuado. Insertar la aguja al penetrómetro, colocar un peso de 50 g sobre la aguja, a menos que se indique lo contrario, haciendo la carga total movable de  $100 \pm 0.1$  g. Si las pruebas son hechas con el penetrómetro en el baño, colocar el recipiente de muestra directamente sobre el soporte sumergido del penetrómetro. Mantener el recipiente de muestra completamente cubierto con el agua en el baño. Si las pruebas son hechas con el penetrómetro fuera del baño, colocar el contenedor en la cápsula de transferencia,

cubrir el recipiente completamente con agua del baño a temperatura constante y colocar la cápsula de transferencia sobre el soporte del penetrómetro.

Figura N°34 a) Muestras sumergidas b) Control de tiempo para penetración 5s



Fuente: Elaboración Propia

2. Bajar la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra. Anotar la lectura en el dial del penetrómetro o poner en cero el indicador.
3. Permitir que la aguja baje por el período de tiempo especificado. Finalmente se lee y anota la distancia que haya penetrado la aguja en la muestra, esta lectura se expresa en décimas de milímetro.
4. Realizar tres penetraciones en la muestra. Las penetraciones se realizan a distancias no menores de 10 mm entre sí y de la pared del recipiente.

Figura N°35 a) Aguja penetrando en la muestra b) Lectura en el penetrometro



Fuente: Elaboración Propia

5. Usar una aguja limpia para cada determinación.

### 3.2.1.7.- Reporte:

Tabla N°28 Lectura registradas durante el ensayo de penetración

| ENSAYO   | LECTURA | PROMEDIO | UNIDAD(dmm) |
|----------|---------|----------|-------------|
| 1        | 91      | 91       | dmm         |
|          | 92      |          |             |
|          | 89      |          |             |
| 2        | 91      | 93       | dmm         |
|          | 93      |          |             |
|          | 95      |          |             |
| 3        | 91      | 93       | dmm         |
|          | 93      |          |             |
|          | 94      |          |             |
| PROMEDIO |         | 93       | dmm         |

Fuente: Elaboración Propia

### **3.2.2.-Viscosidad (ASTM D2170-95)**

#### **3.4.2.1 Objetivo.**

- Este método de ensayo permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo. Empleando una temperatura de 135°C para los cementos asfálticos, de 25 y 50°C para las emulsiones asfálticas y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados, haciendo a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.
- La prueba consiste en determinar el tiempo que tarda en pasar 60 cm<sup>3</sup> del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de Viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecida.

#### **3.4.2.2 Equipo y materiales**

- Viscosímetro Saybot Furol
- Recipiente
- Aceite
- Matraz 60 cm<sup>3</sup>
- Cronometro
- Termómetro.

#### **3.4.2.3 Procesamiento**

- Colocar 450 g de la muestra de cemento asfáltico en un recipiente, para derretirla se calienta hasta alcanzar una temperatura superior en 15 °C a la prueba, agitándola de vez en cuando, excepto durante los últimos 30°C de calentamiento, cuando el agitado será continuo. El tiempo de calentamiento no será mayor de 2 horas y la muestra solamente se debe.

- Llenar el baño del viscosímetro con el aceite adecuado para la temperatura a la cual se efectuara la prueba o con agua si se trata de un asfalto rebajado.
- Limpiar el tubo del equipo y secar perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia.
- Una vez limpiado el tubo de viscosidad, insertar 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.
- Ajustar el baño del viscosímetro a una temperatura ligeramente inferior a la seleccionada para la prueba, se entibian y secan el tubo de viscosidad y el embudo con la malla N° 20 cuando se trate de cemento asfáltico o N° 100 para asfalto rebajado. A continuación se vierte en 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.
- Ajustar la muestra continuamente con el termómetro, dándole a este un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de burbujas, teniendo cuidado de no golpear el tubo de viscosidad para no presionar el asfalto a través del orificio de la boquilla se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.
- Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 minuto de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de 0,3 °C respecto a la temperatura de prueba, se retira la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.
- Colocar el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronometro , el cual se detiene en el

momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm<sup>3</sup> del matraz y se registra el tiempo

Figura N°36 a) Asfalto que cae a 135°C b) Control de tiempo



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.3.-Calculo.

Tabla N° 29 Viscosidad Saybolt asfalto convencional 85-100

| ENSAYO          | TIEMPO(s) | TEMPERATURA ASFALTO (°C) |
|-----------------|-----------|--------------------------|
| 1               | 117       | 135                      |
| 2               | 115       | 135                      |
| <b>PROMEDIO</b> | 116       | 135                      |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.3.-Peso específico (ASTM: D 70-76)

#### 3.2.3.1.- Alcance

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves por uso de un picnómetro.

#### 3.2.3.2.- Gravedad específica

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

#### 3.2.3.3.- Herramientas

✚ **Picnómetro**, consiste en un vaso cilíndrico o cónico de vidrio cuidadosamente deslustrado para recibir un tapón de vidrio de precisión encaje 22 a 26 mm en diámetro. El tapón debe estar provisto de un agujero 1.0 a 2.0 mm en diámetro, localizado centralmente en referencia al eje vertical. La superficie de la parte superior del tapón será lisa y sustancialmente plana, y la superficie inferior será cóncava para permitir al aire escapar a través del diámetro inferior. La altura de la sección cóncava debe ser de 4.0 a 18.0 mm en el centro. Los picnómetros de tapones debe tener una capacidad de 24 a 30 ml, y pesará no más de 40 g. *Baño de agua*, a temperatura constante, capaz de mantener la temperatura dentro de 0.1°C (0.2°F) de la temperatura del ensayo.

✚ **Termómetros**, de líquidos en vidrio de rango conveniente con graduaciones por lo menos cada 0.1°C (0.2°F) y un error de escala de máximo de 0.1°C (0.2°F) como se prescribe en ASTM Especificación E1. Termómetro normalmente usado es 63°C (63°F). Cualquier otro termómetro de exactitud igual puede usarse.

✚ **Balanza**, una balanza que pase los requisitos de M 231, Clase B.

✚ **Agua Destilada** - Agua destilada fresca, hervida y enfriada se usará para llenar el picnómetro y la copa.

### 3.2.3.4.-. Procedimiento

**Preparación de la Muestra** - Calentar la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamiento local, hasta que la muestra se haya puesto suficientemente fluida para verter. En ningún caso, la temperatura debe aumentarse a más de 56°C (100°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para alquitrán, o a más de 111°C (200°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para el asfalto. No caliente para más de 30 minutos encima de una llama o el plato caliente o para más de 2 horas en un horno, y evitar incorporar burbujas de aire en la muestra.

Verter suficiente muestra en el picnómetro limpio, seco y calentado para llenarlo cerca tres-cuarto de su capacidad. Tome precauciones para impedir al material de tocar los lados del picnómetro sobre el nivel final, y para prevenir la inclusión de burbujas de aire.

Dejar enfriar el picnómetro con asfalto por un periodo de no menos de 40 minutos, pesar con el tapón al miligramo más cercano. Designe la masa del picnómetro más la muestra como C.

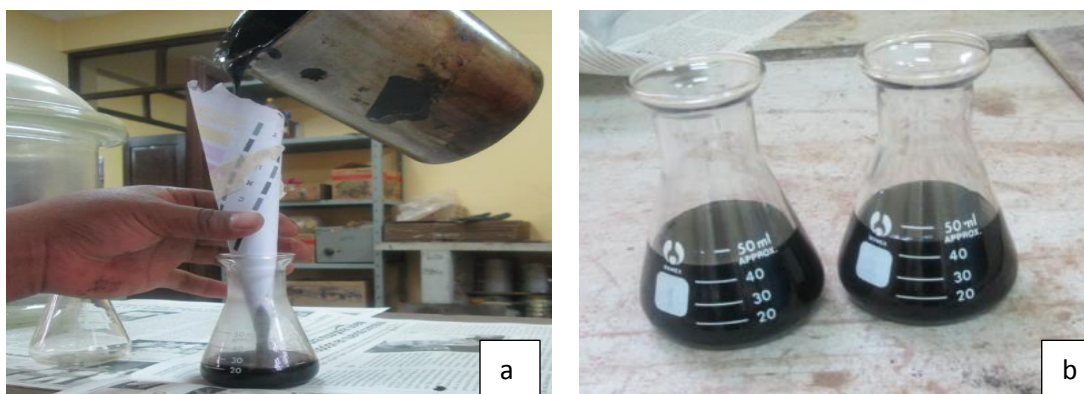


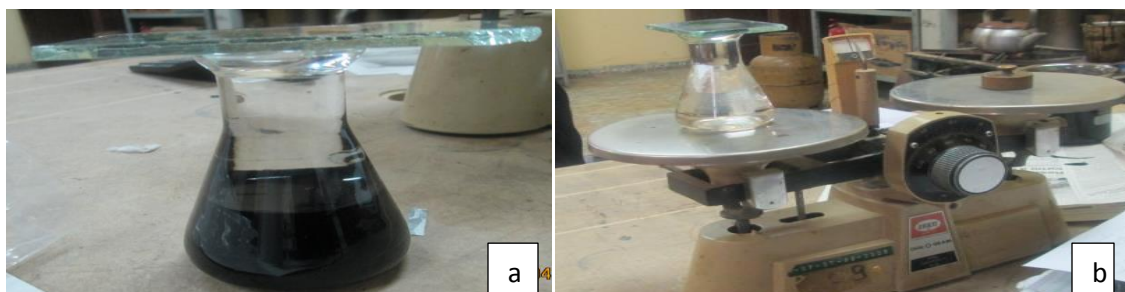
Figura N°37 a) Vaciado del asfalto al picnómetro b) Enfriado del asfalto

Fuente: Elaboración propia

Llenar el picnómetro con agua destilada, fresca y hervida a temperatura del ensayo y poner el tapón en el picnómetro. No permitir que ninguna burbuja de aire permanezca en el picnómetro.

El picnómetro permanece en el baño de agua por un periodo de no menos de 30 minutos.

Figura N°38 a) Picnómetro lleno de asfalto y agua b) Picnómetro con agua



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.3.5.-Determinación

$$\textit{Gravedad específica} = \frac{C - A}{B - A - D + C}$$

Dónde:

A = la masa del picnómetro (más el tapón)

B = la masa del picnómetro lleno con agua

C = la masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = la masa del picnómetro más el asfalto más agua

Tabla N°30 Datos y resultados del peso específico de cemento asfáltico

| Numero de ensayo                        | Unidades            |                   | 1            | 2            | Promedio     |
|-----------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Peso Picnómetro</b>                  | grs.                | A                 | 87           | 87,6         | 87,3         |
| <b>Peso Picnómetro + Agua (25°C)</b>    | grs.                | B                 | 167,6        | 168,1        | 167,85       |
| <b>Peso Picnómetro + Asfalto</b>        | grs.                | C                 | 126,6        | 132,5        | 129,55       |
| <b>Peso Picnómetro + Agua + Asfalto</b> | grs.                | D                 | 168,4        | 169,1        | 168,75       |
| <b>Peso Específico</b>                  | grs/cm <sup>3</sup> | $(C-A)/(B-A-D+C)$ | <b>1,018</b> | <b>1,020</b> | <b>1,019</b> |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.4.-Punto de ablandamiento (ASTM: D 36-89)

#### 3.2.4.1.- Alcance

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento de betún en el rango de 30 a 157°C (86 a 315°F) usando el aparato de la anillo-y-esfera sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno.

#### 3.2.4.2.- Significado y utilización

Los betunes son materiales del visco-elásticos sin puntos de fundición grandemente definidos; ellos se ponen gradualmente más suaves y menos viscosos cuando la temperatura aumenta. Por esta razón, los puntos de ablandamiento deben determinarse por un método arbitrario y estrechamente definido si los resultados van a ser reproducible.

El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de betunes, como un elemento que establece la uniformidad de embarques o fuentes de suministro, y es indicativo de la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas encontradas en servicio.

### 3.2.4.3.- Herramientas

**Anillos:** Dos anillo cuadrados de latón de apoyo.

**Plato para Verter:** Un plato plano liso de latón aproximadamente 50 por 75 mm.

**Esferas:** Dos esferas de acero de 9.5 mm (3/8 in.) de diámetro, cada uno con masa de 3.5g.

**Guías de Centrado de Las Esferas:** Dos guía de latón para centrar las esferas de acero, una para cada anillo,

**Baño :**Una vasija de vidrio, capaz de ser calentada, no menos que 85 mm de diámetro y no menos que 120 mm de altura desde el fondo de la señal luminosa.

**Anillo Poseedor y Ensamblaje:** Un poseedor de latón diseñado para apoyar los dos anillos en una posición horizontal, apoyada en el ensamblaje. El fondo de los anillos de apoyo en el poseedor del anillo debe estar a 25 mm (1.0 in.) sobre la superficie superior del plato del fondo, y la superficie más baja del plato del fondo debe estar a  $16 \pm 3$  mm ( $5/8 \pm 1/8$  in.) del fondo del baño.

**Termómetro:** Un Termómetro ASTM de Punto de Ablandamiento Bajo, teniendo un rango de -2 a +80°C (30 a 180°F

### 3.2.4.4.-Procedimiento

- ✓ Seleccionar uno de los líquidos del baño siguientes y termómetros apropiados para el punto de ablandamiento esperado.
- ✓ Homogenizar su contenido con una espátula.
- ✓ Verter una pequeña muestra de betún caliente en cada anillo, posterior a esto permitir que las muestras se enfríen a temperatura ambiente por un periodo mínimo de 30 minutos.

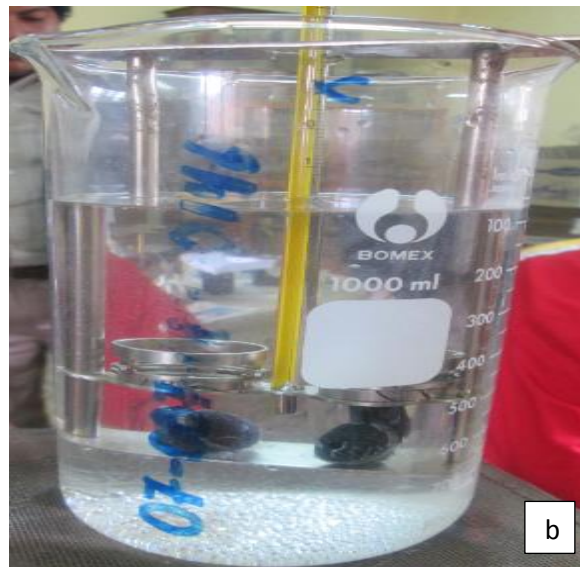
Figura N°39 a) Anillos con vaselina y talco b) Anillo con asfalto enfriando



Fuente: Elaboración Propia

- ✓ Después que las muestras se encuentren frías, cortar el exceso de betún sobre la parte superior del anillo con un cuchillo o espátula ligeramente caliente, de modo que el betún quede al ras y a nivel con el anillo.
- ✓ Montar el aparato con los anillos, guías de centrado de la bola, y el termómetro en posición. Llenar la bañera de modo que la profundidad del líquido sea de  $105 \pm 3$  mm con el aparato en su lugar.
- ✓ Colocar las esferas en las guías y sumergir el aparato en el medio del baño correspondiente.
- ✓ Calentar el baño de tal manera que la temperatura se incremente en rangos de  $5^{\circ}\text{C}$  cada minuto.
- ✓ Registrar para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de  $1^{\circ}\text{C}$ , de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.

Figura N°40 a) Vaso precipitado sometido a calor b) El asfalto se desprende de los anillos



Fuente: Elaboración Propia

#### 3.2.4.4.- Reporte

Tabla N°31 Resultados Punto de ablandamiento

|                | Anillo1 | Anillo2 | Promedio |
|----------------|---------|---------|----------|
| Temperatura °C | 44      | 45      | 44,5     |

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.2.5.-Ductilidad (ASTM: D 113-79)

##### 3.2.5.1.-Alcance

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, de la forma descrita en Sección 4, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. A menos que por otra parte se especifique, el ensayo se hará a una temperatura de  $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ( $77 \pm 0.2^{\circ}\text{F}$ ) y

con una velocidad de 50 mm por minuto  $\pm$  2.5 mm por minuto. A otras temperaturas la velocidad debe especificarse.

### 3.2.5.2.- Significado y utilización

El método de ensayo proporciona una medida de propiedades tensores de materiales bituminosos y puede usarse para medir ductilidad para los requisitos de la especificación.

### 3.2.5.3.- Herramientas

- **Moldes**
- **Plato Base** El plato base se hará de material no absorbente, de espesor suficiente para prevenir deformación, y de un tamaño suficiente para sostener de un a tres moldes. El plato será plano para que el fondo aparezca de cada molde sea tocado a lo largo del plato.
- **Baño de Agua** El baño de agua se debe mantener a la temperatura de la prueba especificada, pudiendo variar no más de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.2^{\circ}\text{F}$ ) de esta temperatura. El volumen de agua debe ser no menos de 10 litros. La profundidad de agua debe ser no menos de 50 mm y tal que el molde puede ser inmerso a una profundidad de 25 mm. El agua en el baño debe ser sustancialmente libre del aceite y limo u otro crecimiento orgánico.
- **Termómetro** Para los ensayos a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) use el Termómetro de Viscosidad Saybolt ASTM No. 17 C ( $17^{\circ}\text{F}$ ) para medir la temperatura del baño de agua y la temperatura del agua en la máquina del ensayo.
- **Máquina de Ensayo** Para estirar parte la briqueta de material bituminoso, cualquier aparato puede usarse en el cual el espécimen se sumerja continuamente en agua mientras las dos grapas se tiran separadamente a una velocidad uniforme, como especificó, sin vibración indebida.
- **Calentador** Un horno o plato caliente, calentador por electricidad o gas, puede usarse para fundir el material bituminoso.
- **Recipiente** Cualquier recipiente conveniente puede usarse para sostener el material bituminoso mientras este es fundido.

- **Contemporizador** Cualquier instrumento conveniente, como un cuchillo de masilla o espátula, puede usarse con tal de que el borde cortante es recto y por lo menos 38 mm (1½ in.) ancho.

#### 3.2.5.4.-Procedimiento

- ✓ Regular el ductilómetro a la temperatura de  $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Asegúrese que la flecha este en cero.
- ✓ Recubrir el plato base y las paredes internas de las piezas laterales con lubricante para evitar que la muestra se pegue en las paredes del molde.
- ✓ Ensamble el molde con las mordazas y las piezas laterales sobre la placa base
- ✓ Calentar la muestra hasta fluidificarla, y vaciar en los moldes sin hacer burbujas, hasta rebasar ligeramente el nivel de enrase.
- ✓ Dejar enfriar los moldes por 30 minutos a temperatura ambiente.
- ✓ Después de enfriarlas colocar en el baño del ductilómetro a temperatura ambiente por 30 minutos.

Figura N°41 a) Briquetas con vaselina y talco b) Briquetas llenas de asfalto



Fuente: Elaboración Propia

- ✓ Enrazar los moldes con una espátula o cuchillo caliente para eliminar el exceso de asfalto en los moldes. Coloque nuevamente los moldes en el baño por 30 minutos.
- ✓ Después de 90 minutos se quita las piezas laterales del molde y separe la briqueta de la base. Se fija las briquetas con sus mordazas en el ductilómetro sujetando los extremos de estas en los postes o ganchos de la máquina del ensayo.
- ✓ Encender el motor, y fijar la flecha a la barra y jalar la muestra con una velocidad de 5cm por minuto, hasta producir una ruptura en la briqueta.
- ✓ Si durante el ensayo, el material bituminoso al estirarse tiene tendencia a subir hasta la superficie del agua o tocar la placa de fondo del ductilómetro, deberá ajustarse la densidad relativa del agua a la del material ensayado, añadiendo cloruro de sodio, hasta conseguir que el hilo quede lo más recto posible, sin elevarse o descender.

Figura N°42 a) Briquetas en el equipo b) briquetas en proceso de extensión



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.5.5.- Reporte

Tabla N°32 Resultados de la ductilidad del cemento asfaltico

| N° de Briqueta  | Longitud de alargamiento(cm) | Temperatura de ensayo °C | Velocidad (cm/min) |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1               | 118                          | 25                       | 5                  |
| 2               | 122                          | 25                       | 5                  |
| 3               | 120                          | 25                       | 5                  |
| <b>Promedio</b> | 120                          | 25                       | 5                  |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.6.-Punto de inflamación

#### 4.2.6.1.- Alcance

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

#### 3.2.6.2.- Definiciones

##### Punto de destello

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

##### Punto de inflamación

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

### 3.2.6.3.- Resumen del método

El vaso del ensayo se llena hasta un nivel especificado con la muestra. La temperatura de la muestra es aumentada rápidamente al principio y entonces a una proporción lenta constante a medida que el punto de destello se aproxima. En intervalos especificados una llama pequeña se pasa por el vaso.

