

# CAPITULO I

## DISEÑO METODOLOGICO

### 1.1 Introducción

El uso moderno de asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo pasado, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces, la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos. Hoy en día, los equipos y los procedimientos usados para el diseño y la construcción de estructuras de pavimentos asfálticos son sofisticados.

Una regla que no ha cambiado a través de la larga historia del asfalto en la construcción de carreteras es la siguiente:

“Un pavimento es tan bueno como los materiales usados en su diseño y la calidad de su proceso constructivo”.

Tomando en cuenta que la función de resistencia en una mezcla asfáltica dentro de los pavimentos, no ha sido satisfactoria en muchos casos, se han previsto modos de modificar estas mezclas, y de tal manera poder incrementar esta propiedad mecánica en solicitudes de grandes cargas.

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la **adición de lechada de cemento a la mezcla asfáltica**, se modifican las propiedades mecánicas de estas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, ahuellamiento, fatiga, envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica.

De tal manera, este estudio, propone realizar la modificación de una mezcla asfáltica tradicional mediante la implementación de lechada de cemento, en reemplazo al

volumen de agregado fino que posee este tipo de mezclas, con el final de poder modificar satisfactoriamente su resistencia mecánica, denominado como estabilidad Marshall.

## **1.2 Antecedentes**

El desarrollo de un país está relacionado directamente con la capacidad de movilidad que posee el mismo, por esta razón el desarrollo de nuevas propuestas para mejorar las características de sus componentes y reducir sus costos de construcción, desarrollara una economía sustentable y competitiva globalmente

Con el desarrollo e innovación de nuevas mezclas asfálticas modificadas, se logra obtener un alto rendimiento vial que mejorara las condiciones de tránsito y con costos moderados, y logara indiscutiblemente en nuestro entorno, mayores beneficios sociales, económicos y ambientales.

El área de mantenimiento, rehabilitación y construcción vial es una de las mayores actividades en nuestro país, con el objetivo de lograr principalmente en nuestro departamento Tarija, la interconexión con carreteras internacionales, como así con los corredores bioceánicos; y de tal manera fomentar el desarrollo local y nacional.

Las capas de rodadura de las vías pavimentadas de nuestro país, en su mayoría son del tipo flexible a base de mezcla asfáltica en caliente. La mayoría de estas son tipo densa, diseñadas principalmente por el método Marshall.

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

Estas mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

Las mezclas se emplean en la construcción de capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Las cualidades funcionales de la carpeta asfáltica, residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- La adherencia del neumático al firme.
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tráfico.
- La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- El envejecimiento de los vehículos.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una carpeta asfáltica:

- La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas de rodadura, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores de le denomina pavimento.

### 1.3 Justificación

La realización del estudio de este tipo de mezcla asfáltica, es de mucha importancia en su aplicación debido a los siguientes factores:

- La necesidad de mejorar las condiciones de resistencia físico mecánica de las mezclas asfálticas aplicadas en vías donde estas a corto plazo se encuentran defectuosas debido a las fallas ocasionadas por falta de control de la ley de cargas, encareciendo el mantenimiento de las mismas.
- Al aplicar este tipo de mezcla asfáltica se podrá también tener una señalización horizontal en la vía, ya que al incorporar lechada de cemento a la mezcla, se podría adoptarle una coloración o pigmentación, el cual caracterizaría las vías de uso exclusivo para el transporte pesado, el cual demanda mayor número de ejes por la carga transportada.
- Aportar a la sociedad y en su conjunto la comodidad al poder transitar por vías pavimentadas con este tipo de mezcla asfáltica, dejando atrás los trastornos causados a los usuarios conductores, pasajero y peatón; ocasionados por las vías deterioradas.
- En el área académica, tratar de promover la investigación, en lo que se refiere a la existencia de estas nuevas e innovadoras tendencias de mezclas modificadas de este orden que se van desarrollando en el mundo y hoy en día no se encuentran normalizadas en nuestro medio, desarrollando un modelo de aplicación que podría ser de buen uso en un futuro cercano.

## 1.4 Situación problemática

Teniendo en cuenta el amplio programa de pavimentado vial que actualmente se lleva a cabo en el departamento de Tarija, que comprende aproximadamente alrededor de 397 km de los 1159 km que conforma la red fundamental del mismo; resulta sugerente iniciar este trabajo de investigación bajo las siguientes interrogantes:

- ¿Se están construyendo las carreteras con la tecnología más adecuada para cada condición?
- ¿Se está tomando en cuenta la resistencia mecánica de las mismas?

Las mezclas asfálticas de las cuales están compuestos los pavimentos de estos proyectos viales, no han cumplido adecuadamente con sus Características Físico – Resistentes, por ejemplo la Estabilidad Marshall; debido a un mal control en el diseño de las mismas, o por falta de supervisión de la construcción de estas estructuras.

De tal forma, esta falta de control en el uso, ha creado deterioros en las mismas, originando molestias y trastornos a los usuarios conductores y pasajeros principalmente, ya que diariamente deban experimentarse y sentir la brusquedad al momento de transitar por este tipo de carreteras defectuosas.

Entonces, el constante mantenimiento que demandan estas vías para su funcionamiento óptimo, ha inducido a incrementar gradualmente la inversión económica en este tipo de infraestructura de uso público, pero no se ha logrado satisfacer el cumplimiento de la vida útil de las carreteras.

Todas estas consecuencias que demarcan estos problemas encontrados en el diseño de las mezclas asfálticas, y esto ha inducido a crearse un cuestionamiento, sobre el poder modificar una mezcla de este orden, el cual posea una mayor resistencia en cuanto a la solicitud de la incrementación de esfuerzos, y sea satisfactoria en su aplicación.

De tal manera, este estudio pone atención en el diseño de mezclas asfálticas modificadas, donde se plantea la unión de dos tipos de mezclas comunes en nuestro medio, como ser la mezcla asfáltica tradicional, con una lechada de cemento; de este planteamiento ha nacido la siguiente iniciativa:

### **1.4.1 Problema**

¿Cómo se ve afectada la Estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tradicional, si esta es modificada mediante la adición de lechada de cemento en reemplazo al volumen de agregado fino que presentan estas?

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar la Estabilidad Marshall en la elaboración de una mezcla asfáltica modificada, mediante la adición de lechada de cemento en reemplazo al contenido de agregado fino en la mezcla tradicional, para lograr una mezcla mejorada y lograr resultados aptos para ser aplicados en trabajo.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Calcular de las características del cemento asfáltico a utilizar mediante ensayos en laboratorio de asfaltos.
- Realizar los ensayos respectivos en laboratorio de suelos sobre los agregados a utilizar.
- Diseñar de la mezcla asfáltica tradicional mediante método Marshall, cuya estabilidad será usado como patrón de comparación en este estudio.
- Determinar los parámetros de diseño para la lechada de cemento a aplicar, la cual se distinguirá por su uso en diferentes dentro de la mezcla asfáltica a modificar.
- Calcular las propiedades y características mecánicas que se obtendrían al modificar la mezcla asfáltica con la lechada de cemento.

- Analizar la variabilidad en la Estabilidad Marshall, que obtendrán de las mezclas, mediante ensayos de estabilidad.
- Al final de este de estudio, se plantea establecer Conclusiones y recomendaciones.