La temperatura más baja a que la aplicación de la llama causa vapores sobre la superficie del líquido es denominada como el punto de destello. Para determinar el punto de inflamación, se continúa con el ensayo hasta que la aplicación de la llama ocasiona que el aceite se incendie y se queme durante por lo menos 5 segundos.

### 3.2.6.4.- Significado y utilización

El punto de destello mide la tendencia de la muestra a formar una mezcla inflamable con aire bajo condiciones del laboratorio controlado.

El punto de destello se usa en regulaciones de seguridad para definir materiales inflamables y combustibles. Uno debe consultar la regulación particular involucrada para las definiciones precisas de estas clases.

El punto de destello puede indicar la posible presencia de materiales altamente volátiles e inflamables con relación a material no inflamable o no volátil.

El punto de inflamación mide las características de la muestra para aguantar combustión.

### 3.2.6.5.- Herramientas

#### Aparato Del Vaso Abierto De Cleveland

*El Vaso de Prueba* de latón,

*Plato Calentador* de latón,

*Aplicador de Llama*

*Calentador*

*Apoyo del termómetro*

### *Nivelador de Llenando*

**Termómetro** Un termómetro que tenga un rango de -6 a 400°C.

#### **3.2.6.6.- Pruebas**

Erróneamente pueden obtenerse puntos de destello altos si no se toman precauciones para evitar la pérdida de material volátil. No abra recipientes innecesariamente y no haga un traslado a menos que la temperatura de la muestra es por lo menos el equivalente de 10°C (18°F) debajo del punto de destello esperado. No use muestras de los recipientes resquebrajados para esta prueba.

#### **3.2.6.7.- Procedimiento**

- Llenar el vaso, a cualquier temperatura conveniente que no exceda 100°C (180°F) sobre el punto de ablandamiento, para que la parte de encima del menisco esté en la línea del relleno.
- Encender la llama y ajústelo a un diámetro de 3.2 a 4.8 mm (0.125 a 0.188 in.).
- Aplicar calor inicialmente para que aumente la proporción de temperatura de la muestra de 14 a 17°C (25 a 30°F) por minuto. Cuando la temperatura de la muestra es aproximadamente 56°C (100°F) debajo del punto de destello anticipado, disminuye el calor para que la proporción de temperatura aumente de 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto para 28°C (50°F) antes del punto de destello.
- Con un movimiento liso y continuo, aplicar la llama o en una línea recta o a lo largo de la circunferencia de un círculo que tiene un radio de por lo menos 150 mm (6 in.). El centro de la llama se debe mover un plano no más de 2.5 mm (0.10 in.) sobre el plano del borde superior del vaso que pasa primero en una dirección, entonces la próxima vez en la dirección opuesta. El tiempo consumido pasando la llama por el vaso será aproximadamente 1 segundo. Durante el último aumento de 17°C en la anterior temperatura al punto de destello, se debe tener cuidado para evitar alterar los vapores en el ensayo del vaso a través de movimientos descuidados o respirar cerca del vaso.

Figura N°43 a) El material comienza a calentarse b) Se aplica la llama a la copa



Fuente: Elaboración Propia

- Anotar como el punto de destello observado la temperatura leída en el termómetro cuando un destello aparece en cualquier punto en la superficie del aceite, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que a veces rodea la llama.
- Para determinar el punto de inflamación, continuar calentando para que la temperatura de la muestra aumente en una proporción de 5 a 6°C (9 a 11°F). Continúe la aplicación de la llama en intervalos de 2°C (5°F) hasta que el aceite se encienda y se continúe quemando durante 5 segundos por lo menos. Grabe la temperatura a este punto como el punto de inflamación del aceite.

### 3.2.6.8.- Determinación y reporte

Tabla N°33 Resultados del punto de destello e inflamación

|                             | Temperatura °C |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Punto de destello</b>    | 242            |
| <b>Punto de inflamación</b> | 323            |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.-Diseño de la mezcla asfáltica.

#### 3.3.1.-Selección del tipo de mezcla o granulometría

Para el presente trabajo se utilizara un tipo de mezcla convencional y se escoge una granulometría perteneciente a los rangos establecidos por el tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$ " según la norma de **Graduaciones propuestas para mezclas cerradas ASTM D3515**.

Tabla N° 34 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas ASTM D3515  
graduación seleccionada Tamaño Máximo Nominal  $\frac{3}{4}$ "

| Tamiz                                                                              | Mezcla Densa                       |        |        |                 |        |        |        |     |        |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|-----|--------|
|                                                                                    | Tamaño máximo nominal de agregados |        |        |                 |        |        |        |     |        |
|                                                                                    | 2"                                 | 1 ½"   | 1"     | $\frac{3}{4}$ " | ½"     | 3/8"   | Nº4    | Nº8 | Nº16   |
| Gradación de agregados (grava; fino y filler si se requiere)<br>Porcentaje en peso |                                    |        |        |                 |        |        |        |     |        |
| 2 ½" (63mm)                                                                        | 100                                | -      | -      | -               | -      | -      | -      | -   | -      |
| 2" (50mm)                                                                          | 90-100                             | 100    | -      | -               | -      | -      | -      | -   | -      |
| 1 ½" (37.5mm)                                                                      | -                                  | 90-100 | 100    | -               | -      | -      | -      | -   | -      |
| 1" (25.0mm)                                                                        | 60-80                              | -      | 90-100 | 100             | -      | -      | -      | -   | -      |
| $\frac{3}{4}$ " (19.0mm)                                                           | -                                  | 56-80  | -      | 90-100          | 100    | -      | -      | -   | -      |
| ½" (12.5mm)                                                                        | 35-65                              | -      | 56-80  | -               | 90-100 | 100    | -      | -   | -      |
| 3/8" (9.5mm)                                                                       | -                                  | -      | -      | 56-80           | -      | 90-100 | 100    | -   | -      |
| Nº4 (4.75mm)                                                                       | 17-47                              | 23-53  | 29-59  | 35-65           | 44-74  | 55-85  | 80-100 | -   | 100    |
| Nº8 (2.36mm)                                                                       | 10-36                              | 15-41  | 19-45  | 23-49           | 28-58  | 32-67  | 65-100 | -   | 95-100 |
| Nº16 (1.18mm)                                                                      | -                                  | -      | -      | -               | -      | -      | 40-80  | -   | 85-100 |
| Nº30 (600µm)                                                                       | -                                  | -      | -      | -               | -      | -      | 25-65  | -   | 70-95  |
| Nº50 (300µm)                                                                       | 3-15                               | 4-16   | 5-17   | 5-19            | 5-21   | 7-23   | 7-40   | -   | 45-75  |
| Nº100 (150µm)                                                                      | -                                  | -      | -      | -               | -      | -      | 3-20   | -   | 20-40  |
| Nº200 (75µm)                                                                       | 0-5                                | 0-6    | 1-7    | 2-8             | 2-10   | 2-10   | 2-10   | -   | 9-20   |

Fuente: Diseño moderno de pavimentos

### 3.3.2.-Dosificación de los agregados

La dosificación de los agregados se establece de las proporciones de los diferentes tamaños de agregados que intervendrán en el diseño, realizándose una combinación teórica, siendo esta calculada por un método adecuado de combinación, o un método por tanteos, se realiza dando cierto porcentaje de cada tipo de agregado de manera que se encuentren los valores para cumplir con las especificaciones deseadas así se realiza la comprobación granulométrica.

Se determina mediante la siguiente formula:

$$P_T = P_1 * \frac{A}{100} + P_2 * \frac{B}{100} + P_3 * \frac{C}{100}$$

$P_T$ =Porcentaje total que pasa de agregado para cada tamiz

$P_1$ =Porcentaje que pasa del agregado 1 de un tamiz N

$P_2$ =Porcentaje que pasa del agregado 2 de un tamiz N

$P_3$ = Porcentaje que pasa del agregado 3 de un tamiz N

A=Porcentaje del agregado 1 requerido para la dosificación

B=Porcentaje del agregado 2 requerido para la dosificación

C=Porcentaje del agregado 3 requerido para la dosificación

La dosificación será de la siguiente manera:

Ejemplo: Dosificación para el tamiz 3/8"

Agregado grava de 3/4" 35%

Agregado grava de 3/8" 20%

Agregado fino 45%

$$P_T = 6.6 * \frac{35\%}{100} + 87 * \frac{20\%}{100} + 100 * \frac{45\%}{100}$$

$$P_T = 64.71\%$$

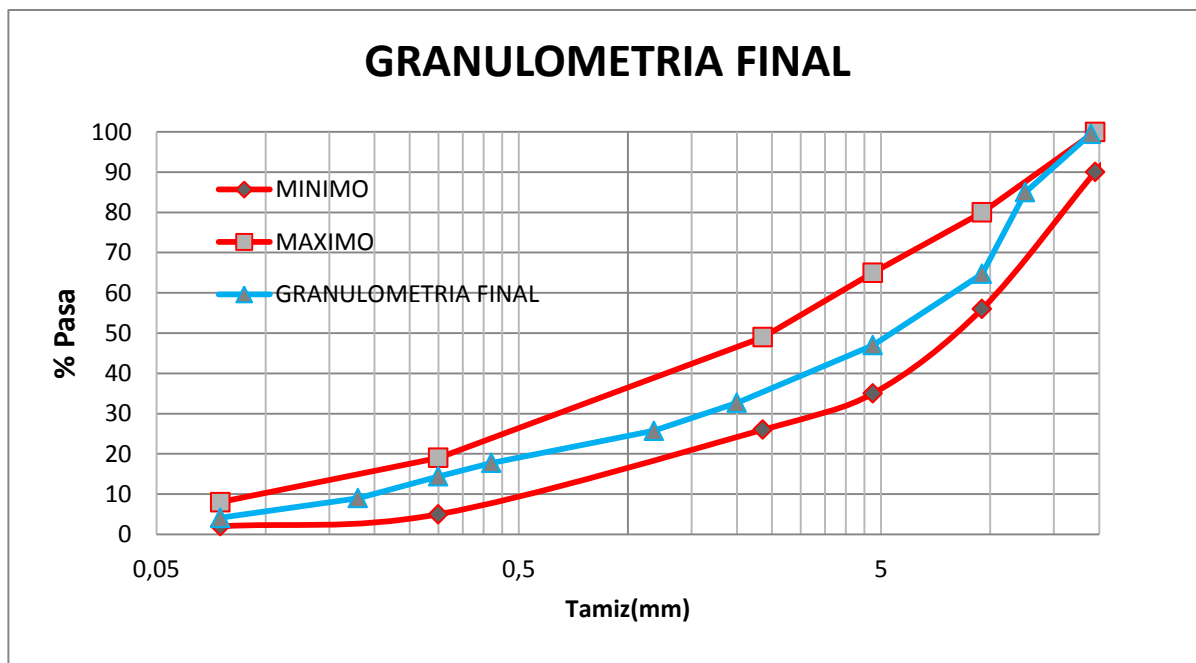
Tenemos que para el tamiz 3/8" con la combinación escogida se tiene un 64.71% del material pasa este tamiz el valor se encuentra dentro de los límites establecidos ya que es mayor a 56% y menor a 80% que son los valores establecidos por la especificación.

Tabla N° 35 Combinación de agregados para el diseño de la mezcla asfáltica tamaño máximo nominal 3/4"

| TAMIZ    | A=35% GRAVA 3/4 |       | B=20% GRAVA 3/8 |       | C=45% ARENA |       | TOTAL | ESPECIFICACION |     |
|----------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------|-------|-------|----------------|-----|
|          | %PASA           | A=35% | %PASA           | B=20% | %PASA       | C=45% | 100%  | MIN            | MAX |
| 1        | 100,0           |       |                 |       |             |       |       |                |     |
| 3/4      | 98,6            | 34,5  | 100,0           | 20,0  | 100,0       | 45,0  | 99,5  | 90             | 100 |
| 1/2      | 57,1            | 20,0  | 100,0           | 20,0  | 100,0       | 45,0  | 85,0  |                |     |
| 3/8      | 6,6             | 2,3   | 87,0            | 17,4  | 100,0       | 45,0  | 64,7  | 56             | 80  |
| N°4      | 0,8             | 0,3   | 23,3            | 4,7   | 93,5        | 42,1  | 47,0  | 35             | 65  |
| N°10     | 0,7             | 0,3   | 3,7             | 0,7   | 70,4        | 31,7  | 32,7  |                |     |
| N°16     | 0,7             | 0,3   | 3,1             | 0,6   | 55,2        | 24,9  | 25,7  |                |     |
| N°40     | 0,6             | 0,2   | 2,5             | 0,5   | 37,8        | 17,0  | 17,7  |                |     |
| N°50     | 0,6             | 0,2   | 2,3             | 0,5   | 30,4        | 13,7  | 14,4  | 5              | 19  |
| N°80     | 0,6             | 0,2   | 2,1             | 0,4   | 18,5        | 8,3   | 9,0   |                |     |
| N°200    | 0,4             | 0,1   | 1,2             | 0,2   | 8,3         | 3,7   | 4,1   | 2              | 8   |
| PASA 200 | 0,0             | 0,0   | 0,0             | 0,0   | 0,0         | 0,0   | 0,0   |                |     |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°4 Análisis combinado de comprobación



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3.- Diseño de la mezcla con asfaltos 85-100 usando el procedimiento del ensayo Marshall (ASTM D-1559).

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas

Este método consiste en moldear briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente. Estas briquetas dispuestas en serie y cada serie con diferentes porcentajes de asfalto, se las moldea una vez que los materiales (agregados y asfalto) hayan sido aprobados según sus respectivas especificaciones de calidad, tamaño, etc.

#### 3.3.3.1.-Preparación de las probetas.

**Dosificación agregado y asfalto para el contenido óptimo de asfalto .-**Después de realizar la caracterización del agregado pétreo y el cemento asfáltico se fabricaron

tres briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto entre 4% y 6,5%, con el fin de realizar el diseño de Marshall. Esto con el objeto de determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas convencionales elaboradas con asfaltos de 85-100.

Ejemplo: Obtención de dosificación de briketa de 1200gr de peso con porcentajes de asfalto del 4.5% y 95.5% de agregado

Peso total de briketa =1200gr

Peso C.A.=1200\*0.045=54 gr

Peso de agregado=1200\*0.955=1146gr

**Tabla N°36 Dosificación para el contenido de gigante asfáltico de 4.5%**

| TAMIZ PASA | TAMIZ RETIENE | %RETENIDO | %RET*Pt     | PESO AGREGADO(gr) |
|------------|---------------|-----------|-------------|-------------------|
| 1          | 3/4           | 0,48      | 1146*0.0048 | 5,48              |
| 3/4        | 1/2           | 14,54     | 1146*0.1454 | 166,62            |
| 1/2        | 3/8           | 20,27     | 1146*0.2027 | 232,26            |
| 3/8        | N°4           | 17,70     | 1146*0.1770 | 202,80            |
| N°4        | N°10          | 14,32     | 1146*0.1432 | 164,15            |
| N°10       | N°16          | 6,95      | 1146*0.0695 | 79,66             |
| N°16       | N°40          | 8,00      | 1146*0.080  | 91,73             |
| N°40       | N°50          | 3,35      | 1146*0.0335 | 38,42             |
| N°50       | N°80          | 5,40      | 1146*0.0540 | 61,88             |
| N°80       | N°200         | 4,89      | 1146*0.0489 | 56,07             |
| N°200      | FONDO         | 4,10      | 1146*0.0410 | 46,93             |

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera se realiza el cálculo de cemento asfáltico y agregado en peso para cada porcentaje de cemento asfáltico desde 4%,4.5%,5%,5.5%,6%,6.5% para obtener los datos correspondientes para llegar a encontrar el contenido óptimo de asfalto.

Figura N°44 a) Material separado por tamices b) Bolsas con 1200gr



Fuente: Elaboración Propia

### ***Equipo***

- Compactadora mecánica de briquetas.
- Martillo de compactación.
- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza eléctrica  $A \pm 0.01$  gr.
- Bandejas metálicas.
- Placa de calentamiento.
- Termómetro blindado.
- Espátula y cucharas.
- Medidor de la estabilidad.

· Asfalto.

**Procedimiento.**

- ✓ Calentar el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C.
- ✓ Pesar en bandejas separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 175 a 190 °C.
- ✓ Calentar el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.
- ✓ Pesar sobre una bandeja las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos .Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Figura N°45 a) Peso del agregado b) Control peso agregado y asfalto 1200gr



Fuente: Elaboración Propia

- ✓ Mezclar el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento.
- ✓ Compactar la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de:
  - Un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".
- ✓ Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se Fabricaron 18 briquetas.

Figura N°46 a) Mezclado de muestra b) Compactación con martillo



Fuente: Elaboración Propia

- ✓ Dejar enfriar el molde conteniendo la briqueta a temperatura ambiente y luego se extraer la briqueta mediante un gato hidráulico

Figura N°47 a) Extracción de la briqueta b) briquetas para el contenido óptimo



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3.2.-Procedimiento del ensayo.

Luego de extraer las briquetas de los moldes son sometidas cada una a los siguientes ensayos:

- a) Determinación del peso específico “BULK” (densidad aparente).
- b) Determinación de la densidad máxima teórica
- c) Ensayo de Estabilidad y flujo.

#### 3.3.3.2.1.- Determinación gravedad Específica Bulk

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para su respectivo curado a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad Bulk, según AASHTO T 166-05.

#### Procedimiento

- Secar los especímenes hasta masa constante (curado a temperatura ambiente) luego se registra peso seco de cada briqueta.
- Sumergir en un recipiente con agua a 25 °C, dejándolos saturar por lo menos 30 minutos. Al final del período se removieron los especímenes y se colocan

en la canastilla sumergida previamente agitada para la eliminación de burbujas de aire, y se registrar el peso sumergido de cada briqueta.

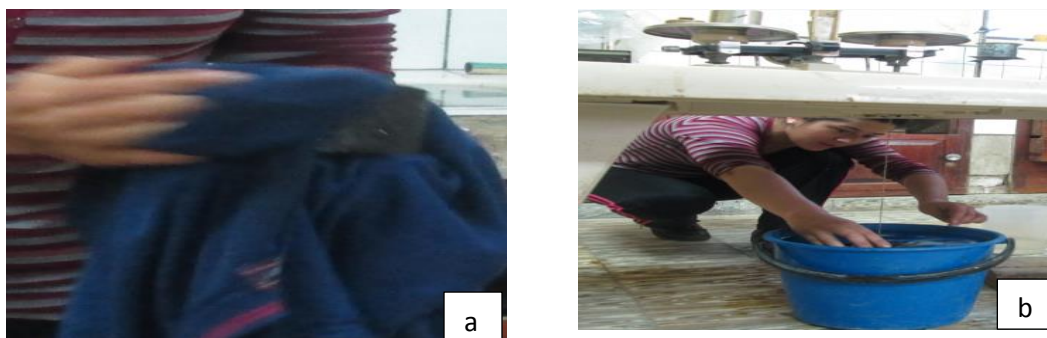
Figura N°48 a) Peso de la briqueta seca b) Briquetas sumergidas



Fuente: Elaboración propia

- Retirar la briqueta de la canastilla se secó la humedad del espécimen con una toalla húmeda tan rápido como sea posible. Pesamos al espécimen y se registra como peso saturado superficialmente seco.

Figura N°49 a) Briqueta saturada Superficialmente seca b) briqueta sumergida



Fuente: Elaboración Propia

La norma AASHTO T 166-05 establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0.02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor es descartada.

Se la calcula con la siguiente formula:

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

$G_{mb}$ =gravedad específica de la mezcla compactada.

$W_{MUESTRA}$ =Peso de la muestra seca al aire.

$W_{sss}$ =peso de la muestra superficialmente seca.

$W_{sumergido}$ =peso de la muestra sumergida.