## 1.6 Alcance

El trabajo estará enmarcado dentro del siguiente alcance y limitaciones:

- Los ensayos concernientes a la determinación de la calidad de los materiales; corresponderán nada más a aquellos que sean de utilidad para el diseño de la mezcla asfáltica abierta en caliente y la mezcla asfáltica modificada respectivamente; donde los materiales pétreos solamente corresponderán al banco de agregados más próximo al área de elaboración de la mezcla.
- La investigación abordará el diseño teórico y el diseño mediante ensayos de laboratorio, tanto de la MAC tradicional, y la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento, para obtener la dosificación más óptima a emplear, y obtener resultados óptimos de trabajo; excluyendo de la misma su costo unitario, producción en planta y aplicación a tramos como prueba de su funcionamiento.
- El asfalto a emplear en la elaboración de las mezclas asfálticas será del tipo AC (Cemento Asfáltico) ya que éste es el tipo de asfalto que propone la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas. En lo que concierne a la información técnica que se requiera de éste, como resultados de ensayos para su clasificación, etc.; estos serán realizados en laboratorio de asfaltos.
- La granulometría a utilizar en el diseño que comprende éste trabajo de investigación; se basará en el tamaño máximo nominal del agregado de más empleo en nuestra área:  $\frac{3}{4}$ ", tamaño admisible para el método de diseño de mezclas asfálticas Marshall.

- El diseño obtenido de la mezcla asfáltica tradicional en caliente, se analizará para un tráfico pesado ya que representa las condiciones más desfavorables a las cuáles se puede someter un pavimento en las carreteras en el país. El mismo diseño, en cuanto a los agregados y asfalto, serán utilizados para realizar la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento.
- El estudio propone realizar la modificación con lechada de cemento de la mezcla asfáltica, una vez que la mezcla asfáltica abierta haya sido realizada, ya que la lechada debe rellenar los vacíos existentes. De tal forma solo se realizaran ensayos a la mezcla solo en su modificación, no tomando en cuenta que características físico mecánicas presente la mezcla asfáltica abierta ni la lechada de cemento.
- Para un análisis más profundo de los resultados, se realizará el diseño de una mezcla asfáltica con el método MARSHALL; cuyos ensayos de laboratorio será necesario realizarlos en laboratorios fuera del campus universitario, ya que el laboratorio de asfaltos de la UAJMS, no cuenta con equipo necesario par a poder aplicar el Método Marshall.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS.

##### 2.1.1 Definición

###### Mezclas Asfálticas

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

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento de la carpeta de rodadura 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.

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el Método Marshall y el Método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se sigue utilizando es el método Marshall.

### **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 ligante.
- **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.

**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: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: 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 microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido 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.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la mezcla.

**f) Por la Granulometría.**

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

## **2.1.2 Empleo de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos.**

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un pavimento:

1. La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.

2. La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del pavimento, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento.

Las tipologías de los pavimentos de acuerdo a su comportamiento y respuesta se pueden dividir en los siguientes tipos:

- a) Pavimentos Flexibles. (Base Granular).

Constituidos por capas de sub-base y base de material granular, y por un tratamiento superficial o por una capa de mezcla asfáltica de espesores muy delgados que pueden ir hasta los 10 cm. regularmente, las capas granulares resisten fundamentalmente la acción del tráfico, la capa de rodadura sirve para impermeabilizar el firme, resistir los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar una rodadura cómoda y segura.

- b) Pavimentos Flexibles. (Base Asfáltica).

Compuesto por una base y un pavimento asfáltico y el cual está constituido por una capa intermedia y otra de rodadura, la sub-base puede ser granular o bien tratada con un ligante hidráulico o hidrocarbonado.

- c) Pavimentos Semi-rígidos. (Base tratada con ligantes hidráulicos).  
Constituido por una capa de base tratada con ligantes hidráulicos, o de concreto, la sub-base suele ser de material granular, pudiendo ser estabilizada, el pavimento está formado por una o dos capas de mezcla asfáltica (rodadura e intermedia).
- d) Pavimentos Rígidos. (Pavimentos de hormigón).  
Están formados por una losa de hormigón colocada directamente sobre la explanada, o sobre una capa de base granular o estabilizada o un hormigón pobre, la losa de hormigón actúa como capa de rodadura.

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

Las cualidades funcionales del pavimento residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al firme.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.

7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del pavimento están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial.

Como resumen, se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- ✓ Estabilidad.
- ✓ Durabilidad.
- ✓ Resistencia a la fatiga.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- ✓ Resistencia al deslizamiento.
- ✓ Regularidad.
- ✓ Permeabilidad adecuada.
- ✓ Sonoridad.
- ✓ Color, entre otras.

### **2.1.3 Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.**

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, en los países fríos, en particular en el centro de Europa, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no

proporcionan la textura adecuada, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla como son la incrustación en la superficie de gravillas o al abujardado en caliente.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de mezclas se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

#### **2.1.4 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente**

A continuación se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

- *The Hubbard-Field (1920's)*. Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.
- *Método Marshall (1930's)*. Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.
- *Método Hveem (1930's)*. Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.
- *Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984)*. Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los

requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia al ahuellamiento (efectos de deformación acumulada).

- *Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987).* La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.
  
- *Método SUPERPAVE (1993).* El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

## 2.2 ASFALTOS

### 2.2.1 Antecedentes

El asfalto es un componente natural, la mayor parte de los petróleos. La palabra asfalto de deriva de la lengua que se hablaba a orillas del río Tigris superior de Asia entre los años 1400 y 1600 A.C. En esta zona se encuentra la palabra *sphalto*, que significa durable. Después el vocablo fue adoptado por el griego, paso al latín, y más adelante al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalt).

Los estudios arqueológicos indican que es uno de los materiales de construcción más antiguo que el hombre ha utilizado, ya que apreciaron rápidamente las excelentes propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación que tenía.

**Tabla 2.1 Historia del asfalto**

AÑO	USO
6000 a.C.	En Sumeria, se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel es una de las tantas construcciones en donde se utilizó como mortero.
3200 - 2600 a.C.	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
2600 - 540 a.C.	Excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.
300 a.C.	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamamientos.
1802 d.C.	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1838 d.C.	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
1870 d.C.	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
1876 d.C.	Construcción del primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D. C. con asfalto de lago importado.
1902 d.C.	En Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año.

Fuente: Conferencia: Esquema actual y futuro de producción de asfaltos en PEMEX refinación. Ing.:

Jorge Rodríguez Villar. 2000

En su evolución, se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original (obtenido del petróleo crudo) con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones extremas, como climas muy calurosos o fríos, tránsito de vehículos muy pesados o ambientes agresivos.

Solo en Europa existen actualmente más de 4000 plantas de mezcla asfáltica alrededor en más de 16 países. El asfalto es totalmente reciclable y su reutilización ha aumentado considerablemente en los últimos años, llegando hasta el 70%.

### **2.2.2 Definición de asfalto**

Es una sustancia pegajosa, negra, solida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad.

Varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (solido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla asfáltica caliente (MAC).

Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos agentes y tipos de daños químicos.

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil, y también a perder capacidad de adherirse a las partículas de agregados. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto.

## 2.2.3 Clasificación, propiedades físicas y químicas del Asfalto

### 2.2.3.1 Propiedades químicas del asfalto

El asfalto posee propiedades químicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. En la actualidad no hay una prueba normal para la composición química de asfaltos que sea aceptada.