Ejemplo: Para 4.5% de asfalto para las briquetas número 4, 5,6

$$G_{mb4} = \frac{1192.4}{1197.8 - 673.4} = 2.274 gr/cm^3$$

$$G_{mb5} = \frac{1189.2}{1194.8 - 671.3} = 2.272 gr/cm^3$$

$$G_{mb6} = \frac{1190.3}{1197.7 - 672.8} = 2.268 gr/cm^3$$

$$G_{mbPromedio} = 2.271 gr/cm^3$$

Tabla N° 37 Densidades Bulk para cada Briqueta de Prueba.

| <i>N° Probeta</i> | <i>Altura de Probeta</i> | <i>% Asfalto</i>   |                      | <i>Peso Probeta</i> |                       |                          | <i>Vol.</i>    | <i>Densidad Probeta</i> |                          |
|-------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------|
|                   |                          | <i>Base mezcla</i> | <i>Base Agregado</i> | <i>Seco</i>         | <i>Sat. Sup. Seca</i> | <i>Sumergida en Agua</i> | <i>Probeta</i> | <i>Densidad Real</i>    | <i>Densidad Promedio</i> |
|                   |                          | <i>%</i>           | <i>%</i>             | <i>grs.</i>         | <i>grs.</i>           | <i>grs.</i>              | <i>CC</i>      | <i>Grs./cm3</i>         | <i>Grs./cm3</i>          |
| <b>1</b>          | 6,37                     | <b>4,0</b>         | 4,2                  | 1194,0              | 1201,0                | 661,5                    | 539,5          | 2,213                   |                          |
| <b>2</b>          | 6,40                     | <b>4,0</b>         | 4,2                  | 1198,2              | 1204,2                | 665,0                    | 539,2          | 2,222                   |                          |
| <b>3</b>          | 6,38                     | <b>4,0</b>         | 4,2                  | 1196,2              | 1202,7                | 664,3                    | 538,4          | 2,222                   | <b>2,219</b>             |
| <b>4</b>          | 6,41                     | <b>4,5</b>         | 4,7                  | 1192,4              | 1197,8                | 673,4                    | 524,4          | 2,274                   |                          |
| <b>5</b>          | 6,30                     | <b>4,5</b>         | 4,7                  | 1189,2              | 1194,8                | 671,3                    | 523,5          | 2,272                   |                          |
| <b>6</b>          | 6,38                     | <b>4,5</b>         | 4,7                  | 1190,3              | 1197,7                | 672,8                    | 524,9          | 2,268                   | <b>2,271</b>             |
| <b>7</b>          | 6,32                     | <b>5,0</b>         | 5,3                  | 1192,4              | 1195,4                | 675,1                    | 520,3          | 2,292                   |                          |
| <b>8</b>          | 6,30                     | <b>5,0</b>         | 5,3                  | 1188,0              | 1192,7                | 673,1                    | 519,6          | 2,286                   |                          |
| <b>9</b>          | 6,29                     | <b>5,0</b>         | 5,3                  | 1190,0              | 1193,1                | 674,2                    | 518,9          | 2,293                   | <b>2,290</b>             |
| <b>10</b>         | 6,25                     | <b>5,5</b>         | 5,8                  | 1183,3              | 1185,8                | 668,0                    | 517,8          | 2,285                   |                          |
| <b>11</b>         | 6,27                     | <b>5,5</b>         | 5,8                  | 1183,6              | 1186,6                | 671,3                    | 515,3          | 2,297                   |                          |
| <b>12</b>         | 6,23                     | <b>5,5</b>         | 5,8                  | 1181,5              | 1184,5                | 669,3                    | 515,2          | 2,294                   | <b>2,292</b>             |
| <b>13</b>         | 6,20                     | <b>6,0</b>         | 6,4                  | 1174,2              | 1174,8                | 665,0                    | 509,8          | 2,303                   |                          |
| <b>14</b>         | 6,22                     | <b>6,0</b>         | 6,4                  | 1178,4              | 1178,8                | 667,1                    | 511,7          | 2,303                   |                          |
| <b>15</b>         | 6,21                     | <b>6,0</b>         | 6,4                  | 1175,3              | 1175,5                | 666,0                    | 509,5          | 2,307                   | <b>2,304</b>             |
| <b>16</b>         | 6,20                     | <b>6,5</b>         | 7,0                  | 1179,1              | 1179,2                | 665,4                    | 513,8          | 2,295                   |                          |
| <b>17</b>         | 6,18                     | <b>6,5</b>         | 7,0                  | 1177,0              | 1176,8                | 663,9                    | 512,9          | 2,295                   |                          |
| <b>18</b>         | 6,21                     | <b>6,5</b>         | 7,0                  | 1179,7              | 1179,7                | 665,3                    | 514,4          | 2,293                   | <b>2,294</b>             |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3.2.2.-Determinación de la densidad máxima teórica:

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima,  $G_{mm}$ , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Mientras que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209, la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño

Para esta prueba no se cuenta con el equipo necesario para realizarlo según la Norma ASTM D2047, por lo que se recurrió a una fórmula de aproximación:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

$G_{mm}$ =gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

$P_{mm}$  = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva de la combinación de agregado

$G_b$  = gravedad específica del asfalto.

#### -Gravedad específica neta del agregado

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino, y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots \dots P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \cdots \dots \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

$G_{sb}$  = gravedad especifica neta para el agregado total

$P_1, P_2, P_n$  = porcentajes individuales por masa de agregado

$G_1, G_2, G_n$  = gravedad especifica neta individual del agregado

$P_1=53\%$

$P_2=47\%$

$G_1$ = Agregado grueso= $2.643\text{gr/cm}^3$

$G_2=2.565\text{ gr/cm}^3$

$$G_{sb} = \frac{47 + 53.}{\frac{47}{2.565} + \frac{53}{2.643}}$$

$$G_{sb} = 2.605 \text{ gr/cm}^3$$

La gravedad  $G_{sb}=2.605\text{ gr/cm}^3$  es la gravedad que se usa para el diseño de las briquetas ya que es la que representa a la combinación de agregados.

Ejemplo: Gravedad Máxima para contenido de asfalto del 4.5%

$$G_{mm\ 4.5} = \frac{100}{\frac{95.5}{2.605} + \frac{4.5}{1.019}} = 2.435\text{gr/cm}^3$$

Tabla N°38 Valores de densidad máxima teórica

| % de cada material             |                            | Peso específico(gr/cm3) |                                 |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4       |                            | 53                      | 2,643                           |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4           |                            | 47                      | 2,565                           |
| Peso Específico Total Agregado |                            | 100                     | 2,605                           |
| Peso específico asfalto        |                            | 100                     | 1.019                           |
| N° Probeta                     | Altura de Probeta promedio | % Asfalto               | Densidad Máxima Teórica(gr/cm3) |
| 1                              | 6,4                        | 4,0                     | 2,453                           |
| 2                              | 6,4                        | 4,5                     | 2,435                           |
| 3                              | 6,3                        | 5,0                     | 2,417                           |
| 4                              | 6,3                        | 5,5                     | 2,400                           |
| 5                              | 6,2                        | 6,0                     | 2,383                           |
| 6                              | 6,2                        | 6,5                     | 2,366                           |

Fuente: Elaboración Propia

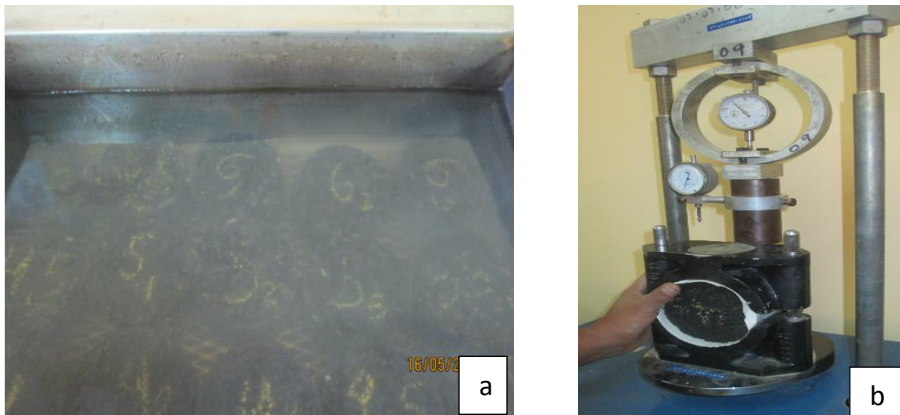
### 3.3.3.2.3.-Ensayo de Estabilidad y flujo

El método de ensayo según la norma AASHTO T 245-97(2004) para determinar la estabilidad y flujo procede de la manera siguiente:

- Los especímenes preparados con cemento asfáltico son colocados en baño maría de 30 a 40 minutos, manteniendo la temperatura del baño maría a  $60 \pm 1$  °C ( $140 \pm 1.8$  °F).
- Colocar los cabezales de ensayo en el baño maría unos segundos antes de iniciar el ensayo. Se remueva la briqueta del baño maría y se coloca en la parte interna del cabezal de ensayo inferior. Colocamos el segmento superior del cabezal de ensayo sobre la briqueta, y se pone el ensamble completo en posición en la máquina de ensayo. Seguidamente colocar el medidor de flujo que será utilizado, en la posición correcta sobre una de las barras guía y se ajusta el medidor de flujo a cero mientras se sostiene la manga firmemente en contra del segmento superior del cabezal de ensayo.

- Aplicar la carga a una razón de un movimiento constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min) hasta que la carga máxima es alcanzada y la carga decrece como es indicada por el dial. Las lecturas tanto del dial de estabilidad como de flujo son registradas.

Figura N°50 a) Briquetas sumergidas baño maría 60°C b) Rotura de briquetas a carga constante



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación de mejor ajuste para el equipo Marshall de S.E.D.E.C.A del anillo de carga es la siguiente:

$$Lectura_{corregida} = F_{corregido} * \frac{A + (B * Lect. Dial)}{C}$$

Donde:

Lect.Dial=Lectura que se registra en el medidor de estabilidad

F<sub>Correccion</sub>=Se obtiene de la tabla N°1 ( Ver anexo A)

**A**=11.77864069

**B**=2.255714281

**C**=0.4536

Ejemplo:Para el 4.5% de cemento asphaltico

$$Lectura_{corregida1} = 0.985 * \frac{11.77864069 + (2.255714281 * 290)}{0.4536}$$

$$Lectura_{corregida1} = 1446.09 \text{ Lib}$$

$$Lectura_{corregida2} = 1.013 * \frac{11.77864069 + (2.255714281 * 280)}{0.4536}$$

$$Lectura_{corregida2} = 1436.82 \text{ Lib}$$

$$Lectura_{corregida3} = 0.993 * \frac{11.77864069 + (2.255714281 * 280)}{0.4536}$$

$$Lectura_{corregida3} = 1407.75 \text{ Lib.}$$

$$Lectura_{cor.promedio} = \frac{1146.09 + 1436.82 + 1407.75}{3} = 1430.22 \text{ Lib}$$

Los valores de estabilidad corregida se muestran en la tabla N°39

Tabla N°39 Estabilidad y flujo de las briquetas ensayadas

| N° Probeta | Altura de Probeta | % Asfalto | Estabilidad Marshall |         |                   |                      |                | Flujo             |              |
|------------|-------------------|-----------|----------------------|---------|-------------------|----------------------|----------------|-------------------|--------------|
|            |                   |           | LEC.DIAL             | Carga   | Factor corrección | Carga Real Corregida | Carga Promedio | En 1/100 pulgadas | promedio     |
|            |                   | %         |                      | Libras  |                   | Libras               |                | Libras            |              |
| 1          | 6,37              | 4,0       | 230                  | 1169,74 | 0,995             | 1163,89              |                | 0,07              |              |
| 2          | 6,40              | 4,0       | 245                  | 1244,33 | 0,988             | 1228,78              |                | 0,08              |              |
| 3          | 6,38              | 4,0       | 250                  | 1269,20 | 0,993             | 1259,68              | 1217,45        | 0,08              | <b>7,87</b>  |
| 4          | 6,41              | 4,5       | 290                  | 1468,11 | 0,985             | 1446,09              |                | 0,09              |              |
| 5          | 6,30              | 4,5       | 280                  | 1418,38 | 1,013             | 1436,82              |                | 0,10              |              |
| 6          | 6,38              | 4,5       | 280                  | 1418,38 | 0,993             | 1407,75              | 1430,22        | 0,09              | <b>9,32</b>  |
| 7          | 6,32              | 5,0       | 340                  | 1716,76 | 1,008             | 1730,49              |                | 0,11              |              |
| 8          | 6,30              | 5,0       | 330                  | 1667,03 | 1,013             | 1688,70              |                | 0,11              |              |
| 9          | 6,29              | 5,0       | 340                  | 1716,76 | 1,016             | 1744,23              | 1721,14        | 0,10              | <b>10,76</b> |
| 10         | 6,25              | 5,5       | 390                  | 1965,40 | 1,027             | 2018,47              |                | 0,11              |              |
| 11         | 6,27              | 5,5       | 380                  | 1915,67 | 1,021             | 1955,90              |                | 0,11              |              |
| 12         | 6,23              | 5,5       | 360                  | 1816,22 | 1,032             | 1874,34              | 1949,57        | 0,12              | <b>11,42</b> |
| 13         | 6,20              | 6,0       | 320                  | 1617,30 | 1,040             | 1681,99              |                | 0,13              |              |
| 14         | 6,22              | 6,0       | 330                  | 1667,03 | 1,035             | 1725,38              |                | 0,14              |              |
| 15         | 6,21              | 6,0       | 310                  | 1567,57 | 1,037             | 1625,57              | 1677,65        | 0,13              | <b>13,39</b> |
| 16         | 6,20              | 6,5       | 210                  | 1070,28 | 1,040             | 1113,09              |                | 0,15              |              |
| 17         | 6,18              | 6,5       | 200                  | 1020,55 | 1,046             | 1067,50              |                | 0,17              |              |
| 18         | 6,21              | 6,5       | 190                  | 970,82  | 1,037             | 1006,74              | 1062,44        | 0,17              | <b>16,14</b> |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3.3.-Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Después de determinar la densidad teórica, la densidad máxima teórica, la estabilidad y el flujo con cada una de las briquetas correspondientes a los 6 grupos cuyos contenidos de asfalto varían en 0.5 % se procede a tabular los resultados y complementar los datos con otros valores calculados como son:

#### 3.3.3.3.1.-Contenido de vacíos

Los vacíos de aire,  $V_a$ , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 = \left( \frac{I - H}{I} \right) * 100$$

Dónde:

$V_a$  = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Ejemplo: Calculamos el contenido de vacíos para un 4.5% de cemento asfáltico

$G_{mm}$  = 2.435 gr/cm<sup>3</sup>

$G_{mb}$  = 2.271 gr/cm<sup>3</sup>

$$V_a = \frac{2.435 - 2.271}{2.435} * 100 = 6.728\%$$

Tabla N°40 Contenido de vacíos según porcentaje de asfalto

| %<br>Asfalto | Densidad<br>Promedio | Densidad<br>Máxima<br>Teórica | % de Vacíos<br>Mezcla Total |
|--------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| %            | Grs./cm <sup>3</sup> | Grs./cm <sup>3</sup>          | %                           |
| A            | H                    | I                             | $J=(I-H)/I * 100$           |
| 4,0          | 2,219                | 2,453                         | 9,527                       |
| 4,5          | 2,271                | 2,435                         | 6,728                       |
| 5,0          | 2,290                | 2,417                         | 5,246                       |
| 5,5          | 2,292                | 2,400                         | 4,503                       |
| 6,0          | 2,304                | 2,383                         | 3,297                       |
| 6,5          | 2,294                | 2,366                         | 3,030                       |

Fuente: Elaboración Propia

**3.3.3.3.2.-Vacíos del agregado mineral**

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * (100 - \%C.A)}{G_{sb}} = 100 - \frac{H * (100 - A)}{G_{sb}}$$

$G_{mb}$ =Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

$G_{sb}$ = Gravedad específica neta total del agregado.

$\%C.A.$ =contenido de agregado porcentaje total de la masa en la mezcla asfáltica.

Se realiza el cálculo para cada porcentaje de asfalto (Tabla N°41)

Ejemplo: Calcular el contenido de vacíos *del agregado mineral* para un 4.5% de cemento asfáltico  $\%C.A. = 4.5\%$

$G_{sb}=2.605 \text{ gr/cm}^3$

$G_{mb}=2.701 \text{ gr/cm}^3$

$$VMA = 100 - \frac{2.271 * (100 - 4.5)}{2.605} = 16.757 \%$$

Tabla N° 41 Contenido de vacíos V.A.M. según porcentaje de asfalto

|                                                                          |                                                                        |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Gravedad especifica neta total del agregado(<math>G_{sb}</math>)=</b> |                                                                        | <b>2.605 gr/cm<sup>3</sup></b>                 |
| <b>% Asfalto</b>                                                         | <b>Densidad Promedio (<math>G_{mb}</math>)</b><br>Grs./cm <sup>3</sup> | <b>% V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)</b>     |
| <b>A</b>                                                                 | <b>H</b>                                                               | <b><math>K=100-((H*(100-A))/G_{sb})</math></b> |
| <b>4,0</b>                                                               | 2,219                                                                  | 18,238                                         |
| <b>4,5</b>                                                               | 2,271                                                                  | 16,757                                         |
| <b>5,0</b>                                                               | 2,290                                                                  | 16,485                                         |
| <b>5,5</b>                                                               | 2,292                                                                  | 16,873                                         |
| <b>6,0</b>                                                               | 2,304                                                                  | 16,865                                         |
| <b>6,5</b>                                                               | 2,294                                                                  | 17,665                                         |

Fuente: Elaboración Propia

**3.3.3.3.3.-Porcentaje de vacíos llenos de asfalto**

Los vacíos llenos de asfalto (VFA), son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA), que se encuentran llenos de asfalto.

El VMA abarca asfalto y aire, mientras que el VFA solamente abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de VFA se expresa generalmente como un porcentaje

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto,

VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 * \frac{VMA - V_a}{VMA} = 100 * \frac{K - J}{K}$$

Dónde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V<sub>a</sub> = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

Se realiza el cálculo para cada porcentaje de asfalto del V.A.F. (Tabla N°42)

Ejemplo: Calcular el contenido de vacíos llenos de asfalto para un 4.5% de cemento asfáltico.

V<sub>a</sub>=6.73 %

V.A.M.=16.76 %

$$VFA = 100 * \frac{16.76 - 6.73}{16.76} = 59,85 \%$$

Tabla N° 42 Vacíos llenos de Asfalto (VFA) para distintos % C.A.

| %<br>Asfalto | % de Vacíos<br>Mezcla Total | %V.A.M | %V.A.F. (Relación Bitumen Vacíos) |
|--------------|-----------------------------|--------|-----------------------------------|
| A            | J                           | K      | L=(K-J)/K*100                     |
| 4,0          | 9,53                        | 18,24  | 47,76                             |
| 4,5          | 6,73                        | 16,76  | 59,85                             |
| 5,0          | 5,25                        | 16,48  | 68,18                             |
| 5,5          | 4,50                        | 16,87  | 73,31                             |
| 6,0          | 3,30                        | 16,86  | 80,45                             |
| 6,5          | 3,03                        | 17,66  | 82,85                             |

Fuente: Elaboración Propia

#### **3.3.3.3.4.-El procedimiento para determinar contenido optimo de cemento asfaltico**

Tabular los resultados de ensayo, corregir los valores de estabilidad para cada espécimen (ASTM D1559), y calcular el promedio de cada tres especímenes.

Grafique:

- Contenido de asfalto Vs. Densidad (por unidad de peso).
- Contenido de asfalto Vs. Estabilidad Marshall.
- Contenido de asfalto Vs. Flujo.
- Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos, VTM.
- Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA.
- Contenido de asfaltos Vs. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA.

1. Determinar el contenido de asfalto correspondiente a la medida especificada del contenido de vacíos (4% típicamente). Este es el óptimo contenido de asfalto.

2. Determinar las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

- Estabilidad Marshall
- Flujo
- Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA

3. Comparar cada uno de estos valores de especímenes y si todos tiene el rango especificado, entonces el óptimo contenido de asfalto determinado es satisfactorio. Si algunas de estas propiedades están fuera del rango de especificaciones, la mezcla debe ser rediseñada.