Los ensayos existentes para analizar composiciones químicas requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfalto.

La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento dentro de la estructura del pavimento es todavía incierta. De todas maneras, una breve descripción de la química del asfalto ayudara a que el supervisor entienda la naturaleza del material:

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones de hidrogeno y carbono) y otros elementos químicos. El asfalto cuando es disuelto con un heptano, puede separarse en dos partes principales, asfáltenos y máltenos.

Los asfáltenos no se disuelven en heptano. Los asfáltenos una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso del grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Los máltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras q los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y resinas.

La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al

oxígeno, tipos de agregados usados en la mezcla asfáltica del pavimento, y espesor de la película de asfalto que envuelve a las partículas de los agregados.

### **2.2.3.2. Propiedades físicas del asfalto**

Las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico, que son tenidas en cuenta en el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, son:

#### **✓ Durabilidad**

Es una medida que indica que tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características, cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

#### **✓ Adhesión y Cohesión**

Adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

Cohesión es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada para algunos como la relación de la cohesión y la adhesión.

#### **✓ Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento.**

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en pavimento terminado. El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización. La oxidación y el endurecimiento más severo ocurren cuando durante el mezclado, pues el asfalto se encuentra a grandes temperaturas y en películas delgadas.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción.

Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos de aire interconectados, junto a una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas del agregado.

#### ✓ **Susceptibilidad a la temperatura**

Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

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 de otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas del agregado.

### **2.2.4 Obtención del asfalto en refinerías**

El crudo del petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los cuales son componentes del asfalto. Para obtenerse este debe separarse las distintas fracciones del crudo del petróleo por destilaciones que se realizan en refinerías del petróleo.

#### **2.2.4.1 Destilación primaria**

Es la primera operación a la que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375 °C. Los componentes livianos (nafta, kerosene, gas oíl) hierven a esta temperatura y se convierten en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora. El líquido o residuo de

destilación primaria se junta en todo el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

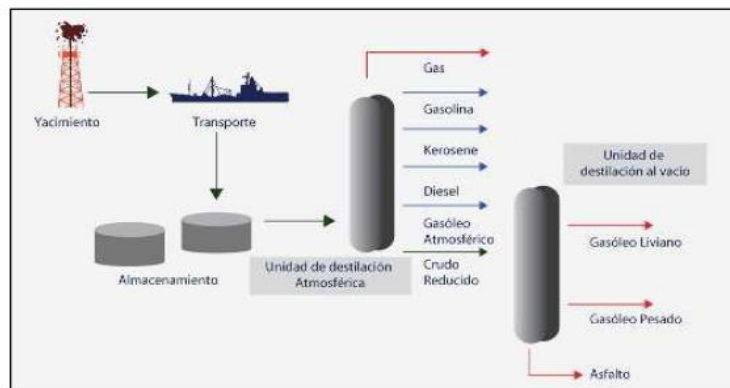
#### **2.2.4.2 Destilación al vacío**

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfáltenos y la otra con concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionadora, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío. De acuerdo a la cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfalto ya que pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

#### **2.2.4.3 Desasfaltización con propano o butano**

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, contiene los asfáltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfáltenos es disolver y extraer el aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina **Desasfaltización** y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y a temperaturas relativamente moderadas (70 a 120 °C). El gas licuado extrae al aceite y queda un residuo semisólido llamado Bitumen.

**Figura 2.1** Obtención del asfalto



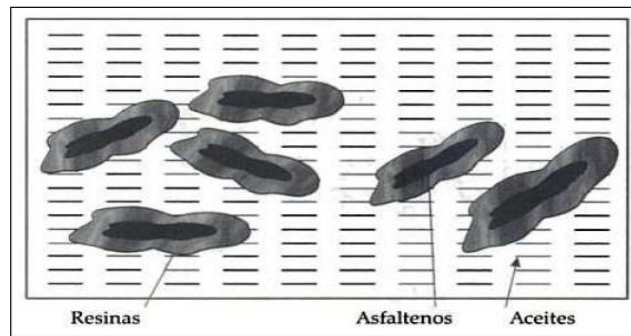
Fuente: [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios)

#### 2.2.4.4 Composición del asfalto

La composición química de los asfaltos es muy compleja, básicamente está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrogeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio, níquel, hierro, calcio y magnesio. La composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua o aromática formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. Las resinas contenidas en los máltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insolubles asfáltenos. Los máltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente de los asfaltos, los aceites.

**Figura 2.2** Esquema Coloidal de Pfeiffer



Fuente: Hugo León Arenas, Tecnología del cemento asfáltico

## 2.2.5 Tipos de asfaltos utilizados en pavimentos

Los tipos de asfalto refinado producidos por destilación serán descritos a continuación.

Se producen otros asfaltos directamente de los cementos asfálticos, disolviéndolos en destilados volátiles; esos productos se llaman:

### 2.2.5.1 Asfaltos rebajados de fraguado rápido (FR)

Los asfaltos rebajados de fraguado rápido son cementos asfálticos diluidos con un destilado de petróleo tal como la gasolina, que se evapora rápidamente. Los productos de curado rápido se emplean cuando se desea un cambio rápido del estado líquido de aplicación al cemento asfáltico original.

Los tipos de fraguado del asfalto rápido varían de FR-0 a FR-4, las consistencias, temperaturas de aplicación, porcentajes de disolventes y penetraciones del cemento asfáltico original son casi similares a las de las designaciones comparables de la serie FM. La penetración del residuo después de la destilación se aproxima a la del asfalto original.

### **2.2.5.2 Asfaltos rebajados de fraguado medio (FM)**

Los asfaltos rebajados de curado medio, son cementos asfálticos rebajados o diluidos a una mayor fluidez mezclándolos con destilados del tipo kerosene o el aceite diésel ligero que se evaporan a una velocidad relativamente baja. Los productos de fraguado medio tienen buenas propiedades humectantes que permiten el revestimiento satisfactorio de los agregados en forma de polvos de graduación fina.

La consistencia de los asfaltos de fraguado medio varía desde los líquidos ligeros (FM-0) hasta casi semisólidos (FM-4).

La fluidez de las diversas cualidades está controlada por la cantidad de disolvente: el FM-0 puede contener tanto diluyente como 50% en volumen y el FM-4 tanto como el 22%.

La consistencia del aglutinante después de que el disolvente se evapora depende del cemento asfáltico originalmente seleccionado, que generalmente de 85-100 grados de penetración.

La penetración del residuo de la destilación que es una medida de la dureza del asfalto en servicio, es algo superior, entre 120 y 300 grados de penetración.

### **2.2.5.3 Asfaltos rebajados de fraguado lento (FL)**

Los asfaltos rebajados de fraguado lento son destilados de petróleo con las fracciones volátiles ligeramente separadas en gran medida. Los asfaltos del fraguado lento se endurecen o fraguan muy lentamente y se emplean cuando se desea una consistencia casi igual a las del aglutinante mismo, tanto en el momento del tratamiento como después de un periodo de curación.

La consistencia de los asfaltos de fraguado lento a las temperaturas normales varían desde líquidos ligeros (FL-0), hasta semisólidos (FL-4).

#### **2.2.5.4 Cementos asfálticos (AC)**

Son hidrocarburos semisólidos que se quedan después de que los aceites lubricantes y así como también los aceites combustibles, han sido separados del petróleo.

Son los más utilizados en mezclas asfálticas. Se pueden sub clasificar bajo tres sistemas diferentes:

- ✓ Viscosidad antes del envejecimiento
- ✓ Viscosidad después del envejecimiento
- ✓ Penetración

Se prepara comercialmente en grados o rangos de consistencia con base al ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC 60-80, AC 80-100. Los números indican la penetración en decimas de milímetro, que es la distancia que una aguja normal penetra en una muestra bajo condiciones de carga, tiempo y temperatura. El ensayo de penetración es uno de los ensayos de clasificación más comunes en la clasificación de asfaltos.

La calidad más blanda comúnmente empleada para pavimentación es el de penetración 200 -300, la más dura es la penetración 30-40.

#### **2.2.5.5 Asfaltos Líquidos**

También denominados asfaltos rebajados o cutbaks, son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida por lo que se salen del campo en el que normalmente se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300. Están compuestos por una fase asfáltica y un fluidificante volátil, que puede ser bencina, kerosene o aceite. Los fluidificantes se evaporan (proceso de curado), quedando el residuo asfáltico el cual envuelve y cohesiona las partículas del agregado.

Son asfaltos líquidos los siguientes productos:

#### **2.2.5.5.1 Asfalto de curado rápido**

Cuando el disolvente es del tipo de la nafta o gasolina, se obtiene los asfaltos de curado rápido y se designan con las letras RC (Rapid Curing) seguidos por un número que indican el grado de viscosidad cinemática en centiéstokes.

#### **2.2.5.5.2 Asfalto de curado medio**

Su disolvente es kerosene, se designa con las siglas MC (Medium Curing), seguidos con un número que indican el grado de viscosidad cinemática medida en centiéstokes.

#### **2.2.5.5.3 Asfalto de curado lento**

Su disolvente o fluidificante es aceite liviano, relativamente poco volátil y se designa con las siglas SC (Slow Curing), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en centiéstokes.

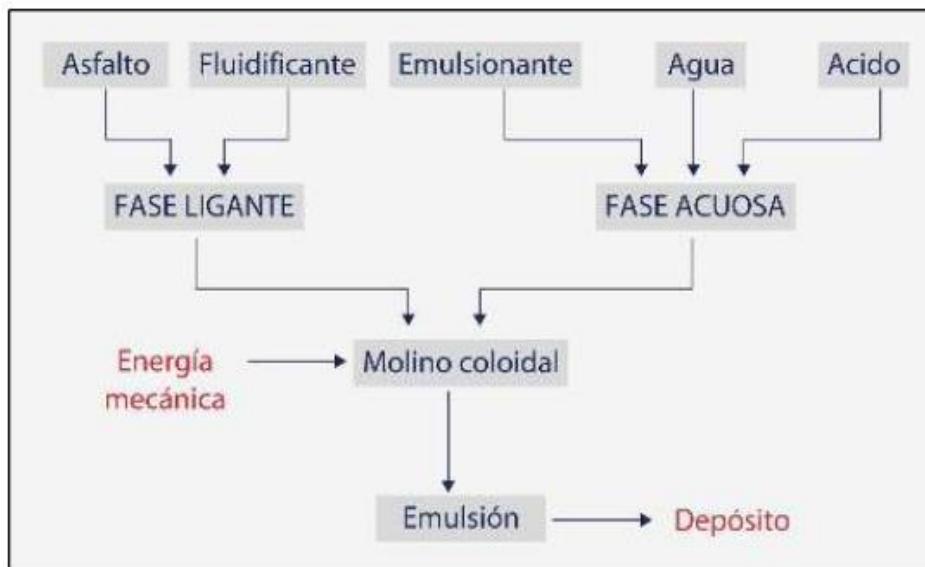
#### **2.2.5.5.4 Road Oil**

Fracción pesada del petróleo, usualmente uno de los grados de asfalto líquido en curado lento (SC).

#### **2.2.5.6 Emulsiones Asfálticas**

Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto con emulsionante, que con el agua forman una emulsión estable que permite tender las carpetas asfálticas “en frío”, es decir en temperaturas menores a 100 °C.

**Figura 2.3** Esquema de fabricación de las emulsiones asfálticas.



Fuente: [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios)

La emulsión de asfalto puede ser:

- **Emulsión Aniónica:**  
Los glóbulos del asfalto están cargados negativamente.
- **Emulsión catiónica:**  
Los glóbulos del asfalto están cargados positivamente.

### 2.2.5.7 Otros tipos de asfalto

#### ➤ Asfalto oxidado

Los asfaltos soplados u oxidados se reproducen cuando se hace pasar aire a través de los materiales asfálticos calientes, esto con el fin de darle las características necesarias para ciertos usos especiales.

Tienen punto de reblandecimiento superior a los asfaltos normalmente refinados de penetración comparable, lo que los hace adecuados para revestimientos de techos y otras aplicaciones similares.

Su uso en carreteras está limitado en gran medida a la impermeabilización de estructuras y al relleno de juntas de los pavimentos de concreto hidráulico.

➤ **Roca asfáltica**

Roca porosa como, por ejemplo, arenisca o caliza que se ha impregnado con asfalto natural a lo largo de su vida geológica.

➤ **Asfalto natural (Nativo)**

Asfalto que se da en la naturaleza y que se ha producido a partir del petróleo por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles dejando las asfálticas. Los yacimientos más importantes de asfaltos nativos se encuentran en los lagos de Trinidad y Tobago. Asfalto procedente de estos puntos se llaman frecuentemente asfalto de lago.

## 2.2.6 NORMATIVIDAD

### 2.2.6.1 Normas y ensayos aplicados a asfaltos

**Tabla 2.2** Normas AASTHO Y ASTM aplicados a asfaltos.

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Viscosidad cinemática a 135°C	T - 201	D - 2170
Viscosidad dinámica a 60°C	T - 202	D - 2171
Penetración	T - 49	D - 5
Recuperación Elástica por Torsión	*****	*****
Prueba de Película Delgada en Horno	T - 179	D - 1754
Prueba Giratoria de Película Delgada en	T - 240	D - 2872
Viscosidad Rotacional Tipo Haake	*****	D - 4402
Recuperación Elástica por Ductilómetro	*****	D - 6084
Resiliencia a 25°C	*****	D - 3407
Gravedad Específica	T - 228	D - 70
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695

Fuente: AVELLAN, M. (2007) Mezclas asfálticas modificadas

#### **2.2.6.1.1 Viscosidad ASTM D 2170 (Viscosidad del asfalto por viscosímetro capilar de vacíos)**

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación indican valores de viscosidad a temperaturas de 60 °C (140 °F) , son utilizadas para clasificar los cementos asfálticos, representa la viscosidad de este a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135 °C (275 °F) corresponde aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y su colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dados a estas dos temperaturas, ayuda a determinar si es apropiado o no para el pavimento que se está diseñando. El Poise (P) es la unidad normal de medida.

#### **2.2.6.1.2 Penetración ASTM D 5 (Penetración de materiales bituminosos)**

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean utilizados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a temperatura ambiente o 25 °C (77°F). Es aplicable a materiales con viscosidades dentro de un rango de 0,0036 a 20,00 Pascales por segundo (Pa\*s) equivalentes a 0,0036 a 20,00 Pa.