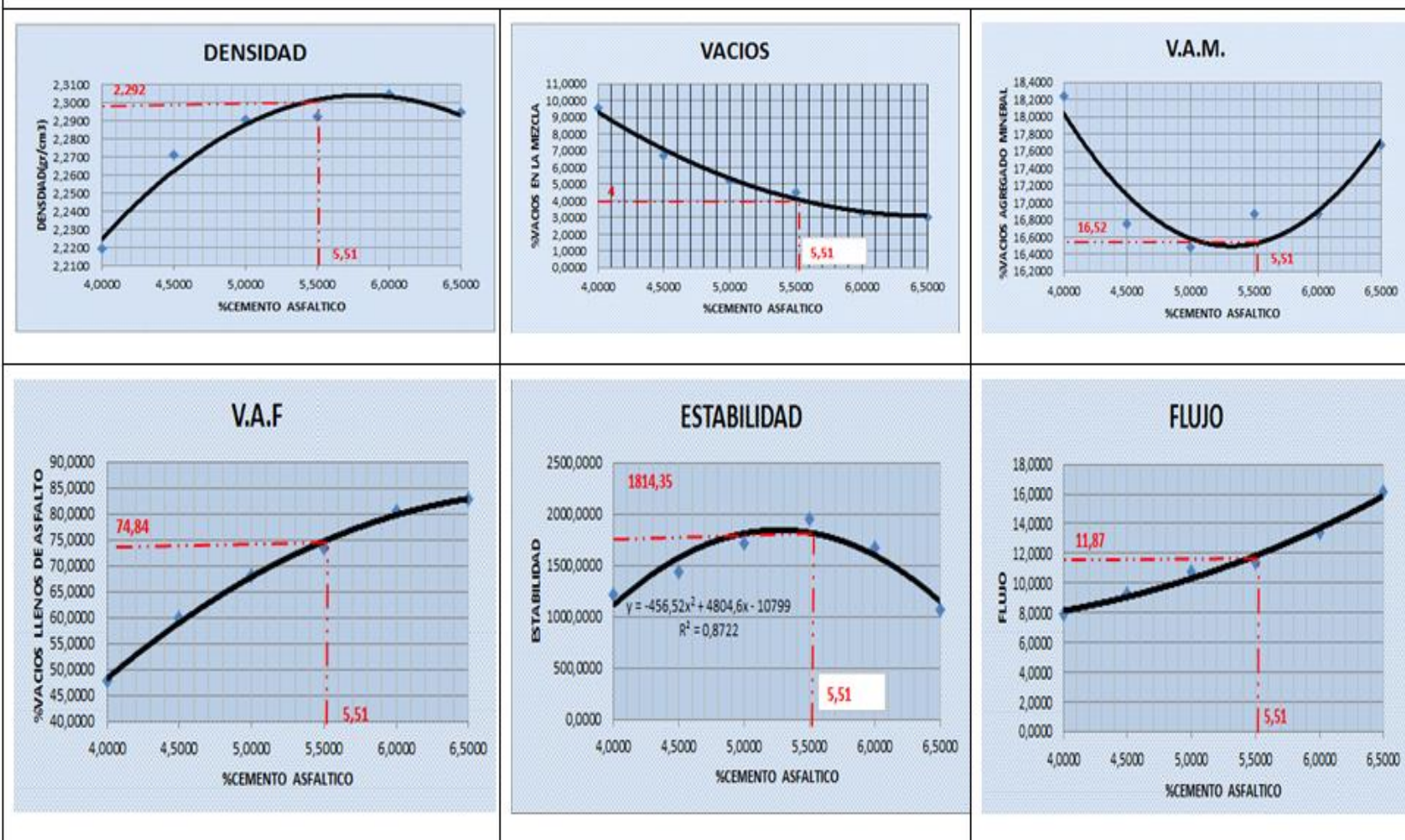
Los valores obtenidos de los gráficos según este procedimiento se muestran en la tabla N°44 para un contenido de vacío del 4%.

**Tabla N°43 Diseño de la mezcla asfáltica Método Marshall**

| DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE METODO MARSHALL C.A. 85-100 |             |           |              |             |           |                               |                  |          |           |             |           |              |                      |            |             |                   |            |            |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------|-------------|-----------|-------------------------------|------------------|----------|-----------|-------------|-----------|--------------|----------------------|------------|-------------|-------------------|------------|------------|
| Peso Específico Total agregado Gsb                                 |             |           |              |             |           | Peso Específico Total asfalto |                  |          |           |             |           | N° DE Golpes |                      |            |             |                   |            |            |
| 2,605                                                              |             |           |              |             |           | 1,019                         |                  |          |           |             |           | 75,00        |                      |            |             |                   |            |            |
| N° Probeta                                                         | Altura de P | % Asfalto | Peso Probeta |             |           | Vol.                          | Densidad Probeta |          |           | % de Vacíos |           |              | Estabilidad Marshall |            |             |                   | Flujo      |            |
|                                                                    |             | Base mez  | Seco         | Sat. Sup. S | Sumergida | Probeta                       | Densidad R       | Densidad | Densidad  | % de Vacío  | V.A.M. (V | R.B.V. (Re   | LEC. DIAL            | Carga      | Factor corr | Carga Real Correg | Carga Prom | En 1/100 p |
|                                                                    |             | %         | grs.         | grs.        | grs.      | CC                            | Grs./cm3         | Grs./cm3 | Grs./cm3  | %           | %         | %            |                      | Libras     |             | Libras            | Libras     | promedio   |
|                                                                    |             | A         | C            | D           | E         | F=D-E                         | G=C/F            | H        | I=100/((A | J=((I-H)/H  | K=100-((H | L=(K-J)/K*   | M                    | N=(11,77+2 | O(TablaA    | P=O*N             | Q          | R          |
|                                                                    |             |           |              |             |           |                               |                  |          |           |             |           |              |                      |            |             |                   |            | S          |
| 1                                                                  | 6,37        | 4,00      | 1194,00      | 1201,00     | 661,50    | 539,50                        | 2,213            |          |           |             |           |              | 230                  | 1169,74    | 0,995       | 1163,89           |            | 0,07       |
| 2                                                                  | 6,40        | 4,00      | 1198,20      | 1204,20     | 665,00    | 539,20                        | 2,222            |          |           |             |           |              | 245                  | 1244,33    | 0,988       | 1228,78           |            | 0,08       |
| 3                                                                  | 6,38        | 4,00      | 1196,20      | 1202,70     | 664,30    | 538,40                        | 2,222            | 2,219    | 2,453     | 9,527       | 18,238    | 47,761       | 250                  | 1269,20    | 0,993       | 1259,68           | 1217,45    | 0,08       |
| 4                                                                  | 6,41        | 4,50      | 1192,40      | 1197,80     | 673,40    | 524,40                        | 2,274            |          |           |             |           |              | 290                  | 1468,11    | 0,985       | 1446,09           |            | 0,09       |
| 5                                                                  | 6,30        | 4,50      | 1189,20      | 1194,80     | 671,30    | 523,50                        | 2,272            |          |           |             |           |              | 280                  | 1418,38    | 1,013       | 1436,82           |            | 0,10       |
| 6                                                                  | 6,38        | 4,50      | 1190,30      | 1197,70     | 672,80    | 524,90                        | 2,268            | 2,271    | 2,435     | 6,728       | 16,757    | 59,849       | 280                  | 1418,38    | 0,993       | 1407,75           | 1430,22    | 0,09       |
| 7                                                                  | 6,32        | 5,00      | 1192,40      | 1195,40     | 675,10    | 520,30                        | 2,292            |          |           |             |           |              | 340                  | 1716,76    | 1,008       | 1730,49           |            | 0,11       |
| 8                                                                  | 6,30        | 5,00      | 1188,00      | 1192,70     | 673,10    | 519,60                        | 2,286            |          |           |             |           |              | 330                  | 1667,03    | 1,013       | 1688,70           |            | 0,11       |
| 9                                                                  | 6,29        | 5,00      | 1190,00      | 1193,10     | 674,20    | 518,90                        | 2,293            | 2,290    | 2,417     | 5,246       | 16,485    | 68,178       | 340                  | 1716,76    | 1,016       | 1744,23           | 1721,14    | 0,10       |
| 10                                                                 | 6,25        | 5,50      | 1183,30      | 1185,80     | 668,00    | 517,80                        | 2,285            |          |           |             |           |              | 390                  | 1965,40    | 1,027       | 2018,47           |            | 0,11       |
| 11                                                                 | 6,27        | 5,50      | 1183,60      | 1186,60     | 671,30    | 515,30                        | 2,297            |          |           |             |           |              | 380                  | 1915,67    | 1,021       | 1955,90           |            | 0,11       |
| 12                                                                 | 6,23        | 5,50      | 1181,50      | 1184,45     | 669,30    | 515,15                        | 2,294            | 2,292    | 2,400     | 4,503       | 16,873    | 73,314       | 360                  | 1816,22    | 1,032       | 1874,34           | 1949,57    | 0,12       |
| 13                                                                 | 6,20        | 6,00      | 1174,20      | 1174,80     | 665,00    | 509,80                        | 2,303            |          |           |             |           |              | 320                  | 1617,30    | 1,040       | 1681,99           |            | 0,13       |
| 14                                                                 | 6,22        | 6,00      | 1178,40      | 1178,80     | 667,10    | 511,70                        | 2,303            |          |           |             |           |              | 330                  | 1667,03    | 1,035       | 1725,38           |            | 0,14       |
| 15                                                                 | 6,21        | 6,00      | 1175,30      | 1175,50     | 666,00    | 509,50                        | 2,307            | 2,304    | 2,383     | 3,297       | 16,865    | 80,452       | 310                  | 1567,57    | 1,037       | 1625,57           | 1677,65    | 0,13       |
| 16                                                                 | 6,20        | 6,50      | 1179,10      | 1179,20     | 665,40    | 513,80                        | 2,295            |          |           |             |           |              | 210                  | 1070,28    | 1,040       | 1113,09           |            | 0,15       |
| 17                                                                 | 6,18        | 6,50      | 1177,00      | 1176,80     | 663,90    | 512,90                        | 2,295            |          |           |             |           |              | 200                  | 1020,55    | 1,046       | 1067,50           |            | 0,17       |
| 18                                                                 | 6,21        | 6,50      | 1179,70      | 1179,70     | 665,30    | 514,40                        | 2,293            | 2,294    | 2,366     | 3,030       | 17,665    | 82,848       | 190                  | 970,82     | 1,037       | 1006,74           | 1062,44    | 0,17       |
| ESPECIFICACION                                                     |             | Mínimo    |              |             |           |                               |                  |          |           |             | 3,00      | 13,00        | 65,00                |            |             |                   | 1800,00    | 8,00       |
|                                                                    |             | Máximo    |              |             |           |                               |                  |          |           |             | 5,00      |              | 75,00                |            |             |                   |            | 14,00      |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 44 CURVAS DE DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL TAM.MAX. NOMINAL 3/4"



CONTENIDO C.A.=5.51% DENSIDAD=2.292gr/cm³ VACIOS=4 V.A.M.=74.84% V.A.F.=16.52% ESTABILIDAD=1814.35Lb FLUJO=11.87

Fuente: Elaboración Propia

### **3.4.-Influencia del agua en la resistencia al desgaste de las mezclas asfáltica**

#### **3.4.1.-Mezclas asfálticas acondicionadas a temperatura mínima**

##### **-Equipo y material**

-Refrigerador

-Termómetro

Las briquetas requieren de un previo acondicionamiento para la temperatura especificada considerando dos grupos de estudio:

##### **3.4.1.1.-Grupo húmedo temperatura mínima**

El requerimiento que deben cumplir estas probetas (12), además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas son sumergidas en agua durante este periodo de 65 días, las briquetas se retiraran cada 20 días del agua para ser ensayada.

Figura N°51 a) Mezclas asfálticas enumeradas b) Briquetas sumergidas en agua



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin ningún tipo de carga se registra el peso de la briqueta antes de ser sometida a un numero de 300 revoluciones y también después de finalizar el desgaste.

Figura N°52 a) Briquetas en la máquina de los Ángeles a) Briquetas desgastada

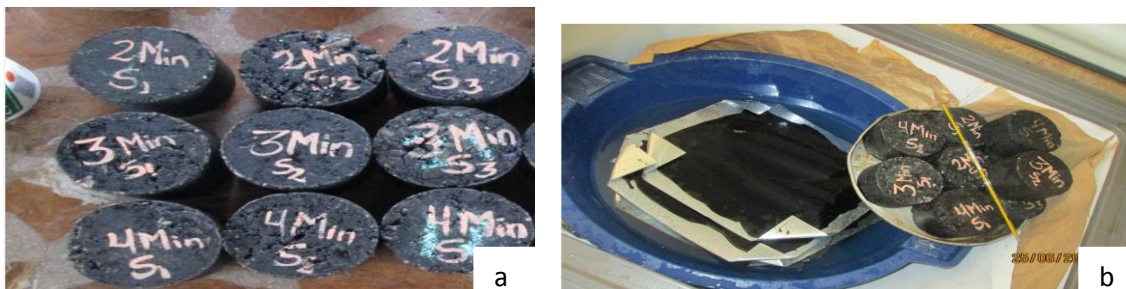


Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.1.2.-Grupo seco temperatura mínima

Para cada grupo se ensayan un total de 12 briquetas que han seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas son acondicionadas durante 65 días a temperatura mínima 0°C sin sumergir en agua durante este periodo, las briquetas se retiran cada 20 días del agua para ser ensayadas.

Figura N°53 a) Briquetas grupo seco b) Briquetas mínima temperatura



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin ningún tipo de carga se registra el peso de la briqueta antes de ser sometida a un numero de 300 revoluciones y también después de finalizar el desgaste.

Figura N°54 Grupo de briquetas desgastadas para la temperatura mínima



Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.1.3.-Datos y cálculos.-

**La resistencia se calcula con la siguiente formula:**

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100$$

$P_{\text{inicial}}$ =Peso total de la muestra inicial (gr)

$P_{\text{Final}}$ =Peso final después del desgaste (gr)

**-Índice conservación de la resistencia:**

$$Ic = \frac{\text{Resistencia grupo humedo}}{\text{Resistencia grupo seco}}$$

**Datos:**

**Ejemplo cálculo para 20 días**

**Porcentaje de desgaste al cántabro**

$$\% \text{ de desgaste } _1\text{seco} = \frac{1188.5\text{gr} - 1068.3\text{gr}}{1188.5\text{gr}} = 10.11\%$$

$$\% \text{ de desgaste } _2\text{seco} = \frac{1178\text{gr} - 1064.7\text{gr}}{1178\text{gr}} = 9.62\%$$

$$\% \text{ de desgaste } _3\text{seco} = \frac{1197.7\text{gr} - 1079.8\text{gr}}{1197.7\text{gr}} = 9.84\%$$

$$\% \text{ de desgaste } \text{PROMEDIOseco} = \frac{10.11 + 9.62 + 9.84}{3} = 9.86\%$$

$$\% \text{ de desgaste } _1\text{humedo} = \frac{1197.4\text{gr} - 1070.3\text{gr}}{1197.4\text{gr}} = 10.61\%$$

$$\% \text{ de desgaste } _2\text{humedo} = \frac{1188\text{gr} - 1068.4\text{gr}}{1188\text{gr}} = 10.07\%$$

$$\% \text{ de desgaste } _3\text{humedo} = \frac{1195.2\text{gr} - 1076.4\text{gr}}{1195.2\text{gr}} = 9.94\%$$

$$\% \text{ de desgaste } \text{PROMEDIOhumedo} = \frac{10.61 + 10.07 + 9.94}{3} = 10.21\%$$

**Índice de conservación de la resistencia a los 20 días:**

$$Ic = \frac{(100 - 10.21)}{(100 - 9.86)} = \frac{89.79}{90.14} = 99.61\%$$

Tabla N°44 Valores de resistencia al desgaste e índice de conservación temperatura mínima

| TIEMPO | CONDICION   | PESO INICIAL | PESO FINAL | DIFERENCIA | % DESGASTE | % DE DESGASTE PROMEDIO | % DE RESISTENCIA AL DESGASTE PROMEDIO | INDICE DE CONSERVACION DE RESISTENCIA |
|--------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Días   | Seco/Humedo | gr           | gr         | gr         | gr         | %                      | %                                     | %                                     |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1191,20      | 1083,60    | 107,60     | 9,03       | 9,11                   | 90,89                                 | 99,93                                 |
|        |             | 1190,70      | 1083,80    | 106,90     | 8,98       |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1188,30      | 1077,50    | 110,80     | 9,32       |                        |                                       |                                       |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1189,70      | 1078,60    | 111,10     | 9,34       | 9,18                   | 90,82                                 |                                       |
|        |             | 1191,70      | 1086,90    | 104,80     | 8,79       |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1195,60      | 1083,30    | 112,30     | 9,39       |                        |                                       |                                       |
| 20,00  | SECO        | 1188,50      | 1068,30    | 120,20     | 10,11      | 9,86                   | 90,14                                 | 99,61                                 |
|        |             | 1178,00      | 1064,70    | 113,30     | 9,62       |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1197,70      | 1079,80    | 117,90     | 9,84       |                        |                                       |                                       |
| 20,00  | HUMEDO      | 1197,40      | 1070,30    | 127,10     | 10,61      | 10,21                  | 89,79                                 |                                       |
|        |             | 1188,00      | 1068,40    | 119,60     | 10,07      |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1195,20      | 1076,40    | 118,80     | 9,94       |                        |                                       |                                       |
| 40,00  | SECO        | 1183,10      | 1066,30    | 116,80     | 9,87       | 9,49                   | 90,51                                 | 99,48                                 |
|        |             | 1185,50      | 1078,30    | 107,20     | 9,04       |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1189,10      | 1075,40    | 113,70     | 9,56       |                        |                                       |                                       |
| 40,00  | HUMEDO      | 1187,10      | 1067,30    | 119,80     | 10,09      | 9,96                   | 90,04                                 |                                       |
|        |             | 1189,80      | 1071,00    | 118,80     | 9,98       |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1189,30      | 1072,70    | 116,60     | 9,80       |                        |                                       |                                       |
| 65,00  | SECO        | 1191,50      | 1067,90    | 123,60     | 10,37      | 10,87                  | 89,13                                 | 98,32                                 |
|        |             | 1196,00      | 1060,10    | 135,90     | 11,36      |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1192,00      | 1062,40    | 129,60     | 10,87      |                        |                                       |                                       |
| 65,00  | HUMEDO      | 1180,40      | 1042,10    | 138,30     | 11,72      | 12,37                  | 87,63                                 |                                       |
|        |             | 1188,00      | 1031,30    | 156,70     | 13,19      |                        |                                       |                                       |
|        |             | 1190,40      | 1045,20    | 145,20     | 12,20      |                        |                                       |                                       |

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.1.4.-Resultados.-

Con los valores que se observan en Grafica N°5 para el porcentaje de desgaste tanto para el grupo húmedo como para el grupo seco sometidos a previo acondicionamiento a temperatura mínima podemos observar que las mezclas tienen un comportamiento inestable ya que en los dos grupos existe un proceso de recuperación de resistencia alcanzado tanto en el grupo húmedo y seco se presenta el en periodo de 40 días donde se reduce el porcentaje de desgaste, con lo que se puede observar que para los dos grupos en este periodo se presenta un valor considerado como despreciable.

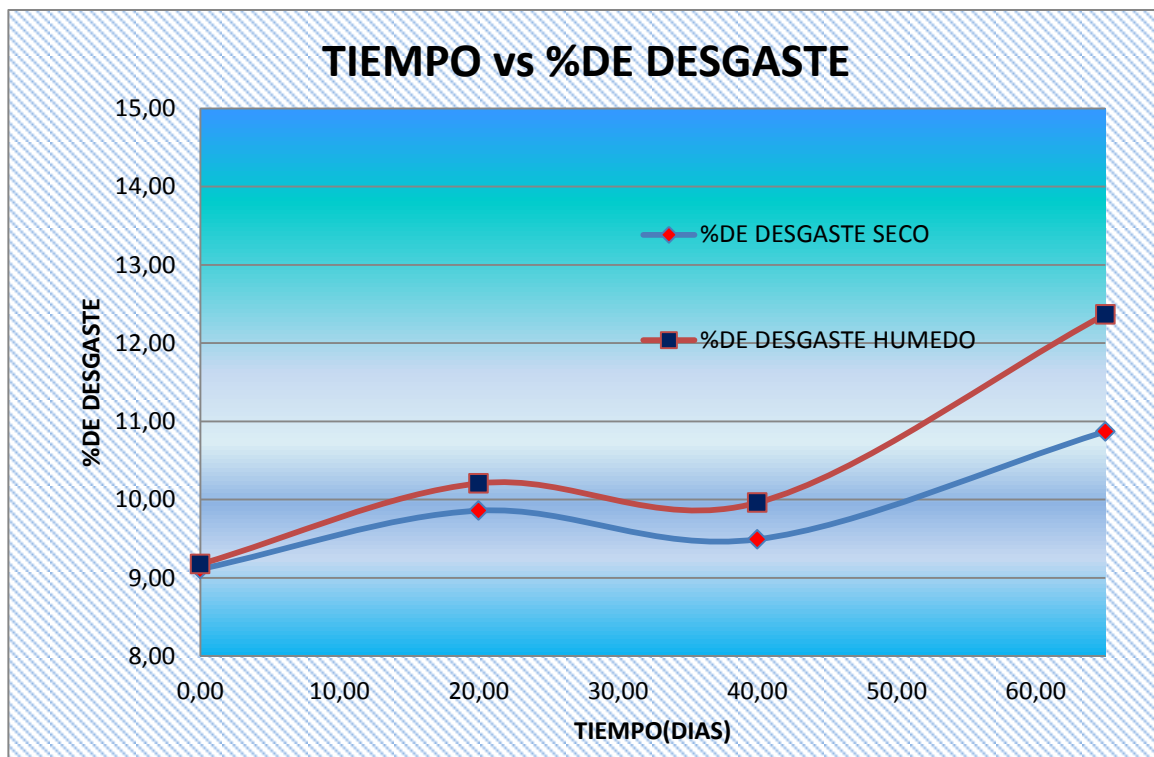
Para el índice de conservación de resistencia los valores son representados en la gráfica N° 6 se puede observar que la disminución de la resistencia para esta temperatura son valores mínimos, por lo cual las mezclas asfálticas no sufre una gran disminución de resistencia cuando son expuestas a esta temperatura en el agua .

**Tabla N°45 Valores de % de desgaste grupo húmedo y seco temperatura mínima**

| <b>TIEMPO</b> | <b>%DE<br/>DESGASTE<br/>HUMEDO</b> | <b>%DE<br/>DESGASTE<br/>SECO</b> |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 0,00          | 9,18                               | 9,11                             |
| 20,00         | 10,21                              | 9,86                             |
| 40,00         | 9,96                               | 9,49                             |
| 65,00         | 12,37                              | 10,87                            |

Fuente: Elaboración Propia

**Grafica N°5 % De desgaste temperatura mínima grupo seco y húmedo**



Fuente: Elaboración Propia

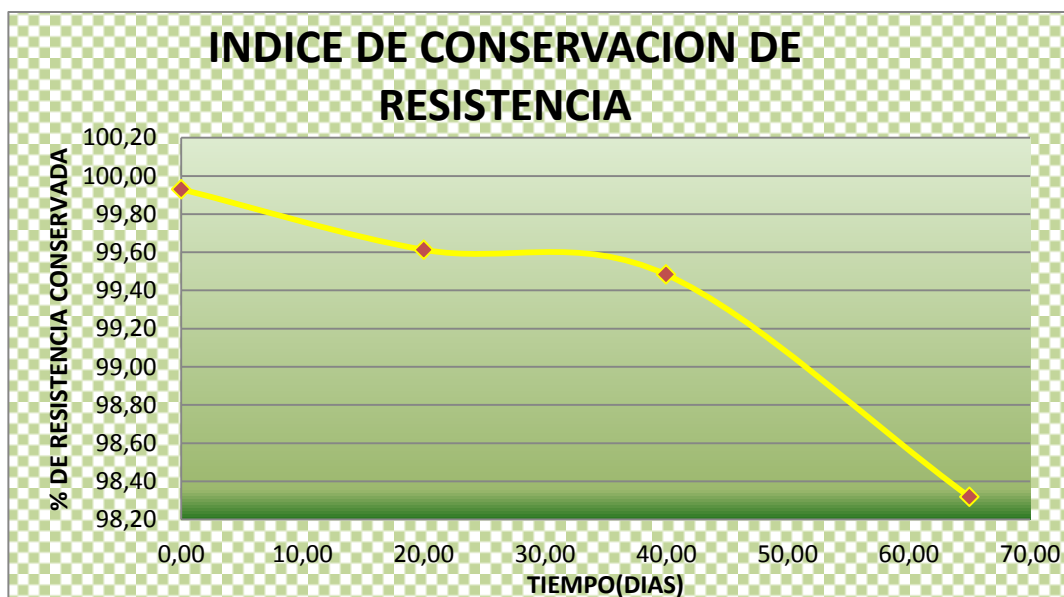
-Indice de resistencia conservada grupo temperatura mínima

**Tabla N°46 Indice de conservación de resistencia**

| TIEMPO<br>Días | INDICE DE CONSERVACION DE RESISTENCIA<br>% |
|----------------|--------------------------------------------|
| 0,00           | 99,93%                                     |
| 20,00          | 99,61%                                     |
| 40,00          | 99,48%                                     |
| 65,00          | 98,32%                                     |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°6 Tiempo vs % de resistencia conservada temperatura mínima



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.-Mezclas asfálticas acondicionadas a temperatura media

#### 3.4.2.1.-Grupo húmedo temperatura media

El requerimiento que deben cumplir estas probetas (12), además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas serán acondicionadas durante 65 días a temperatura media de 17 °C sumergidas en agua durante este periodo, las briquetas se retiraran cada 20 días del agua para ser ensayada.

Figura N°55 Briquetas sumergidas en agua a temperatura media 17°C



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin ningún tipo de carga se registra el peso de la briqueta antes de ser sometida a un numero de 300 revoluciones y también después de finalizar el degaste.

#### **3.4.2.2.-Grupo seco temperatura media**

El requerimiento que deben cumplir estas probetas (12), además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas son acondicionadas durante 65 días a temperatura media 17°C aproximadamente sin sumergir en agua durante este periodo, las briquetas se retiraran cada 20 días del agua para ser ensayada.

Figura N°56 Briquetas grupo seco enumeradas para cada etapa a temperatura media 17°C



Fuente: Elaboración Propia

Se prosigue con el paso de anotar el peso de cada probeta antes de introducirla a la máquina de Los Ángeles y luego nuevamente al finalizar la prueba.

Figura N°57 Grupo seco y Húmedo a temperatura media



Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.2.3.-Datos y cálculos.-

El cálculo se realiza de la misma manera que para la temperatura mínima

Tabla N°47 Valores de índice de conservación de resistencia y resistencia al desgaste  
temperatura Media

| TIEMPO | CONDICION   | PESO INICIAL | PESO FINAL | DIFERENCIA | %DESGASTE | % DE DESGASTE<br>PROMEDIO | RESISTENCIA AL<br>DESGASTE<br>PROMEDIO | INDICE DE<br>CONSERVACION<br>DE RESISTENCIA |  |
|--------|-------------|--------------|------------|------------|-----------|---------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|--|
| Días   | Seco/Húmedo | gr           | gr         | gr         | gr        | %                         |                                        | %                                           |  |
|        |             | A            | B          | C=A-B      | D=C/A*100 | E                         | F=100-E                                |                                             |  |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1188,40      | 1087,00    | 101,40     | 8,53      | 8,15                      | 91,85                                  | 99,77                                       |  |
|        |             | 1192,00      | 1087,80    | 104,20     | 8,74      |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1187,00      | 1101,70    | 85,30      | 7,19      |                           |                                        |                                             |  |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1201,00      | 1084,50    | 116,50     | 9,70      | 8,37                      | 91,63                                  |                                             |  |
|        |             | 1179,90      | 1098,40    | 81,50      | 6,91      |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1185,40      | 1084,70    | 100,70     | 8,50      |                           |                                        |                                             |  |
| 20,00  | SECO        | 1181,00      | 1081,90    | 99,10      | 8,39      | 8,88                      | 91,12                                  | 95,20                                       |  |
|        |             | 1189,10      | 1076,80    | 112,30     | 9,44      |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1187,00      | 1082,40    | 104,60     | 8,81      |                           |                                        |                                             |  |
| 20,00  | HUMEDO      | 1197,00      | 1041,40    | 155,60     | 13,00     | 13,26                     | 86,74                                  |                                             |  |
|        |             | 1180,30      | 1030,50    | 149,80     | 12,69     |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1184,70      | 1017,80    | 166,90     | 14,09     |                           |                                        |                                             |  |
| 40,00  | SECO        | 1190,00      | 1072,90    | 117,10     | 9,84      | 9,99                      | 90,01                                  | 93,87                                       |  |
|        |             | 1180,30      | 1062,40    | 117,90     | 9,99      |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1187,30      | 1066,90    | 120,40     | 10,14     |                           |                                        |                                             |  |
| 40,00  | HUMEDO      | 1186,00      | 998,90     | 187,10     | 15,78     | 15,51                     | 84,49                                  |                                             |  |
|        |             | 1183,10      | 1001,30    | 181,80     | 15,37     |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1186,10      | 1003,70    | 182,40     | 15,38     |                           |                                        |                                             |  |
| 65,00  | SECO        | 1177,40      | 1055,20    | 122,20     | 10,38     | 10,09                     | 89,91                                  | 89,89                                       |  |
|        |             | 1195,80      | 1079,00    | 116,80     | 9,77      |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1180,20      | 1060,80    | 119,40     | 10,12     |                           |                                        |                                             |  |
| 65,00  | HUMEDO      | 1190,00      | 972,30     | 217,70     | 18,29     | 19,18                     | 80,82                                  |                                             |  |
|        |             | 1186,90      | 960,30     | 226,60     | 19,09     |                           |                                        |                                             |  |
|        |             | 1189,70      | 950,10     | 239,60     | 20,14     |                           |                                        |                                             |  |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2.4.-Resultados.-

Con los valores que se observan en Grafica N°7 para el porcentaje de desgaste tanto para el grupo húmedo como para el grupo seco sometidos a previo acondicionamiento a temperatura media 17°C que existe una variación considerable en relación del grupo húmedo con el grupo seco ya que en el grupo seco no tiene un incremento de pérdida por desgaste considerable si comparamos el valor que tenía sin ningún acondicionamiento con el valor que se tiene a los 65 días después de estar a temperatura media sin sumersión, se observa todo lo contrario en el caso del grupo húmedo ya que si comparamos el valor inicial con el que se obtiene después de los 65 días de saturación en agua podemos apreciar una variación de aproximadamente de más del 10% ,si consideramos que en el ensayo no se tuvo ningún tipo de carga podemos ver que el agua por si sola si tiene un efecto sobre el deterioro de las mezclas asfálticas compactadas a pesar de que el ligante es un material impermeable y la mezcla contiene un porcentaje de vacíos mínimo se presenta el deterioro.

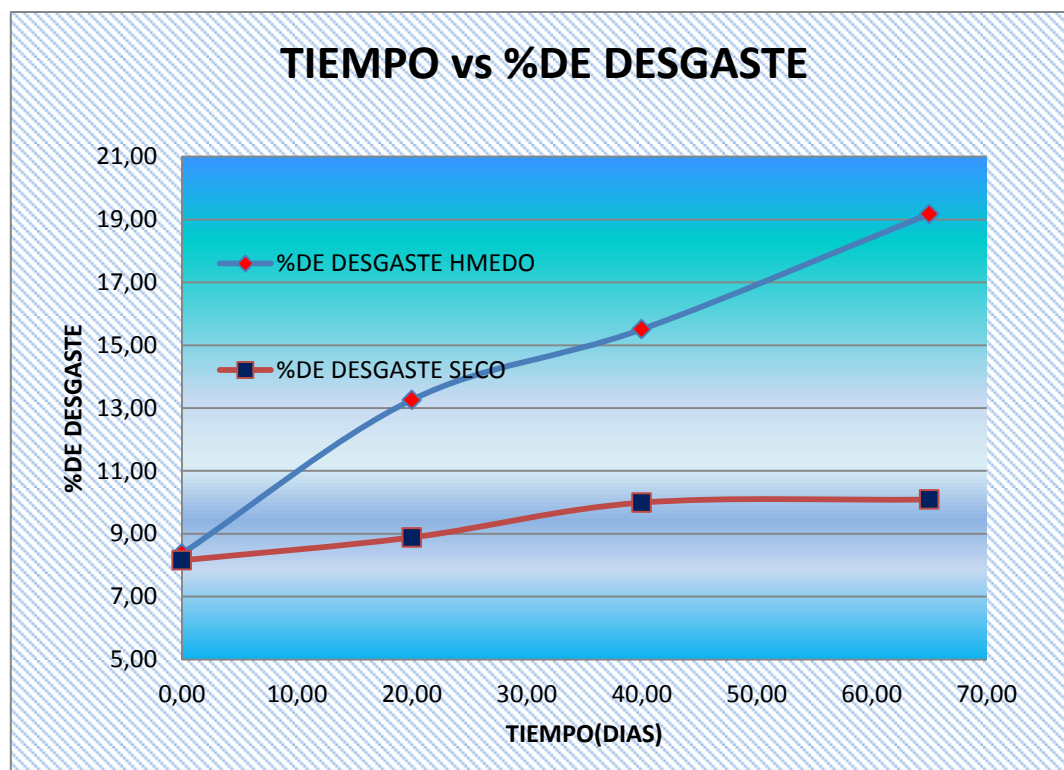
Para el índice de conservación de resistencia se observa la gráfica N°8 y podemos concluir que este tiene un comportamiento decreciente con tendencia definida y que existe una pérdida de conservación de resistencia por influencia del agua del y la temperatura de 10%.

**Tabla N°48 Valores de % de desgaste grupo húmedo y seco temp. Media**

| TIEMPO(DIAS) | %DESGASTE HUMEDO | %DESGASTE SECO |
|--------------|------------------|----------------|
| 0,00         | 8,37             | 8,15           |
| 20,00        | 13,26            | 8,88           |
| 40,00        | 15,51            | 9,99           |
| 65,00        | 19,18            | 10,09          |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N° 7 Tiempo vs porcentaje de desgaste temperatura media



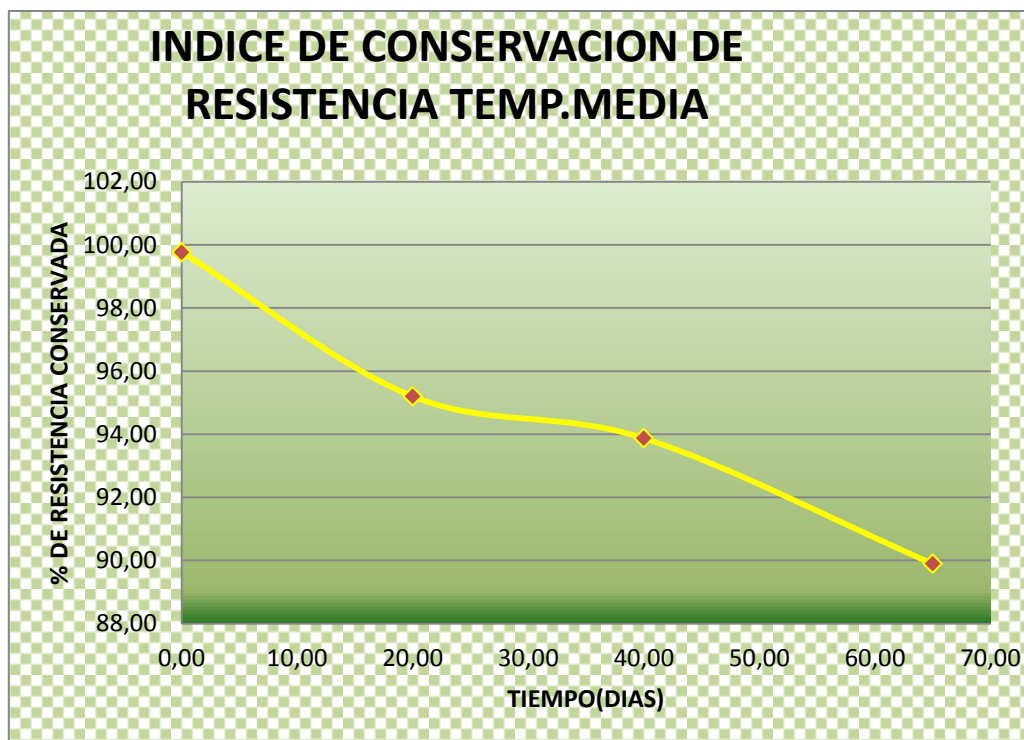
Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 49 Indicé de conservación de resistencia en función del tiempo y temperatura. Media

| TIEMPO (DIAS) | INDICE DE CONSERVACION DE RESISTENCIA |
|---------------|---------------------------------------|
| 0,00          | 99,77                                 |
| 20,00         | 95,20                                 |
| 40,00         | 93,87                                 |
| 65,00         | 89,89                                 |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°8 Indice de conservación de resistencia Temperatura Media



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.3.-Mezclas asfálticas acondicionadas a temperatura máxima

#### -Equipo y material

-Horno

- termómetro

-Fuentes

#### 3.4.3.1.-Grupo húmedo temperatura máxima

El requerimiento que deben cumplir estas probetas (12), además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas son acondicionadas durante 65 días a temperatura máxima de 40 °C sumergidas en agua durante este periodo, se retiran cada 20 días del agua para ser ensayada.

Figura N°58 a) Mezclas asfálticas para cada periodo b) Briquetas sumergidas en agua y sometidas a temperatura máxima 40°C



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin ningún tipo de carga se registra el peso de la briqueta antes de ser sometida a un numero de 300 revoluciones y también después de finalizar el desgaste.

#### **3.4.2.2.-Grupo seco temperatura máxima**

El requerimiento que deben cumplir estas probetas (12), además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, las briquetas deben ser acondicionadas durante 65 días a temperatura máxima 40°C sin sumergir en agua durante este periodo, las briquetas se retiraran cada 20 días del agua para ser ensayada.

Figura N°59 a) Briquetas grupo seco b) Briquetas grupo seco expuestas a máxima temperatura



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin ningún tipo de carga se registra el peso de la briqueta antes de ser sometida a un numero de 300 revoluciones y también después de finalizar el desgaste.

#### 3.4.1.3.-Datos y cálculos.-

Los procesamientos de los datos y el cálculo se lo realizan de la misma manera que para la temperatura mínima como se indica en la tabla N°50

Tabla N°50 Valores de resistencia al desgaste e índice de conservación de resistencia según tiempo y temperatura máxima

| TIEMPO | CONDICION   | PESO INICIAL | PESO FINAL | DIFFERENCIA | %DESGASTE | %DESGASTE PROMEDIO | RESISTENCIA AL DESGASTE PROMEDIO | INDICE DE CONSERVACION DE RESISTENCIA |
|--------|-------------|--------------|------------|-------------|-----------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Días   | Seco/Húmedo | gr           | gr         | gr          | gr        | %                  |                                  | %                                     |
|        |             | A            | B          | C=A-B       | D=C/A*100 | E                  | F=100-E                          | G                                     |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1187,10      | 1082,80    | 104,30      | 8,79      | 8,55               | 91,45                            | 99,99                                 |
|        |             | 1184,20      | 1082,30    | 101,90      | 8,60      |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1198,50      | 1099,50    | 99,00       | 8,26      |                    |                                  |                                       |
| 0,00   | ORIGINAL    | 1181,10      | 1083,70    | 97,40       | 8,25      | 8,56               | 91,44                            |                                       |
|        |             | 1178,90      | 1078,60    | 100,30      | 8,51      |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1198,00      | 1091,10    | 106,90      | 8,92      |                    |                                  |                                       |
| 20,00  | SECO        | 1199,10      | 1054,40    | 144,70      | 12,07     | 11,51              | 88,49                            | 95,07                                 |
|        |             | 1179,00      | 1043,00    | 136,00      | 11,54     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1199,40      | 1068,40    | 131,00      | 10,92     |                    |                                  |                                       |
| 20,00  | HUMEDO      | 1194,00      | 1002,90    | 191,10      | 16,01     | 15,87              | 84,13                            |                                       |
|        |             | 1190,80      | 1003,80    | 187,00      | 15,70     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1201,30      | 1010,10    | 191,20      | 15,92     |                    |                                  |                                       |
| 40,00  | SECO        | 1190,10      | 1032,60    | 157,50      | 13,23     | 13,38              | 86,62                            | 87,40                                 |
|        |             | 1178,80      | 1023,30    | 155,50      | 13,19     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1189,70      | 1026,70    | 163,00      | 13,70     |                    |                                  |                                       |
| 40,00  | HUMEDO      | 1193,00      | 906,50     | 286,50      | 24,02     | 24,29              | 75,71                            |                                       |
|        |             | 1196,70      | 908,40     | 288,30      | 24,09     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1201,10      | 903,70     | 297,40      | 24,76     |                    |                                  |                                       |
| 65,00  | SECO        | 1188,00      | 1011,00    | 177,00      | 14,90     | 14,75              | 85,25                            | 60,31                                 |
|        |             | 1184,20      | 1003,40    | 180,80      | 15,27     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1181,80      | 1015,40    | 166,40      | 14,08     |                    |                                  |                                       |
| 65,00  | HUMEDO      | 1183,50      | 635,40     | 548,10      | 46,31     | 48,58              | 51,42                            |                                       |
|        |             | 1188,00      | 581,60     | 606,40      | 51,04     |                    |                                  |                                       |
|        |             | 1181,80      | 609,90     | 571,90      | 48,39     |                    |                                  |                                       |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1.4.-Resultados.-

Con los valores que se observan en Grafica N° 9 para el porcentaje de desgaste tanto para el grupo húmedo como para el grupo seco sometidos a previo acondicionamiento a temperatura máxima ,existe una gran diferencia entre el porcentaje de desgaste de la muestra desgastada al principio con la muestra que es desgastada después de 65 días existe un incremento en el porcentaje de desgaste de aproximadamente el 40% esto ocurre en el grupo húmedo, mientras que el grupo seco la variación de perdida por desgaste aumenta en comparación con las otras temperaturas estudiadas en seco anteriormente.

En el grafico N°10 se puede observar que el índice de conservación de resistencia decrece de manera notable siendo la temperatura máxima la que más afecta las mezclas asfálticas después del periodo de tiempo determinado ya que pierde más de un 40% de su resistencia conservando su resistencia solo un 60%.