#### **2.2.6.1.3 Punto de inflamación ASTM D 92 (Punto de inflamación para materiales bituminosos)**

Es la temperatura más baja a la cual se separan los materiales volátiles de la mezcla y crean un destello en presencia de una llama abierta. Es importante hacer notar que punto de inflamación no es lo mismo que punto de combustión (temperatura mas baja a la que el cemento asfáltico se inflama y se quema). Se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro a q se inflame. El aparato usado con este fin es la Copa Abierta de Cleveland.

Es importante conocer esta información, ya que el cemento asfáltico es calentado durante su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficientemente baja para que el material pueda ser bombeado.

#### **2.2.6.1.4 Peso específico ASTM D 70 (Densidad de materiales bituminosos semisólidos)**

Es la absorción de la masa de cualquier volumen de material a la masa de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada.

El peso específico es determinado generalmente usando el método del picnómetro. Los resultados para el asfalto, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que este varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico a diferentes temperaturas.

Existen dos razones importantes por las que se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando se enfría. 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 de un pavimento compactado.

#### **2.2.7 Tipos de Asfaltos Utilizados según el clima.**

Dependiendo del proyecto, según la zona de aplicación de la mezcla, los cementos asfálticos que normalmente se emplean son del tipo C.A. 40/50; C.A. 60/70; C.A. modificado con polvo de neumático del tipo Betupen Plus 85/100; y Mobil Multigrado 120/150.

Los cementos asfálticos C.A. 40/50 y C.A. 60/70 se ocupan preferentemente en las capas inferiores; en la capa de rodado además de éstos, se usan también asfaltos modificados con polímero, del tipo Betupen Plus 85/100 o Mobil Multigrado AG.

La penetración más adecuada que debe poseer el cemento asfáltico, depende de varios factores:

- Tipo de aplicación.
- Condiciones climáticas.

**Tabla 2.3** Uso del tipo de cementos asfálticos de acuerdo a la aplicación y el clima

USO DE CEMENTOS ASFALTICOS GRADUADOS POR PENETRACION EN FUNCION AL CLIMA					
Pavimentación	CLIMA				
	Muy cálido	Cálido	Moderado	Frío	Frígido
	Trópico	Valles	Altiplano		
<b>AEROPUERTOS</b>					
Pistas de despegue	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Caminos auxiliares	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Aparcamientos	60 - 70	60 - 70	60 - 70	85 - 100	85 - 100
<b>CARRETERAS</b>					
Tráfico pesado y muy pesado	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Trafico medio ligero	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
<b>CALLES</b>					
Tráfico pesado y muy pesado	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Trafico medio ligero	40 - 50	60 - 70	85 - 100	85 - 100	120 - 150
<b>CAMINOS PARTICULARES</b>					
Industriales	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Comerciales Est. Servicio	40 - 50	60 - 70	60 - 70	85 - 100	85 - 100
Residenciales	60 - 70	60 - 70	85 - 100	85 - 100	85 - 100
<b>APARCAMIENTOS</b>					
Industriales	40 - 50	40 - 50	60 - 70	85 - 100	120 - 150
Comerciales	40 - 50	60 - 70	60 - 70	85 - 100	85 - 100

Las viscosidades más altas, que se obtienen a menores temperaturas, para los distintos tipos de cemento asfáltico, deben relacionarse de modo de asegurar un cubrimiento adecuado del agregado pétreo y la trabajabilidad apropiada para mezclar, esparcir y compactar la mezcla. La banda de viscosidades para la determinación de temperaturas de calentamiento de los cementos asfálticos, para un correcto cubrimiento del agregado durante el proceso de mezclado, varía entre 30 y 6000 cts. Para el C. A. 60/70 esta temperatura varía entre 145 y 155°C; en los asfaltos modificados Betupen Plus 85/100 y Mobil Multigrado AG esta temperatura es superior a la mencionada en alrededor de 130°C a 140°C.

La temperatura de compactación recomendable, obtenida de la relación viscosidad-temperatura, es aquella en que el cemento asfáltico tiene una viscosidad como mínimo

de 290 cts. Para el C. A. 85/100 y el Mobil Multigrado AG esta temperatura es del orden de 140°C y 150°C respectivamente para iniciar la compactación.

## **2.3 MATERIALES PETREOS**

### **2.3.1 Importancia del Agregado en una mezcla asfáltica**

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados 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 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 está usando en la planta de producción de mezcla lo cual puede comprender:

- a) Control de calidad del agregado que se produce en la planta trituradora.
- b) Acopio de agregados.
- c) Alimentación en frío 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.

### 2.3.2 Definición de agregado

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, usados 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.

Se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos. (Smith M. R. and L. Collins, 1994).

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.

#### 2.3.2.1 Tipos de agregados

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

##### **a) Agregados Naturales.**

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento.

Se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

##### **b) Agregados de Trituración.**

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

**c) Agregados Artificiales.**

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

**d) Agregados Marginales.**

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

**2.3.2.2 Propiedades de los agregados pétreos****2.3.2.2.1 Propiedades individuales**

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: Dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc. Asimismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.

**2.3.2.2.2 Propiedades en conjunto**

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

**2.3.2.3 Conceptos más frecuentes relacionados a los agregados**

- **Agregado Grueso:** Agregado que pasa el tamiz de 3'' y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- **Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200)

- **Polvo Mineral:** La porción de agregado fino que pasa el tamiz 75 $\mu$ m (No. 200)
- **Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200).
- **Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- **Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- **Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- **Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ningún 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 con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

#### 2.3.2.4 Clasificación de las rocas

##### 2.3.2.4.1 Clasificación según el tipo de formación de las rocas

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas, y metamórficas (Tabla 2.3). Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

**Tabla 2.4** Clasificación de los agregados

CLASE	TIPO	FAMILIA
SEDIMENTARIAS	CALCAREAS	Caliza
		Dolomito
	SILICEAS	Arcilla Esquiatosa
		Arenisca
		Horsteno
		Conglomerado
		Eroccia
METAMORFICAS	FOLIADAS	Gneis
		Esquisto
		Anfibolita
		Pizarra
	NO FOLIADAS	Cuarcita
		Mármol
		Serpentino
IGNEAS	INTRUSIVAS (De grano grueso)	Granito
		Sienita
		Diorita
		Gabbra
		Periodotile
		Firozarita
		Homabiendita
		Obsidiana
	EXTRUSIVAS (De grano fino)	Pómez
		Tuta
		Riolita
		Traquita
		Andesita
		Basalto
Diabesa		

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

### 2.3.2.5 Clasificación y producción de agregados

#### 2.3.2.5.1 Clasificación 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.

### **2.3.2.5.1.1 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.

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

### **2.3.2.5.1.2 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:

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

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

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimento. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

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

#### **2.3.2.5.1.3 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. El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción.

Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla 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 diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria, y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

#### **2.3.2.5.2 Naturaleza petrológica de los agregados**

Desde un punto de vista práctico, los agregados se pueden clasificar en tres grandes grupos: agregados calizos, agregados silíceos y agregados ígneos y metamórficos.

##### **2.3.2.5.2.1 Agregados Calizos.**

La roca caliza es muy común, abundante y económica en los procesos de trituración, se emplea generalmente en todas las capas de los firmes, exceptuándose en algunas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter es básico, presenta por lo regular menores problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con los ligantes asfálticos.

En mezclas asfálticas se utiliza para mejorar esta característica cuando se emplean además otro tipo de agregados, más duros pero también más ácidos (silíceos, pórfidos, entre otros).