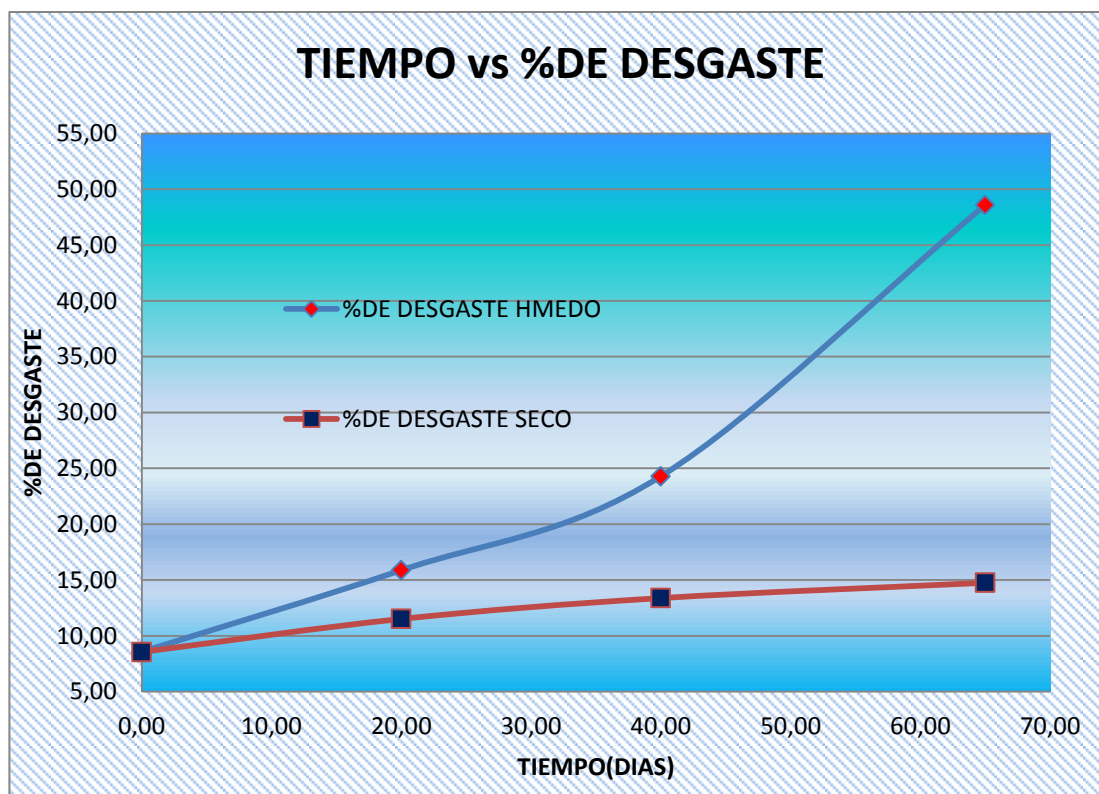
Los resultados se muestran en las siguientes tablas

Tabla N°51 % de desgaste para temperatura máxima grupo húmedo y seco

| <b>TIEMPO(DIAS)</b> | <b>%DESGASTE<br/>HUMEDO</b> | <b>%DESGASTE<br/>SECO</b> |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>0,00</b>         | 8,56                        | 8,55                      |
| <b>20,00</b>        | 15,87                       | 11,51                     |
| <b>40,00</b>        | 24,29                       | 13,38                     |
| <b>65,00</b>        | 48,58                       | 14,75                     |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°9 Tiempo vs porcentaje de desgaste temperatura maxima



Fuente: Elaboración Propia

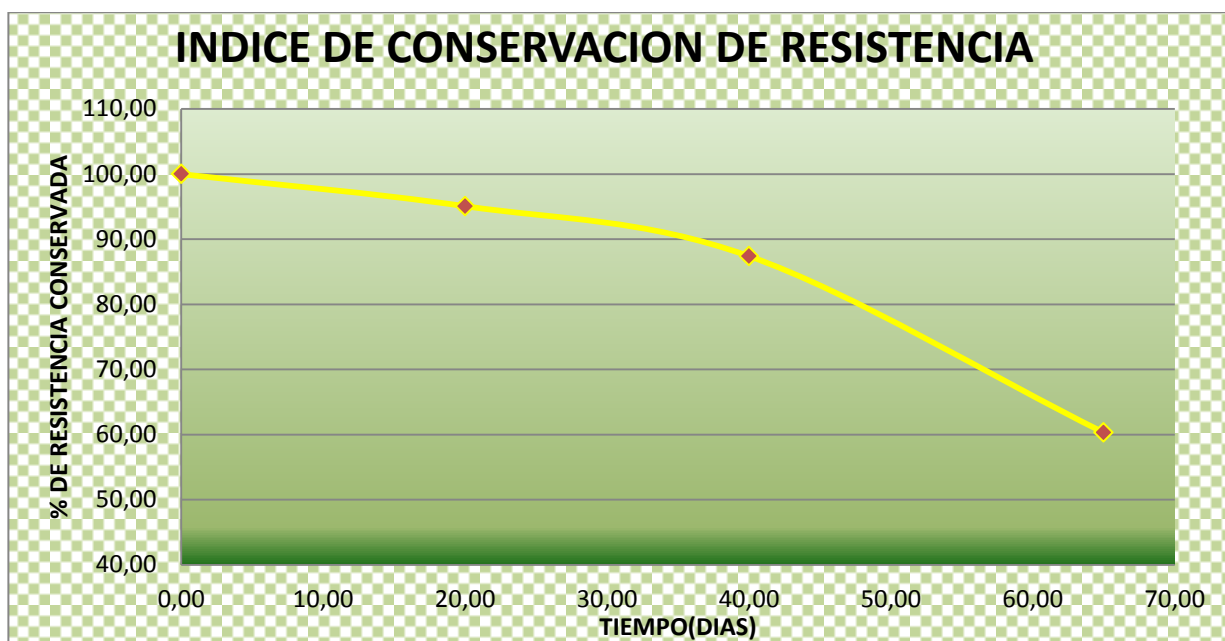
***Índice de conservación de resistencia***

Tabla N° 52 Indicé de conservación de resistencia temperatura Máxima

| TIEMPO<br>DIAS | INDICE DE CONSERVACION DE RESISTENCIA |
|----------------|---------------------------------------|
| 0,00           | 99,99                                 |
| 20,00          | 95,07                                 |
| 40,00          | 87,40                                 |
| 65,00          | 60,31                                 |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°10 Índice de conservación de resistencia en función del tiempo y temperatura máxima



Fuente: Elaboración Propia

#### **3.4.4.-Resumen general de resultados de los tres grupos acondicionados**

Realizando un análisis general comparando los porcentajes de índice de resistencia conservada mostrados en la gráfica N° 11 podemos decir que la temperatura que provoca mayor pérdida de resistencia después del proceso de sumersión y comparando con los datos obtenidos de las briquetas no sumergidas es la temperatura máxima producto de la acción de la misma y la sensibilidad que tienen las mezclas asfálticas al agua ya que a pesar de ser elaboradas con ligante asfáltico que es impermeable está demostrado que este modifica sus propiedades en presencia de agua ,si también consideramos que la mayor parte de su composición es agregado que también son sensible al agua y tiene capacidad de absorber la misma, la temperatura media afecta perdiendo un 10% aproximadamente la resistencia, la temperatura mínima manifiesta un comportamiento variado en relación a las otras temperaturas debido a que hace que aumente la resistencia y posteriormente en función del tiempo vuelva a disminuir.

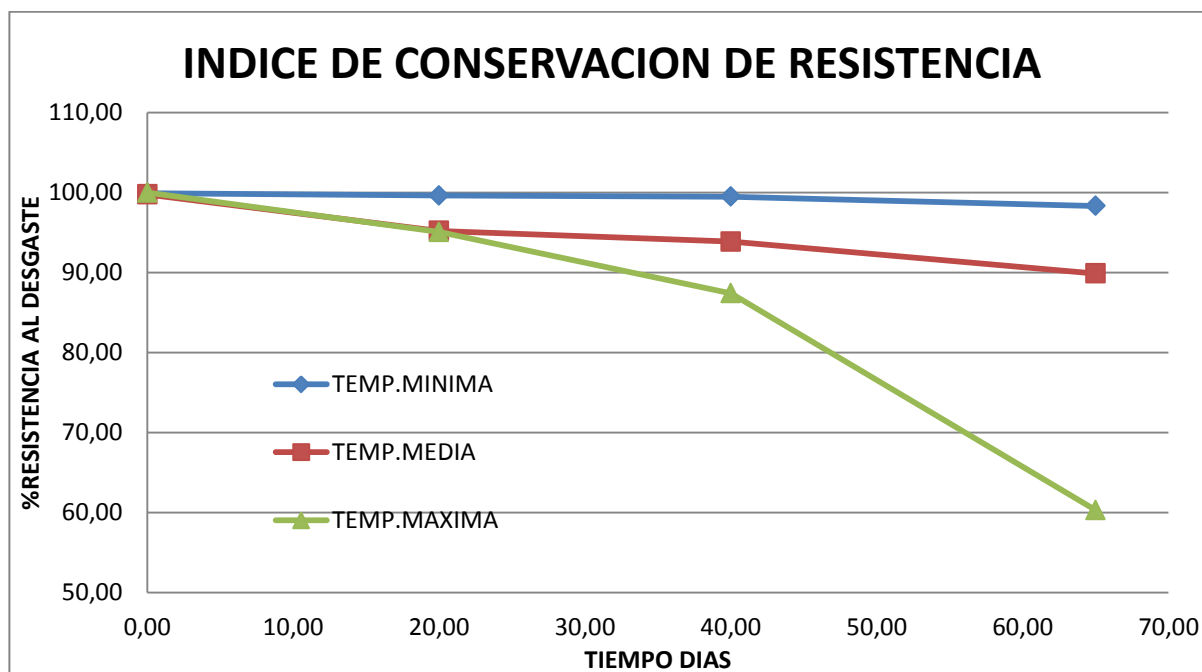
-Índice de resistencia conservada.-

Tabla N°53 Índice de resistencia conservada para las tres temperaturas

| %RESISTENCIA CONSERVADA |             |            |             |
|-------------------------|-------------|------------|-------------|
| TIEMPO                  | TEMP.MINIMA | TEMP.MEDIA | TEMP.MAXIMA |
| 0,00                    | 99,93       | 99,77      | 99,99       |
| 20,00                   | 99,61       | 95,20      | 95,07       |
| 40,00                   | 99,48       | 93,87      | 87,40       |
| 65,00                   | 98,32       | 89,89      | 60,31       |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°11 Índice de resistencia conseravada de las tres temepraturas



Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.-Influencia del agua sobre la densidad de las mezclas asfálticas

#### 3.5.1.-Variacion de la densidad según la temperatura de acondicionamiento

La densidad se la calcula con la siguiente formula:

$$G_{mb} = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

Gmb=gravedad especifica de la mezcla compactada.

W<sub>MUESTRA</sub>=Peso de la muestra seca al aire.

W<sub>sss</sub>=peso de la muestra superficialmente seca.

W<sub>sumergido</sub>=peso de la muestra sumergida.

Se realiza el ensayo según la metodología AASHTO T 166-05 ,antes de ser acondicionadas las briquetas para realizar posteriormente una comparación ,luego se procede a acondicionar según la temperatura especificada después de que las briquetas hayan sido acondicionas se procede a realizar nuevamente los ensayos para calcular los valores de la densidades correspondientes antes y después del acondicionamiento.

Se calcula cada una de las densidades correspondientes posteriormente calcular la variación que existe entre estas densidades antes y después del acondicionamiento.

Se calcula de la siguiente formula:

$$\begin{aligned} \% \text{ de perdida de densidad} &= \frac{Gmb \text{ inicial} - Gmb \text{ final}}{Gmb \text{ inicial}} * 100 \\ &= \frac{F - K}{F} * 100 \end{aligned}$$

Gmb<sub>inicial</sub>=Peso total de la muestra inicial antes del acondicionamiento (gr)

Gmb<sub>Final</sub>=Peso final después del acondicionamiento (gr)

Luego de efectuar el cálculo de perdida de densidad se procede a realizar los gráficos correspondientes en función del tiempo y cada una de las temperaturas

| TABLA N°54 VARIACION DE LA DENSIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO Y TEMPERATURA MINIMA |              |                                |        |                |                           |         |                   |                                        |                |                           |         |                   |                                |          |  |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------|----------------|---------------------------|---------|-------------------|----------------------------------------|----------------|---------------------------|---------|-------------------|--------------------------------|----------|--|
| N° Probeta                                                                     | NOMENCLATURA | DENSIDAD SIN ACONDICIONAMIENTO |        |                |                           |         |                   | DENSIDAD DESPUES DEL ACONDICIONAMIENTO |                |                           |         |                   | VALORES DE PERDIDA DE DENSIDAD |          |  |
|                                                                                |              | % Asfalto                      | Seco   | Sat. Sup. Seca | Sumen-<br>tida en<br>Agua | Probeta | Densid-<br>ad Rea | Seco                                   | Sat. Sup. Seca | Sumen-<br>tida en<br>Agua | Probeta | Densid-<br>ad Rea | %PERDIDA DE DENSIDAD           | PROMEDIO |  |
|                                                                                |              | %                              | grs.   | grs.           | grs.                      | CC      | Grs./cm3          | grs.                                   | grs.           | grs.                      | CC      | Grs./cm3          |                                |          |  |
|                                                                                |              | A                              | B      | C              | D                         | E=C-D   | F=C/E             | G                                      | H              | I                         | J=H-I   | K=H/J             | M=(F-K)/F*100                  | %        |  |
| 1                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1191,2 | 1193,1         | 673,8                     | 519,3   | 2,298             | 1191,2                                 | 1193,100       | 673,8                     | 519,300 | 2,298             | 0,000                          |          |  |
| 2                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1190,7 | 1191,9         | 672,6                     | 519,3   | 2,295             | 1190,7                                 | 1191,900       | 672,6                     | 519,300 | 2,295             | 0,000                          |          |  |
| 3                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1188,3 | 1190,4         | 671,4                     | 519,0   | 2,294             | 1188,3                                 | 1190,400       | 671,4                     | 519,000 | 2,294             | 0,000                          |          |  |
| 4                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1189,7 | 1191,3         | 672,0                     | 519,3   | 2,294             | 1189,7                                 | 1191,300       | 672,0                     | 519,300 | 2,294             | 0,000                          |          |  |
| 5                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1191,7 | 1193,3         | 674,3                     | 519,0   | 2,299             | 1191,7                                 | 1193,300       | 674,3                     | 519,000 | 2,299             | 0,000                          |          |  |
| 6                                                                              | 0,00         | 5,50                           | 1195,6 | 1198,0         | 676,5                     | 521,5   | 2,297             | 1195,6                                 | 1198,000       | 676,5                     | 521,500 | 2,297             | 0,000                          |          |  |
| 7                                                                              | 2MIN.SECO    | 5,50                           | 1189,0 | 1191,6         | 671,9                     | 519,7   | 2,293             | 1188,5                                 | 1190,200       | 670,4                     | 519,800 | 2,290             | 0,137                          | 0,117    |  |
| 8                                                                              | 2MIN.SECO    | 5,50                           | 1178,4 | 1180,4         | 665,4                     | 515,0   | 2,292             | 1178,0                                 | 1180,300       | 665,0                     | 515,300 | 2,291             | 0,067                          |          |  |
| 9                                                                              | 2MIN.SECO    | 5,50                           | 1198,2 | 1200,3         | 677,5                     | 522,8   | 2,296             | 1197,7                                 | 1199,000       | 676,0                     | 523,000 | 2,293             | 0,147                          |          |  |
| 10                                                                             | 2MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1197,1 | 1199,1         | 677,1                     | 522,0   | 2,297             | 1197,4                                 | 1198,800       | 676,2                     | 522,600 | 2,294             | 0,140                          | 0,132    |  |
| 11                                                                             | 2MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1187,6 | 1190,2         | 671,0                     | 519,2   | 2,292             | 1188,0                                 | 1189,400       | 670,0                     | 519,400 | 2,290             | 0,106                          |          |  |
| 12                                                                             | 2MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1195,0 | 1197,4         | 676,3                     | 521,1   | 2,298             | 1195,2                                 | 1197,200       | 675,4                     | 521,800 | 2,294             | 0,151                          |          |  |
| 13                                                                             | 3MIN.SECO    | 5,50                           | 1183,4 | 1185,0         | 668,2                     | 516,8   | 2,293             | 1183,1                                 | 1185,400       | 667,4                     | 518,000 | 2,288             | 0,198                          | 0,129    |  |
| 14                                                                             | 3MIN.SECO    | 5,50                           | 1182,7 | 1184,1         | 667,8                     | 516,3   | 2,293             | 1185,5                                 | 1187,000       | 669,2                     | 517,800 | 2,292             | 0,045                          |          |  |
| 15                                                                             | 3MIN.SECO    | 5,50                           | 1189,4 | 1191,5         | 672,3                     | 519,2   | 2,295             | 1189,1                                 | 1192,300       | 672,0                     | 520,300 | 2,292             | 0,144                          |          |  |
| 16                                                                             | 3MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1186,7 | 1187,9         | 670,9                     | 517,0   | 2,298             | 1187,1                                 | 1188,400       | 670,2                     | 518,200 | 2,293             | 0,190                          | 0,151    |  |
| 17                                                                             | 3MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1189,2 | 1191,0         | 672,0                     | 519,0   | 2,295             | 1189,8                                 | 1191,300       | 671,4                     | 519,900 | 2,291             | 0,148                          |          |  |
| 18                                                                             | 3MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1190,1 | 1191,5         | 672,4                     | 519,1   | 2,295             | 1189,3                                 | 1190,800       | 671,4                     | 519,400 | 2,293             | 0,116                          |          |  |
| 19                                                                             | 4MIN.SECO    | 5,50                           | 1192,3 | 1193,8         | 673,4                     | 520,4   | 2,294             | 1191,5                                 | 1193,000       | 672,8                     | 520,200 | 2,293             | 0,029                          | 0,053    |  |
| 20                                                                             | 4MIN.SECO    | 5,50                           | 1196,2 | 1197,8         | 675,3                     | 522,5   | 2,292             | 1196,0                                 | 1198,100       | 675,0                     | 523,100 | 2,290             | 0,090                          |          |  |
| 21                                                                             | 4MIN.SECO    | 5,50                           | 1192,8 | 1194,6         | 674,3                     | 520,3   | 2,296             | 1192,0                                 | 1193,900       | 673,7                     | 520,200 | 2,295             | 0,039                          |          |  |
| 22                                                                             | 4MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1179,8 | 1181,2         | 666,8                     | 514,4   | 2,296             | 1180,4                                 | 1182,700       | 667,0                     | 515,700 | 2,293             | 0,125                          | 0,084    |  |
| 23                                                                             | 4MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1187,4 | 1189,3         | 671,0                     | 518,3   | 2,295             | 1188,0                                 | 1190,300       | 671,5                     | 518,800 | 2,294             | 0,012                          |          |  |
| 24                                                                             | 4MIN.HUMEDO  | 5,50                           | 1189,3 | 1190,6         | 672,0                     | 518,6   | 2,296             | 1190,4                                 | 1190,600       | 671,4                     | 519,200 | 2,293             | 0,116                          |          |  |