##### **2.3.2.5.2.2 Agregados silíceos**

Los agregados silíceos procedentes de trituración de gravas naturales es otro material de amplia utilización en las todas capas de los firmes. Se extraen de yacimientos granulares, en los que las partículas de mayor tamaño se separan por cribado y a partir de ellas por machaqueos sucesivos, se obtienen fracciones de menor tamaño, con una angulosidad tanto mayor cuantas más caras de fractura presenten.

Pueden no aportar una suficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, sin embargo, si el material obtenido tiene un elevado contenido de sílice y de caras de fractura, sus características mecánicas y su rozamiento interno proporcionan un esqueleto mineral bueno para utilizarlo incluso en mezclas asfálticas sometidas a la acción directa del tráfico.

#### **2.3.2.5.2.3 Agregados ígneos y metamórficos**

Son materiales que por sus características resultan muy adecuados para utilizarlos como agregado grueso en las capas de rodadura. Pueden incluirse en este grupo los basaltos, gabros, pórfidos, granitos, cuarcitas, etc. Sus cualidades para resistir al pulimento los hacen idóneos para garantizar la textura superficial necesaria en un periodo de tiempo, incluso con tráficos muy intensos.

En este grupo tan amplio, los agregados de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, pero en la mayoría de los casos el problema se puede resolver con activantes que son sustancias que tienen la misión específica de mejorar la adhesividad con los ligantes, o también el problema se resuelve empleando emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas asfálticas, con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado.

#### **2.3.2.5.3 Producción de Agregados**

Cuando se trate de arenas o gravas, se deberá tener un cuidado especial al remover el suelo de destape (suelo que cubre el depósito) para no contaminar el agregado. Esto es particularmente importante cuando el suelo de destape (o descapote) contiene arcilla, vegetación, o algún otro material que pueda afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Puede que algún material de destape proporcione un relleno mineral aceptable; sin embargo, rara vez este material podrá producir una mezcla de agregado con la adecuada proporción de relleno mineral si tan solo se añade al depósito de agregado a medida que este es removido.

En consecuencia, cualquier material de destape que sea adecuado para ser usado como relleno mineral deberá ser removido del depósito, tamizado, y añadido posteriormente al agregado ya procesado.

Este método permite un control cuidadoso, en la mezcla final, del contenido de relleno mineral. Con cierta frecuencia, las operaciones en las excavaciones y canteras deben efectuarse alrededor de lentes de arcilla (depósitos en forma de lente), vetas (capas) de arcilla esquistosa y otros depósitos de materiales indeseables que forman parte del depósito de agregado. En este caso la excavación del agregado puede tener que efectuarse a lo largo de un marco (nivel) horizontal, o de abajo hacia arriba sobre una cara vertical del depósito, para evitar contaminación del agregado y poder garantizar una graduación uniforme. Después del triturado y el tamizado es esencial evaluar completamente los agregados producidos para averiguar si cumplen con los requisitos de calidad y graduación.

En instalaciones comerciales donde la producción de agregado es más o menos continua a través de la temporada de pavimentación, es suficiente llevar a cabo una o dos evaluaciones de calidad cada temporada. Cuando una operación está comenzando por primera vez, se deberán hacer evaluaciones periódicas del agregado antes de que este sea usado en las mezclas de pavimentación.

### **2.3.3 Acopio y manejo de agregados**

#### **2.3.3.1 Generalidades**

Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían de obra en obra, debido a que la mayoría de los contratantes no tienen claras las especificaciones para dichos procedimientos. En vez de ello el dueño del proyecto requiere, usualmente, que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación para el agregado.

Estas especificaciones tendrán que ser cumplidas ya sea durante la elaboración o acopio de reservas del agregado, o cuando la mezcla de pavimentación sea producida y colocada. En cualquier caso, el constructor deberá estar al tanto de cómo las prácticas de manejo y acopio de reservas tanto buenas y malas afectan la selección del agregado.

El muestreo y los ensayos son los únicos medios para verificar si las especificaciones están siendo cumplidas, aún si estas requieren que el agregado cumpla con graduaciones

durante la fabricación, acopio de reservas o producción de mezcla. Para garantizar que las muestras seleccionadas sean representativas, se deben seguir ciertos procedimientos de muestreo, indicados en el Ensayo “Muestreo de Agregados” AASHTO T 2-91 (2000) y su equivalente ASTM D 75-87 (1992).

### **2.3.3.2 Acopio de agregado**

Para producir mezclas asfálticas en caliente de alta calidad es esencial tener buenos procedimientos de acopio de reservas. Los agregados retienen su graduación si son adecuadamente acopiados.

Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía en los diferentes niveles del acopio. El Ingeniero deberá estar al tanto de los efectos producidos, en la graduación del agregado, por las diferentes prácticas de acopio, y siempre deberá fomentar las buenas prácticas.

El ingeniero deberá estar preparado para recibir los agregados antes de que estos sean entregados en la planta. Deberán prepararse superficies firmes y limpias, y deberán tomarse precauciones para mantener separadas las reservas y así prevenir entremezclado de partículas, el cual conduce, frecuentemente, a errores en la graduación.

La separación se logra ya sea manteniendo las reservas ampliamente espaciadas, mediante el uso de muros de contención entre ellas, o almacenando el agregado en depósitos. El uso de muros de contención requiere que estos sean lo suficiente fuertes para resistir el peso del agregado, y que se extiendan hasta la profundidad total de las reservas.

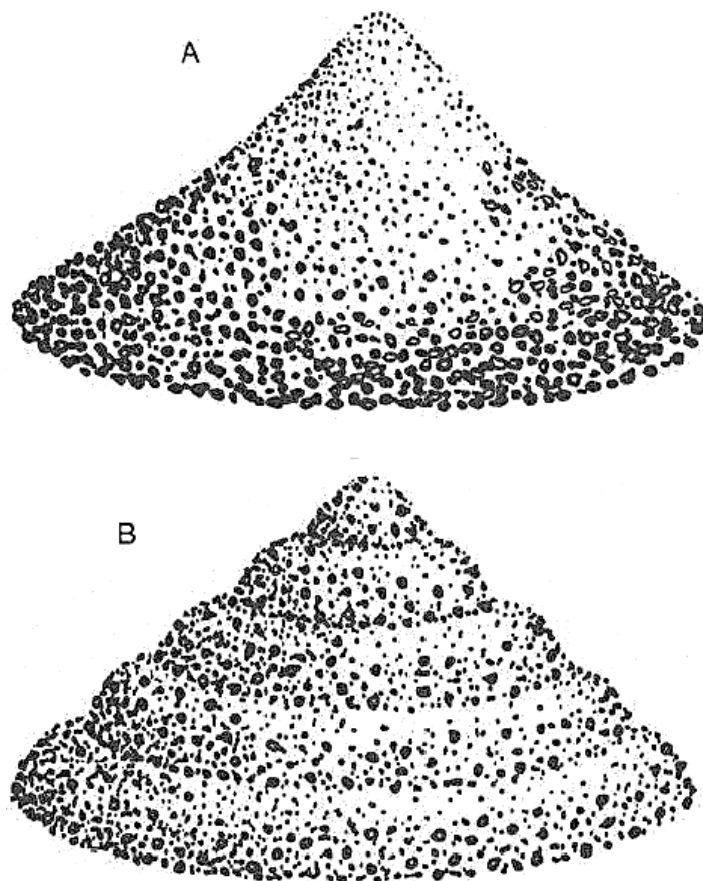
#### **2.3.3.2.1 Prácticas para la construcción de acopios**

La manera como los agregados deben ser manejados durante el acopio depende de la naturaleza misma del material. Los agregados finamente graduados (tales como arenas y materiales finos) y los de un solo tamaño no requieren el mismo cuidado en su manejo que los agregados gruesos compuestos de varios tamaños de partícula.