Fuente : Elaboracion propia

| TABLA N°55 VARIACION DE LA DENSIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO Y TEMPERATURA MEDIA |              |                                |        |                |                   |         |               |                                        |                |                   |         |               |                                |          |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------|----------------|-------------------|---------|---------------|----------------------------------------|----------------|-------------------|---------|---------------|--------------------------------|----------|
| N° Probeta                                                                    | NOMENCLATURA | DENSIDAD SIN ACONDICIONAMIENTO |        |                |                   |         |               | DENSIDAD DESPUES DEL ACONDICIONAMIENTO |                |                   |         |               | VALORES DE PERDIDA DE DENSIDAD |          |
|                                                                               |              | % Asfalto                      | Seco   | Sat. Sup. Seca | Sumergida en Agua | Probeta | Densidad Real | Seco                                   | Sat. Sup. Seca | Sumergida en Agua | Probeta | Densidad Real | %VARIACION DE DENSIDAD         | PROMEDIO |
|                                                                               |              | %                              | grs.   | grs.           | grs.              | CC      | Grs./cm3      | grs.                                   | grs.           | grs.              | CC      | Grs./cm3      |                                |          |
|                                                                               |              | A                              | B      | C              | D                 | E=C-D   | F=C/E         | G                                      | H              | I                 | J=H-I   | K=H/J         |                                |          |
| 1                                                                             | 0            | 5,51                           | 1188,4 | 1190,2         | 672,1             | 518,1   | 2,297         | 1188,4                                 | 1190,2         | 672,1             | 518,100 | 2,297         | 0,000                          |          |
| 2                                                                             | 0            | 5,51                           | 1192,0 | 1194,0         | 674,4             | 519,6   | 2,298         | 1192,0                                 | 1194,0         | 674,4             | 519,600 | 2,298         | 0,000                          |          |
| 3                                                                             | 0            | 5,51                           | 1187,0 | 1188,2         | 671,5             | 516,7   | 2,300         | 1187,0                                 | 1188,2         | 671,5             | 516,700 | 2,300         | 0,000                          |          |
| 4                                                                             | 0            | 5,51                           | 1201,0 | 1202,3         | 679,1             | 523,2   | 2,298         | 1201,0                                 | 1202,3         | 679,1             | 523,200 | 2,298         | 0,000                          |          |
| 5                                                                             | 0            | 5,51                           | 1179,9 | 1181,8         | 667,2             | 514,6   | 2,297         | 1179,9                                 | 1181,8         | 667,2             | 514,600 | 2,297         | 0,000                          |          |
| 6                                                                             | 0            | 5,51                           | 1185,4 | 1186,2         | 670,4             | 515,8   | 2,300         | 1185,4                                 | 1186,2         | 670,4             | 515,800 | 2,300         | 0,000                          |          |
| 7                                                                             | 2MED.SECO    | 5,51                           | 1181,9 | 1182,7         | 668,1             | 514,6   | 2,298         | 1181,0                                 | 1183,100       | 667,2             | 515,900 | 2,293         | 0,218                          | 0,196    |
| 8                                                                             | 2MED.SECO    | 5,51                           | 1184,7 | 1185,4         | 667,8             | 517,6   | 2,290         | 1189,1                                 | 1190,200       | 670,0             | 520,200 | 2,288         | 0,097                          |          |
| 9                                                                             | 2MED.SECO    | 5,51                           | 1188,4 | 1189,8         | 671,4             | 518,4   | 2,295         | 1187,0                                 | 1190,000       | 670,1             | 519,900 | 2,289         | 0,272                          |          |
| 10                                                                            | 2MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1196,4 | 1197,4         | 676,1             | 521,3   | 2,297         | 1197,0                                 | 1198,200       | 676,4             | 521,800 | 2,296         | 0,029                          | 0,110    |
| 11                                                                            | 2MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1179,7 | 1181,4         | 667,0             | 514,4   | 2,297         | 1180,3                                 | 1181,700       | 666,8             | 514,900 | 2,295         | 0,072                          |          |
| 12                                                                            | 2MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1183,8 | 1185,5         | 669,9             | 515,6   | 2,299         | 1184,7                                 | 1186,000       | 669,0             | 517,000 | 2,294         | 0,229                          |          |
| 13                                                                            | 3MED.SECO    | 5,51                           | 1190,8 | 1193,3         | 673,2             | 520,1   | 2,294         | 1190,0                                 | 1192,000       | 672,1             | 519,900 | 2,293         | 0,071                          | 0,202    |
| 14                                                                            | 3MED.SECO    | 5,51                           | 1182,9 | 1183,9         | 668,4             | 515,5   | 2,297         | 1180,3                                 | 1184,000       | 666,4             | 517,600 | 2,287         | 0,397                          |          |
| 15                                                                            | 3MED.SECO    | 5,51                           | 1188,9 | 1189,9         | 672,0             | 517,9   | 2,298         | 1187,3                                 | 1189,400       | 671,0             | 518,400 | 2,294         | 0,138                          |          |
| 16                                                                            | 3MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1186,0 | 1188,0         | 670,1             | 517,9   | 2,294         | 1186,0                                 | 1187,400       | 669,4             | 518,000 | 2,292         | 0,070                          | 0,102    |
| 17                                                                            | 3MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1181,3 | 1183,7         | 667,5             | 516,2   | 2,293         | 1183,1                                 | 1184,300       | 667,2             | 517,100 | 2,290         | 0,123                          |          |
| 18                                                                            | 3MED.HUMEDO  | 5,51                           | 1184,0 | 1186,0         | 669,8             | 516,2   | 2,298         | 1186,1                                 | 1187,400       | 670,0             | 517,400 | 2,295         | 0,114                          |          |
| 19                                                                            | 4MED.SECO    | 5,50                           | 1178,2 | 1181,0         | 666,3             | 514,7   | 2,295         | 1177,4                                 | 1179,000       | 664,7             | 514,300 | 2,292         | 0,092                          | 0,224    |
| 20                                                                            | 4MED.SECO    | 5,50                           | 1197,0 | 1201,0         | 677,8             | 523,2   | 2,295         | 1195,8                                 | 1197,300       | 674,1             | 523,200 | 2,288         | 0,308                          |          |
| 21                                                                            | 4MED.SECO    | 5,50                           | 1182,8 | 1186,0         | 669,0             | 517,0   | 2,294         | 1180,2                                 | 1183,000       | 665,9             | 517,100 | 2,288         | 0,272                          |          |
| 22                                                                            | 4MED.HUMEDO  | 5,50                           | 1187,9 | 1190,3         | 671,4             | 518,9   | 2,294         | 1190,0                                 | 1191,700       | 672,1             | 519,600 | 2,293         | 0,017                          | 0,039    |
| 23                                                                            | 4MED.HUMEDO  | 5,50                           | 1185,1 | 1187,7         | 669,7             | 518,0   | 2,293         | 1186,9                                 | 1189,000       | 670,0             | 519,000 | 2,291         | 0,083                          |          |
| 24                                                                            | 4MED.HUMEDO  | 5,50                           | 1187,0 | 1188,8         | 670,0             | 518,8   | 2,291         | 1189,7                                 | 1190,900       | 671,1             | 519,800 | 2,291         | 0,016                          |          |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA N°55 VARIACION DE LA DENSIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO Y TEMPERATURA MAXIMA

| N° Probeta | NOMENCLATURA | DENSIDAD SIN ACONDICIONAMIENTO |                |                   |         |               | DENSIDAD DESPUES DEL ACONDICIONAMIENTO |                |                   |         |               | VALORES DE PERDIDA DE DENSIDAD |          |
|------------|--------------|--------------------------------|----------------|-------------------|---------|---------------|----------------------------------------|----------------|-------------------|---------|---------------|--------------------------------|----------|
|            |              | Seco                           | Sat. Sup. Seca | Suma gida en agua | Probeta | Densidad Real | Seco                                   | Sat. Sup. Seca | Suma gida en Agua | Probeta | Densidad Real | %VARIACION DE DENSIDAD         | PROMEDIO |
|            |              | grs.                           | grs.           | grs.              | CC      | Grs./cm3      | grs.                                   | grs.           | grs.              | CC      | Grs./cm3      |                                |          |
|            |              | B                              | C              | D                 | E=C-D   | F=C/E         | G                                      | H              | I                 | J=H-I   | K=H/J         | M=(F-K)/F*100                  |          |
| 1          | 0            | 1187,1                         | 1188,2         | 670,0             | 518,2   | 2,293         | 1187,1                                 | 1188,2         | 670,0             | 518,200 | 2,293         | 0,000                          | 0,142    |
| 2          | 0            | 1184,2                         | 1186,7         | 668,7             | 518,0   | 2,291         | 1184,2                                 | 1186,7         | 668,7             | 518,000 | 2,291         | 0,000                          |          |
| 3          | 0            | 1198,5                         | 1201,0         | 678,5             | 522,5   | 2,299         | 1198,5                                 | 1201,0         | 678,5             | 522,500 | 2,299         | 0,000                          |          |
| 4          | 0            | 1181,1                         | 1182,0         | 667,0             | 515,0   | 2,295         | 1181,1                                 | 1182,0         | 667,0             | 515,000 | 2,295         | 0,000                          |          |
| 5          | 0            | 1178,9                         | 1183,0         | 666,8             | 516,2   | 2,292         | 1178,9                                 | 1183,0         | 666,8             | 516,200 | 2,292         | 0,000                          |          |
| 6          | 0            | 1198,0                         | 1201,0         | 678,0             | 523,0   | 2,296         | 1198,0                                 | 1201,0         | 678,0             | 523,000 | 2,296         | 0,000                          |          |
| 7          | 2MAX,SECO    | 1202,0                         | 1203,7         | 680,0             | 523,7   | 2,298         | 1199,1                                 | 1202,200       | 678,9             | 523,300 | 2,297         | 0,048                          | 0,121    |
| 8          | 2MAX,SECO    | 1181,7                         | 1182,9         | 668,1             | 514,8   | 2,298         | 1179,0                                 | 1181,700       | 665,7             | 516,000 | 2,290         | 0,334                          |          |
| 9          | 2MAX,SECO    | 1202,0                         | 1203,4         | 679,8             | 523,6   | 2,298         | 1199,4                                 | 1202,400       | 679,0             | 523,400 | 2,297         | 0,045                          |          |
| 10         | 2MAX,HUMEDO  | 1192,4                         | 1194,0         | 673,0             | 521,0   | 2,292         | 1194,0                                 | 1195,800       | 673,8             | 522,000 | 2,291         | 0,041                          |          |
| 11         | 2MAX,HUMEDO  | 1189,8                         | 1191,3         | 672,9             | 518,4   | 2,298         | 1190,8                                 | 1193,000       | 673,0             | 520,000 | 2,294         | 0,165                          |          |
| 12         | 2MAX,HUMEDO  | 1199,4                         | 1201,7         | 678,0             | 523,7   | 2,295         | 1201,3                                 | 1202,800       | 677,8             | 525,000 | 2,291         | 0,156                          |          |
| 13         | 3MAX,SECO    | 1192,9                         | 1194,7         | 675,0             | 519,7   | 2,299         | 1190,1                                 | 1192,400       | 672,7             | 519,700 | 2,294         | 0,193                          | 0,195    |
| 14         | 3MAX,SECO    | 1181,7                         | 1183,0         | 667,7             | 515,3   | 2,296         | 1178,8                                 | 1180,900       | 665,6             | 515,300 | 2,292         | 0,178                          |          |
| 15         | 3MAX,SECO    | 1192,1                         | 1193,5         | 674,3             | 519,2   | 2,299         | 1189,7                                 | 1191,400       | 672,0             | 519,400 | 2,294         | 0,214                          |          |
| 16         | 3MAX,HUMEDO  | 1190,5                         | 1191,4         | 672,3             | 519,1   | 2,295         | 1193,0                                 | 1194,300       | 673,3             | 521,000 | 2,292         | 0,122                          |          |
| 17         | 3MAX,HUMEDO  | 1194,0                         | 1195,8         | 675,7             | 520,1   | 2,299         | 1196,7                                 | 1198,100       | 676,4             | 521,700 | 2,297         | 0,115                          |          |
| 18         | 3MAX,HUMEDO  | 1198,3                         | 1200,0         | 678,0             | 522,0   | 2,299         | 1201,1                                 | 1203,000       | 678,0             | 525,000 | 2,291         | 0,323                          |          |
| 19         | 4MAX,SECO    | 1190,9                         | 1192,7         | 673,0             | 519,7   | 2,295         | 1188,0                                 | 1189,900       | 671,2             | 518,700 | 2,294         | 0,042                          | 0,160    |
| 20         | 4MAX,SECO    | 1186,7                         | 1188,1         | 670,1             | 518,0   | 2,294         | 1184,2                                 | 1186,000       | 667,3             | 518,700 | 2,286         | 0,311                          |          |
| 21         | 4MAX,SECO    | 1184,3                         | 1185,6         | 668,2             | 517,4   | 2,291         | 1181,8                                 | 1183,100       | 665,7             | 517,400 | 2,287         | 0,211                          |          |
| 22         | 4MAX,HUMEDO  | 1181,4                         | 1182,5         | 666,9             | 515,6   | 2,293         | 1183,5                                 | 1185,200       | 667,4             | 517,800 | 2,289         | 0,198                          |          |
| 23         | 4MAX,HUMEDO  | 1185,9                         | 1186,7         | 669,0             | 517,7   | 2,292         | 1188,0                                 | 1190,000       | 670,2             | 519,800 | 2,289         | 0,127                          |          |
| 24         | 4MAX,HUMEDO  | 1179,9                         | 1180,7         | 666,0             | 514,7   | 2,294         | 1181,8                                 | 1182,800       | 666,3             | 516,500 | 2,290         | 0,171                          |          |

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.-Resultados y graficas de variacion de densidades

Observando los valores obtenidos de la densidad para cada una de las temperaturas se puede ver que la variacion de la densidad es despreciable ya que no alcanza ni el 1% de variacion en ninguna de las tres temperaturas.

En la gráfica N°11 de variación de densidades por la temperatura mínima y sumergida en agua podemos observar que el grupo que presenta mayor variación es el grupo húmedo que no es significativa la diferencia con la obtenida por el grupo seco pero es mayor su variación de dicho grupo también se puede observar que no existe una tendencia definida.

En la gráfica N°12 y N°13 podemos observar que el comportamiento de la variación de la densidad el grupo más afectado en ambas temperaturas es el grupo seco ya que es el que presenta mayor variación y la variación es creciente en ambas temperaturas mientras que en el grupo húmedo la variación es inestable ya que se presenta en forma de curva lo que significa que es muy variable en estas dos temperaturas media y máxima el comportamiento es relativamente parecido lo cual se verifica en las gráficas.

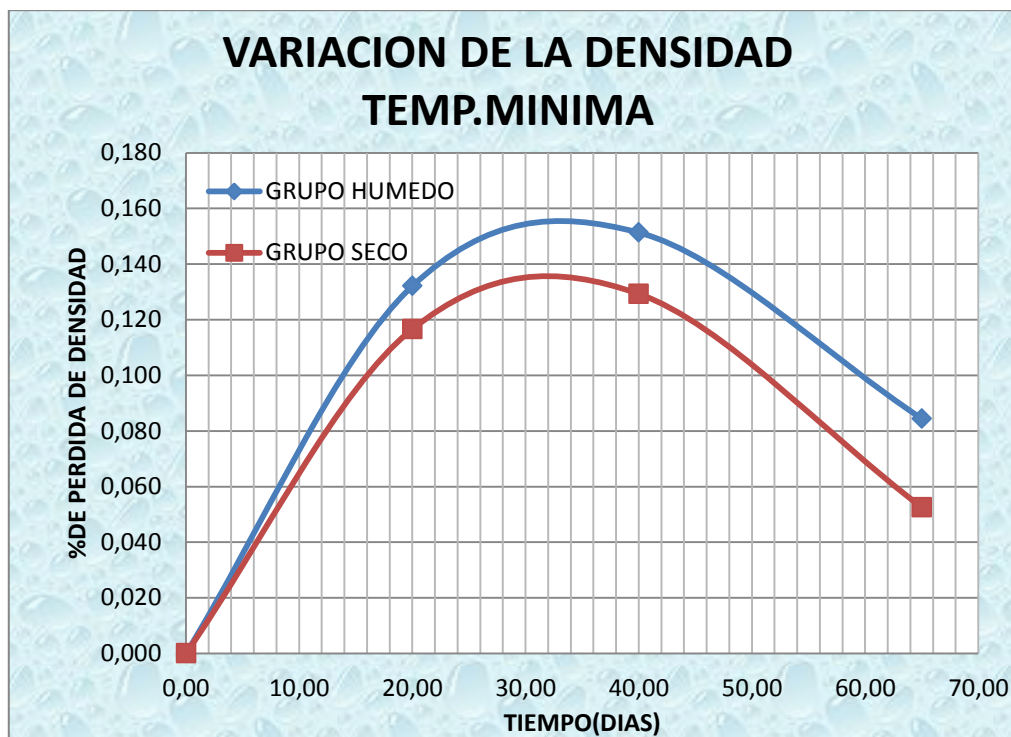
#### 3.5.2.1.- Variacion de densidad a Temperratura minima

Tabla N° 57 % de perdidad densida temperatura minima

| <b>%DE PERDIDAD DE DENSIDAD</b> |                   |                     |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| <b>TIEMPO</b>                   | <b>GRUPO SECO</b> | <b>GRUPO HUMEDO</b> |
| <b>0,00</b>                     | 0,000             | 0,000               |
| <b>20,00</b>                    | 0,117             | 0,132               |
| <b>40,00</b>                    | 0,129             | 0,151               |
| <b>65,00</b>                    | 0,053             | 0,084               |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°12 Variacion de la densidad en funcion del tiempo y la temperatura minima



Fuente: Elaboración Propia

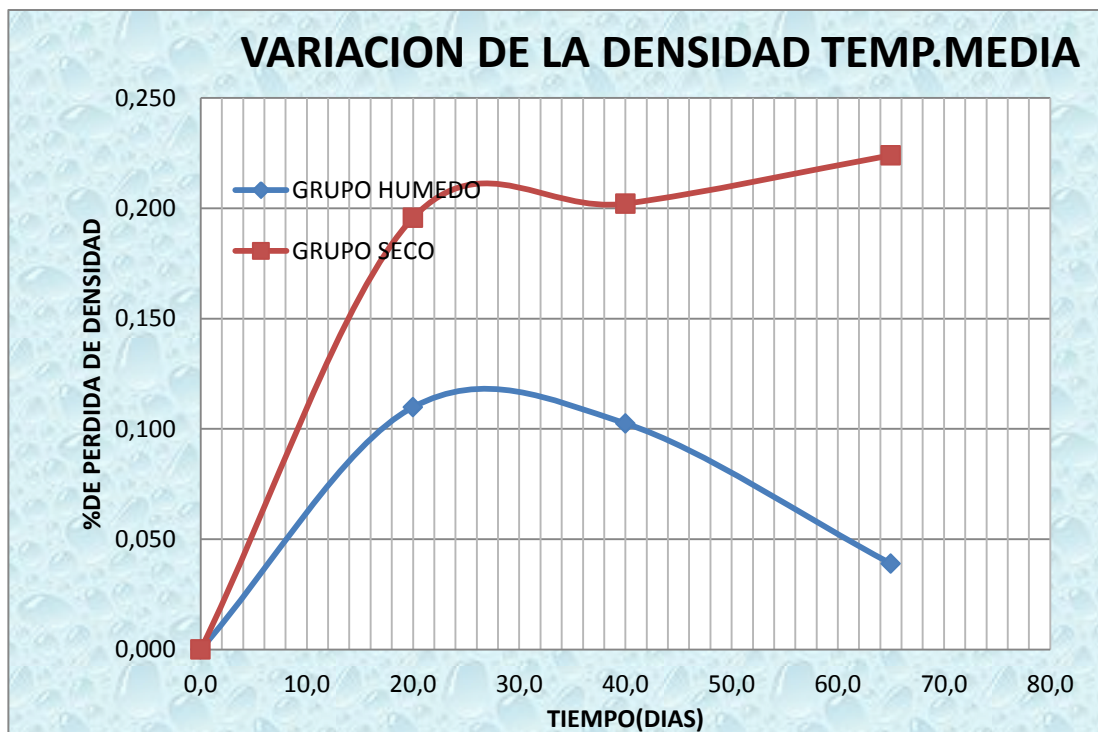
### 3.5.2.2.-Variacion de densidad a Temperatura media

Tabla N° 58 Perdida de densidad en funcion de tiempo y temperatura media

| %DE PERDIDA DE DENSIDAD |              |            |
|-------------------------|--------------|------------|
| TIEMPO                  | GRUPO HUMEDO | GRUPO SECO |
| 0,0                     | 0,000        | 0,000      |
| 20,0                    | 0,110        | 0,196      |
| 40,0                    | 0,102        | 0,202      |
| 65,0                    | 0,039        | 0,224      |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°13 variacion de la densidad en funcion del tiempo y la temperatura media



Fuente: Elaboración Propia

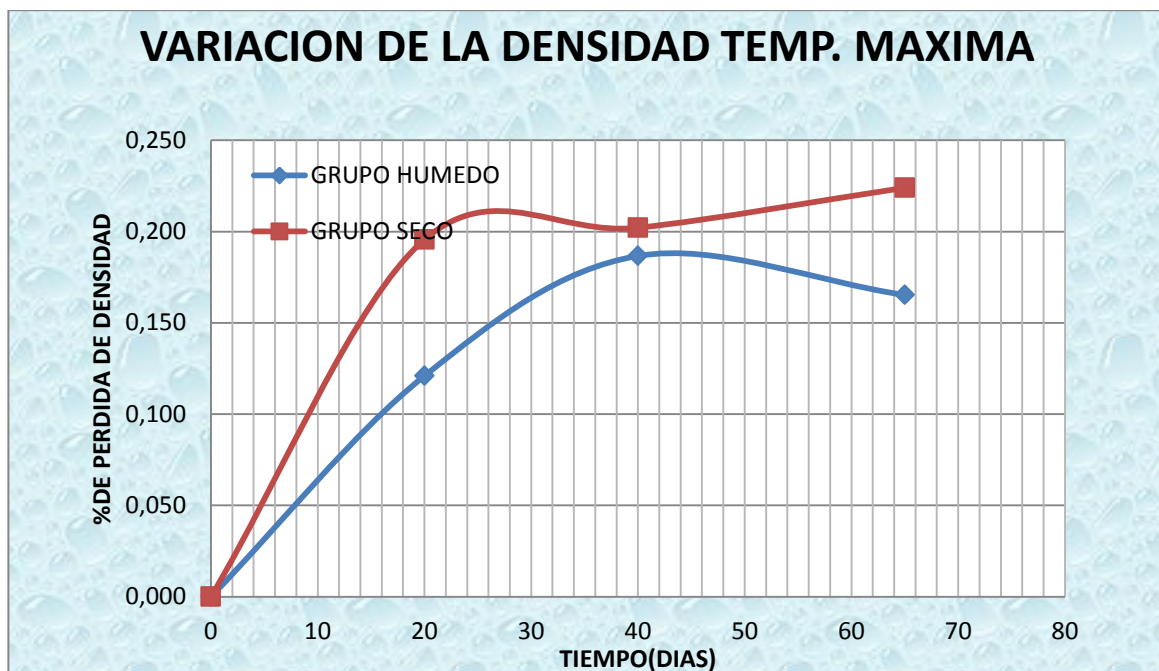
### 3.5.2.3.- Variacion de densidad temperatura maxima

Tabla N°59 Perdida de densidad en funcion de tiempo y temperatura maxima

| %DE PERDIDA DE DENSIDAD |              |            |
|-------------------------|--------------|------------|
| TIEMPO                  | GRUPO HUMEDO | GRUPO SECO |
| 0                       | 0,000        | 0,000      |
| 20                      | 0,121        | 0,142      |
| 40                      | 0,187        | 0,195      |
| 65                      | 0,165        | 0,160      |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°14 Variacion de la densidad en funcion del tiempo y la temperatura maxima



Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.-Influencia del agua sobre el cemento asfáltico

Se realizara el ensayo de penetración establecido según norma (Método AASHTO T49 y en el ASTM D5.) los ensayos se realizan para cada tiempo de sumersión y temperatura especificado en la metodología.