Las arenas, el agregado triturado fino, y los agregados de un solo tamaño (especialmente los tamaños pequeños) pueden ser manejados y almacenados casi de cualquier manera.

Las combinaciones de agregados, sin embargo, requieren de un manejo especial. Por ejemplo, si un material que contiene partículas gruesas y finas se coloca en una pila con forma de cono, es probable que presente segregación debido a que las partículas grandes van a rodar por la pendiente de la reserva (Figura 2.4.A). Esta segregación puede ser minimizada si se construye la pila en capas (Figura 2.4.B).

**Figura 2.4** Método (A) Incorrecto (B) correcto para Apilar Agregado con Partículas Grandes y Pequeñas.



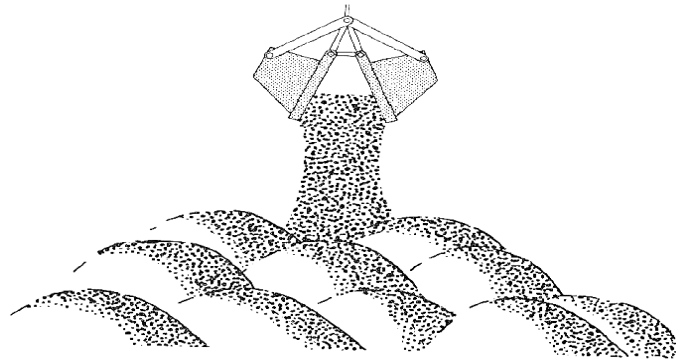
Fuente: Serie de manuales N° 22 (MS-22)

Si los agregados son transportados en camión, se puede construir una pila en capas vaciando las camionadas, una cerca de otra, sobre la superficie total del montón. El

tamaño de las camionadas determinará el espesor de cada capa. Cuando el apilamiento se hace con grúa, las cargas deberán depositarse (sin ser arrojadas) una cerca de otra para formar capas de espesor uniforme.

Cada capa deberá ser terminada antes de comenzar a apilar la capa siguiente, como lo muestra la Figura 2.5.

**Figura 2.5 Apilamiento con grúa**



Fuente: Serie de manuales N° 22 (MS-22)

### **2.3.4 Importancia del Muestreo y reducción del agregado**

#### **2.3.4.1 Importancia del muestreo del 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, y
- 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. Es muy importante, por lo tanto, tener técnicas apropiadas de muestreo, (basados en la norma AASHTO T 2-91 (2000) y su equivalente ASTM D 75-87 (1992). Las cantidades requeridas en el muestreo están indicadas en la norma (ver Tabla 2.4).

También se incluye información sobre el peso recomendado de la muestra, con base en el tamaño máximo de la partícula de agregado. Además, debe recordarse que las muestras más representativas son generalmente tomadas de las bandas transportadoras de agregado, y no de los acopios o depósitos.

**Tabla 2.5** Tamaño de muestras

Tamaño máximo Nominal del Agregado	Masa Mínima Aproximada de muestra de campo, lb (Kg)
<b>Agregado Fino</b>	
N° 8 (2.36 mm)	25 (10)
N° 4 (4.75 mm)	25 (10)
<b>Agregado Grueso</b>	
3/8" (9.5 mm)	25 (10)
1/2" (12.5 mm)	35 (15)
3/4" (19,0 mm)	55 (25)
1" (25,0 mm)	110 (50)
1 1/2" (37.5 mm)	165 (75)
2" (50 mm)	220 (100)
2 1/2" (63 mm)	275 (125)
3" (75 mm)	330 (150)
3 1/2" (90 mm)	385 (175)

Fuente: Norma AASHTO T 2-91 (2000) Con equivalencia en ASTM: D 75-87 (1992)

#### 2.3.4.2 Importancia de la reducción de agregado

Después de haber seleccionado una muestra de agregado, es a veces necesario reducir su tamaño (volumen) a uno más conveniente para que pueda ser manejada y ensayada. Debido a que este proceso de reducción puede causar segregación, es necesario tener mucho cuidado para poder preservar la integridad de la muestra. La Figura 2.7 ilustra dos ejemplos de métodos de reducción. Generalmente, es preferible usar el partididor mecánico de muestras con agregados gruesos o agregados finos secos.

Por otro lado, el cuarteo es el mejor método cuando la muestra de agregado está húmeda. La reducción de la muestra se hace en base al tamaño máximo nominal del agregado y de acuerdo a la norma AASHTO T 248-02 y su equivalente ASTM C 702-98 (2003), describe ambos métodos en detalle.

### **2.3.5 Propiedades y consideraciones de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas calientes (M.A.C.)**

#### **2.3.5.1 Consideraciones acerca del empleo de los agregados pétreos.**

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas.

**a) Naturaleza e identificación:**

Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.

**b) Propiedades geométricas:**

Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica.

**c) Propiedades mecánicas:**

Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento.

**d) Ausencia de impurezas:**

Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados sucios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación.

**e) Inalterabilidad:**

Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.

**f) Adhesividad:**

Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de activantes, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas.

**2.3.5.2 Propiedades de los agregados utilizados en M.A.C.**

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

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

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

Cada una de las propiedades mencionadas se describe a continuación:

### **2.3.5.2.1 Graduación y tamaño de la partícula**

#### **2.3.5.2.1.1 Graduación**

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente 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. 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 graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

#### **2.3.5.1.1.2 Tamaño máximo de la 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:

##### **a) Tamaño Máximo Nominal del Agregado**

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

##### **b) Tamaño Máximo del Agregado**

Designado como el 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.

### **2.3.5.2.2 Limpieza**

Para que un agregado pétreo se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa de firme, debe estar completamente limpio, libre de partículas de naturaleza orgánica, polvo o arcillas. Se establece en las normativas, que todos los finos deben tener

reducida su plasticidad e incluso que no sean plásticos en la mayoría de los casos. Las fracciones gruesas deben estar exentas de polvo, fijando los límites admisibles a través del denominado coeficiente de limpieza.

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) 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 de acuerdo a la norma AASHTO T 11-97 (2000) y su equivalente ASTM 117-95 (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 0.075 mm (No. 200). El Ensayo “Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena” (AASHTO T 176-02) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

#### **2.3.5.2.3 Dureza**

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

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de firme después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio; sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado tensional del agregado en el conjunto del firme.

Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se preparan las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material. La prueba de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos.

El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles (AASHTO T 96-2002, Equivalencia ASTM C-131-2001) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión. El equipo usado en el ensayo se muestra en la (Figura 2.8).