#### -Elaboración de la lámina

Después del precalentamiento del asfalto colocar sobre la lámina de metal de dimensiones de 40cm\*30cm el cemento asfáltico, esparcir la cantidad de cemento uniformemente para obtener un espesor aproximado de 2mm. La cantidad de asfalto que no alcanzó a esparcirse después de haberse vertido sobre la lámina, se extendió con una espátula en el interior de un horno con temperatura controlada, la cual no debía superar los 70 °C. La colocación de las películas de asfalto se observa en la Figura 60.

Figura N°60 Colocado del C.A. en la lámina metálica



Fuente: Elaboración Propia

El número total de láminas realizadas para ser acondicionadas a las tres temperaturas fue de 30 que serán acondicionadas según temperaturas y ensayadas según tiempo y temperatura.

Figura N°61 Láminas de cemento asfáltico previo al acondicionamiento



Fuente: Elaboración Propia

Después de cada periodo de tiempo transcurrido se retira el asfalto de las láminas con una espátula previo calentamiento, el cemento asfáltico es colocado en diferente recipientes según tiempo y temperatura que fueron acondicionados.

Cada uno de los recipientes es enumerado según temperatura y tiempo, posteriormente se realiza el ensayo de penetración según la normativa de dicho ensayo.

Figura N°62 Calentado de lámina y extracción del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.1.-Laminas de cemento asfáltico sumergidas a Temperatura mínima

Para el acondicionamiento a temperatura mínima de las láminas de C.A. se necesitó un frízer para lograr la temperatura mínima de  $0^{\circ}\text{C}$ , las muestras fueron colocadas en un bañador con agua y temperatura controlada para lo que se usó un termómetro fueron retiradas para cada tiempo especificado en la metodología.

Figura N°63 Muestras sumergidas a temperatura Mínima



Fuente: Elaboración Propia

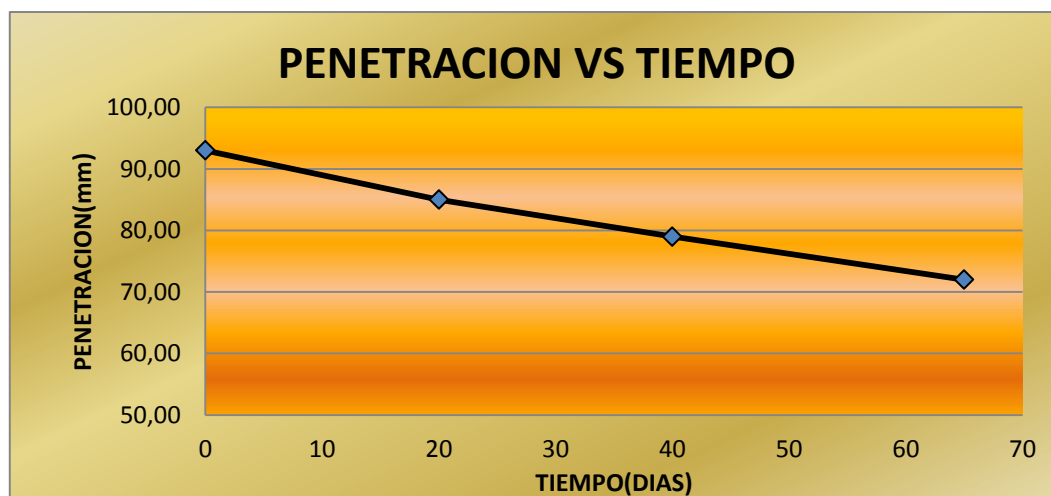
### 3.6.1.1.-Datos y resultados

Tabla N°60 Lecturas de penetración en función tiempo y temperatura mínima

| <b>TIEMPO<br/>(DIAS)</b> | <b>N°<br/>ENSAYO</b> | <b>LECTURA(mm)</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|--------------------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| <b>0</b>                 | 1                    | 91                 | 93,00           |
|                          | 2                    | 93                 |                 |
|                          | 3                    | 93                 |                 |
| <b>20</b>                | 1                    | 85                 | 85,00           |
|                          | 2                    | 84                 |                 |
|                          | 3                    | 85                 |                 |
| <b>40</b>                | 1                    | 79                 | 79,00           |
|                          | 2                    | 77                 |                 |
|                          | 3                    | 80                 |                 |
| <b>65</b>                | 1                    | 72                 | 72,00           |
|                          | 2                    | 69                 |                 |
|                          | 3                    | 74                 |                 |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°15 Penetración en función de tiempo y temperatura mínima



Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.2. Láminas de cemento asfáltico sumergidas a Temperatura media

Para el acondicionamiento a temperatura media de las láminas de C.A. fueron puestas a temperatura ambiente para mantener la temperatura media de 17°C, las muestras fueron colocadas en un bañador con agua y temperatura controlada para lo que se usó un termómetro fueron retiradas para cada tiempo determinado.

Figura N° 64 Láminas de C.A sumergidas a temperatura media



Fuente: Elaboración Propia

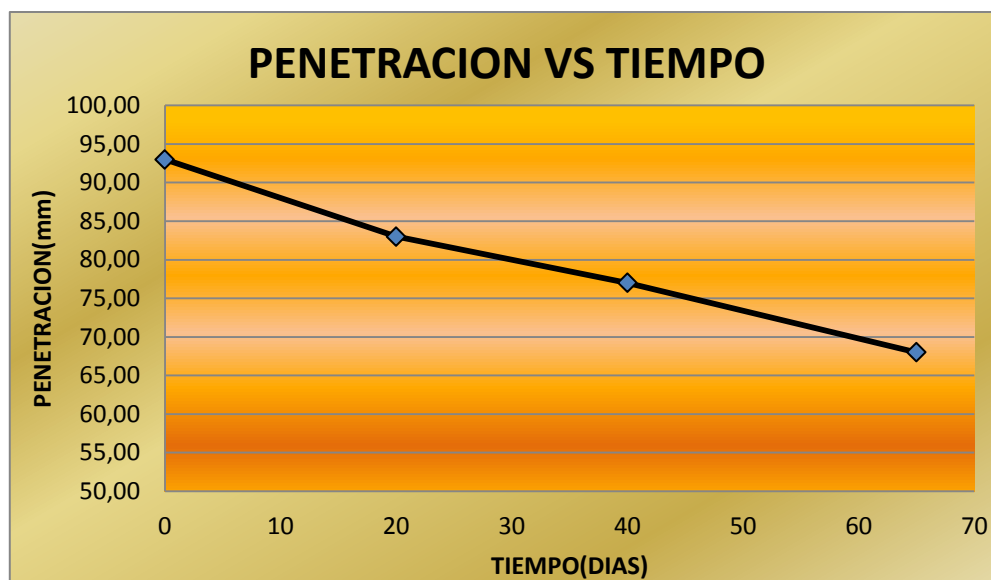
## 3.6.2.1.-Datos y resultados

Tabla N° 61 Lecturas de penetración en función tiempo y temperatura media

| <b>TIEMPO<br/>(DIAS)</b> | <b>N°ENSAYO</b> | <b>LECTURA(mm)</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| <b>0</b>                 | 1               | 91                 | 93,00           |
|                          | 2               | 93                 |                 |
|                          | 3               | 93                 |                 |
| <b>20</b>                | 1               | 81                 | 83,00           |
|                          | 2               | 83                 |                 |
|                          | 3               | 84                 |                 |
| <b>40</b>                | 1               | 77                 | 77,00           |
|                          | 2               | 76                 |                 |
|                          | 3               | 78                 |                 |
| <b>65</b>                | 1               | 67                 | 68,00           |
|                          | 2               | 68                 |                 |
|                          | 3               | 68                 |                 |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°16 Penetración en función de tiempo y temperatura media

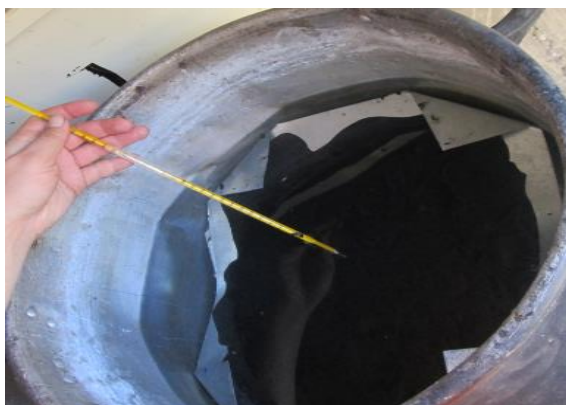


Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.3.- Láminas de cemento asfáltico sumergidas a Temperatura máxima

Para el acondicionamiento a temperatura máxima de las láminas de C.A. fueron colocadas en un horno previo acondicionamiento para que este pueda funcionar a temperatura máxima 39°C, las muestras fueron colocadas en un recipiente metálico y temperatura controlada para lo que se usó un termómetro fueron retiradas para cada tiempo determinado.

Figura N°65 Láminas acondicionadas a temperatura máxima



Fuente: Elaboración Propia

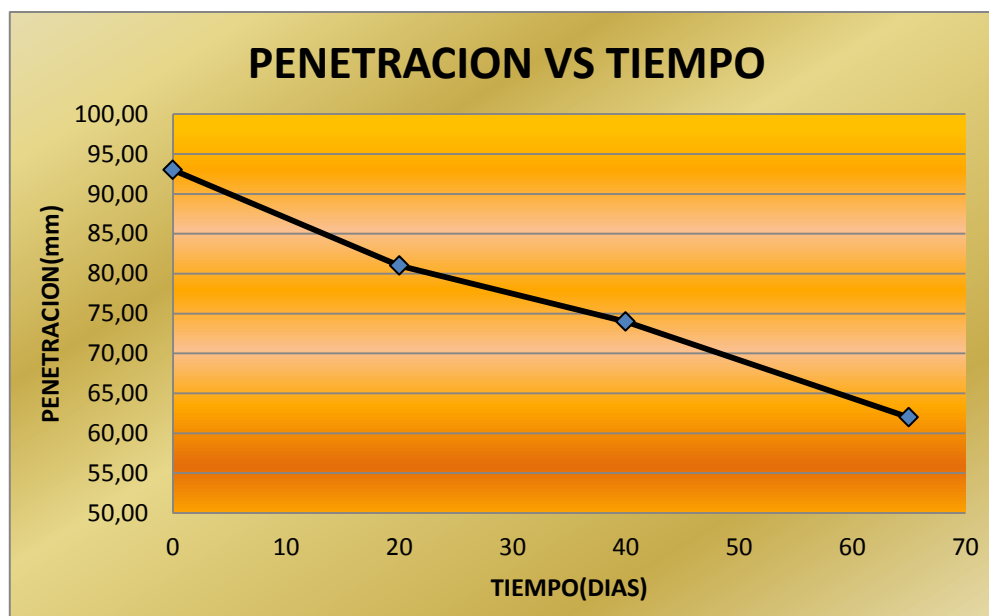
## 3.6.1.1.-Datos y resultados

Tabla N°62 Lecturas de penetración en función tiempo y temperatura máxima

| <b>TIEMPO<br/>(DIAS)</b> | <b>N°ENSAYO</b> | <b>LECTURA(mm)</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| <b>0</b>                 | 1               | 91                 | <b>93,00</b>    |
|                          | 2               | 93                 |                 |
|                          | 3               | 93                 |                 |
| <b>20</b>                | 1               | 80                 | <b>81,00</b>    |
|                          | 2               | 80                 |                 |
|                          | 3               | 82                 |                 |
| <b>40</b>                | 1               | 72                 | <b>74,00</b>    |
|                          | 2               | 77                 |                 |
|                          | 3               | 73                 |                 |
| <b>65</b>                | 1               | 62                 | <b>62,00</b>    |
|                          | 2               | 63                 |                 |
|                          | 3               | 60                 |                 |

Fuente: Elaboración Propia

Grafica N°17 Penetración en función de tiempo y temperatura máxima



Fuente: Elaboración Propia

#### 3.6.4.-Resumen general

En la tabla N° 63 se observan todas las lectura de penetración a distintas temperaturas y tiempos respectivos se puede observar que a partir del proceso de sumersión en agua del cemento asfaltico existe una variación de la penetración ya que esta no se encuentra dentro de los valores establecidos para el cemento asfaltico 85-100, excepto las acondicionadas a temperatura mínima a los 20 días.

La temperatura que más afecta o disminuye la penetración es la temperatura máxima existiendo una variación de 20 unidades en función al primer valor obtenido de penetración.

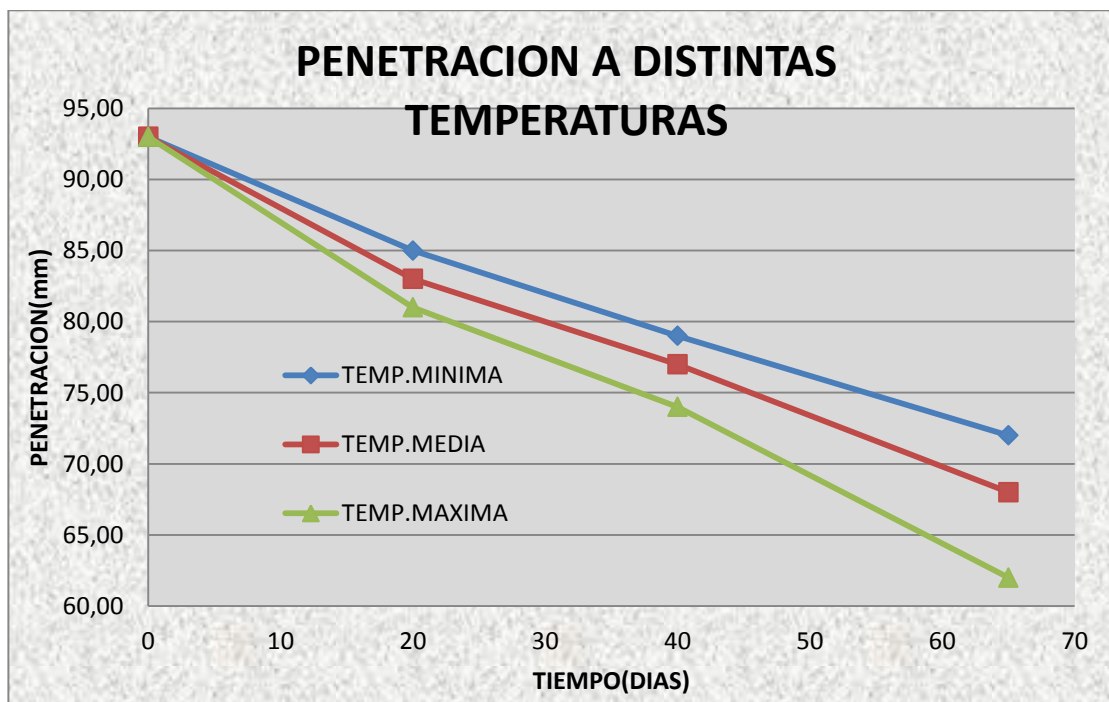
Observando las tendencias que se presentan en la gráfica N°16 se puede ver que el agua tiene influencia en la disminución de la penetración ya que a las tres temperaturas sufre disminución de la penetración, lo que ratifica la teoría que el cemento asfaltico a pesar que es un material impermeable modifica sus propiedades en condiciones de saturación en función del tiempo.

**Tabla N°63 Lecturas de penetración para distintos tiempos y temperaturas**

| TIEMPO | TEMP.<br>MINIMA | TEMP.<br>MEDIA  | TEMP.<br>MAXIMA |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| DIAS   | LECTURA<br>(mm) | LECTURA<br>(mm) | LECTURA<br>(mm) |
| 0      | 93,00           | 93,00           | 93,00           |
| 20     | 85,00           | 83,00           | 81,00           |
| 40     | 79,00           | 77,00           | 74,00           |
| 65     | 72,00           | 68,00           | 62,00           |

Fuente: Elaboración Propia

**Grafica N°18 Penetración a distintas temperaturas y tiempo**



Fuente:

Elaboración

Propia



## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1.-Conclusiones

- Las mezclas asfálticas compactadas que presentan mayor pérdida por desgaste son las que fueron sometidas a proceso de saturación grupo húmedo y seco acondicionadas a temperatura máxima.
- El ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles nos muestra el desprendimiento progresivo que se produce en las mezclas que va aumentando en función del tiempo en contacto de las mezclas con el agua.
- Las briquetas que no presentan la menor variación en el índice de resistencia conservada son las acondicionadas a temperatura mínima a pesar de la inestabilidad que demuestran en función del tiempo de exposición a dicha temperatura.
- El ciclo de inmersión de las mezclas asfálticas acondicionadas a temperatura mínima tanto grupo seco como húmedo no permite establecer una tendencia específica ya que existen puntos intermedios donde la conservación de resistencia aumenta y luego vuelve a disminuir lo que no muestra de manera clara la manifestación de dicha temperatura.
- La mayor parte de las briquetas acondicionadas presentan un aumento más significativo de pérdida por desgaste a partir de los 40 días en los tres grupos estudiados.
- Para la temperatura media y máxima se demostró que los valores observados para estas en el tiempo de 20 días son relativamente parecidos.
- La adhesividad es la propiedad más afecta por la temperatura máxima ya que presentan mayores porcentajes de desgaste de las briquetas considerando que las briquetas fueron ensayadas sin ningún tipo de carga en la máquina ni durante el proceso de acondicionamiento.
- Considerando que la temperatura con mayor influencia es la temperatura de 39°C y esta es una temperatura que se encuentra por debajo del punto de

ablandamiento del material se tendría que considerar que en las mezclas asfálticas permanecen rígidas sin ablandamiento pero que por la acción del agua presentan el mayor porcentaje de pérdida.

- Se entiende en función a todo lo explicado que la temperatura y el agua en su conjunto son factores importantes para determinar el grado de deterioro de las mezclas.
- Los valores de penetración son más afectados por la sumersión del asfalto a temperatura máxima ya que existe una mayor diferencia con el valor inicial.
- Los valores de penetración del cemento asfaltico se ven afectados por la sumersión a las tres temperaturas aunque en diferentes proporciones lo que nos indica que el cemento asfaltico a pesar de ser un material impermeable modifica sus propiedades al entrar en contacto con el agua en función del tiempo de exposición a la misma.
- Los valores de penetración conseguidos a las tres temperaturas nos muestran casi la misma tendencia pero en distintas proporciones, ya que a las tres temperaturas disminuye el valor de penetración siguiendo tendencias similares.
- La variación de la densidad en función de cada grupo y temperatura no es significativa ya que no es ni el 1% de variación que presenta en las tres temperaturas.
- La variación de la densidad en el grupo sumergido a temperatura máxima y media tiene un comportamiento parecido ya que los valores van creciendo en función del tiempo este comportamiento solo se da en el grupo seco, mientras que en el grupo húmedo para ambas temperaturas el valor es inestable ya que se presenta en forma de curva lo que no muestra una tendencia definida.
- La variación en el grupo sumergido en temperatura mínima ocurre lo contrario que en las temperaturas media y máxima ya que la mayor variación se presenta en el grupo húmedo y tiene la tendencia a formar una curva en ambos grupos mostrando un comportamiento similar pero con valores distintos.

#### **4.2.-Recomendaciones**

- El estudio del efecto del agua a las mezclas asfálticas mediante la máquina de desgaste de los Ángeles requiere de especial cuidado ya que variaciones en las temperaturas podrían provocar variaciones considerables en los resultados.
- Es recomendable hacer un estudio de influencia del agua en las mezclas asfálticas convencionales cerradas, con una variación de la granulometría para ver la influencia que tienen estos y sus proporciones.
- Se recomienda realizar el mismo estudio con otras características de cemento asfáltico, para observar la variación que existe entre el C.A. estudiado con otro C.A. con diferentes características técnicas, para observar la modificación de los resultados de penetración.
- Se recomienda complementar el siguiente estudio realizando la misma metodología pero con el ensayo de evaluación para cada periodo, sea este de estabilidad y flujo.