**Figura 2.6** Maquina de desgaste de Los Ángeles



Fuente: Laboratorio de Tacuara, Empresa Erika

#### **2.3.5.2.4 Forma de la partícula**

La forma de la partícula (Figura 2.7) afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

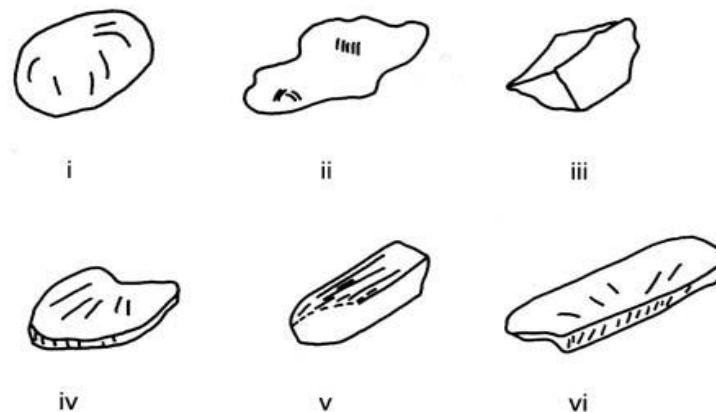
Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración.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

Las lajosas y alargadas-lajosas (agujas), pueden romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial. Se deben imponer limitaciones en el contenido de partículas de mala forma. Aparte de la forma de las partículas del agregado grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye junto a la textura superficial de las partículas, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno.

- Los agregados pétreos generalmente más deseados para la elaboración de mezclas asfálticas son aquellos con una alta proporción de partículas aproximadamente equidimensionales (cuboides). Los factores intrínsecos, como la composición de la roca afectan a la forma de los agregados durante los procesos de trituración.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como “cubicidad de las partículas” (Normas: ASTM D 692). Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de un pétreo.

**Figura 2.7** Forma de las partículas de los agregados pétreos.



**i. Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajosa, v. Alargada, vi. Alargada - Lajosa.**

Fuente: Materiales básicos en MAC. ALEJANDRO PADILLA RODRIGUEZ

#### 2.3.5.2.5 Textura superficial

La textura superficial (Figura 2.8) de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

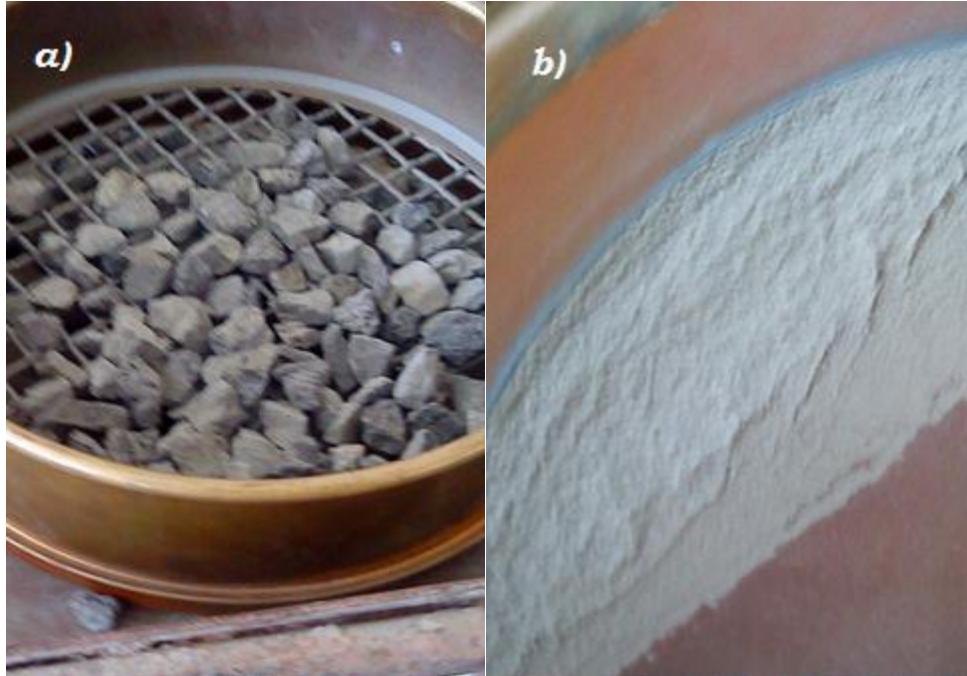
Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales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

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

**Figura 2.8 Agregado con diferentes formas y texturas superficiales**

a) Agregado grueso.

b) Agregado fino.



Fuente: Laboratorio de Tacuara, Empresa Erika

#### **2.3.5.2.6 Resistencia al pulimento.**

La resistencia al pulimento de las partículas del agregado, es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura. Para su evaluación se han desarrollado los ensayos de pulimento acelerado.

#### **2.3.5.2.7 Capacidad de absorción**

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

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo

asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos.

Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

#### **2.3.5.2.8 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 trapecanas 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 (cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con precaución.

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

La adhesividad de los agregados pétreos con los ligantes asfálticos es de gran importancia, debido a que se pueden presentar fenómenos fisicoquímicos en la

superficie de los agregados empleados en las capas de firme. En estos fenómenos complejos intervienen tanto factores físicos como la textura del agregado, la porosidad del mismo, viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, etc. Y a su vez factores químicos relativos al ligante y al agregado. Si los agregados están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por los ligantes asfálticos; sin embargo la situación es muy diferente con algo de humedad que siempre puede existir, ya que la superficie del agregado se polariza con un signo u otro dependiendo de su naturaleza.

#### **2.3.5.2.9 Peso específico**

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica) es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso. Una tonelada de agregado de bajo peso específico tiene un volumen mayor (ocupa 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 de porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado. La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego restando, de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformará la mezcla. El resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra.

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

Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente, y
- Peso específico efectivo

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de laboratorio conocido como:

➤ **Gravedad Específica y Absorción del Agregado.**

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra. El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones excepto en casos muy raros, es verdadera sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

#### **2.3.5.2.10 Alterabilidad**

Los fallos detectados en un pavimento al poco tiempo después de su puesta en servicio, comúnmente suelen ser ocasionados por procesos de alteración de los agregados en alguna de sus capas, los cuales pueden desencadenarse debido a alguna reacción química con alguno de los componentes de los ligantes asfálticos o conglomerantes, por la acción de la helada o, simplemente, por la siempre inevitable presencia de agua.

Existe la necesidad de evaluación de la alterabilidad de un agregado pétreo por el procedimiento que sea, y se pueden señalar a título indicativo, los siguientes caminos:

análisis petrográficos, acción de soluciones salinas o de agua oxigenada, ciclos hielo–deshielo, inmersión en agua y ciclos de humedad–sequedad.

#### **2.3.5.2.11 Resistencia al desprendimiento**

Los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflechado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico.

Dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos densos, de bajo contenido en huecos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante irrelevante en dicho uso.

#### **2.3.5.2.12 Aptitud para contribuir a la resistencia y rigidez de la mezcla en conjunto**

Esta propiedad se refiere tanto a los agregados gruesos, finos y polvo mineral; siempre que se cumpla que la resistencia y durabilidad intrínseca de las partículas del agregado es la adecuada a las propiedades de la masa de agregados de entrecruzado y rozamiento interno.

A este respecto tanto la angularidad como la irregularidad de la textura superficial contribuyen en gran medida a las resistencias mecánicas y a la deformación de la mezcla asfáltica.

## **2.3.6 Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño**

### **2.3.6.1 Agregado Grueso**

#### **2.3.6.1.1 Definición de agregado grueso**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4. Y según la normativa Europea UNE-EN 933-2., se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz 2 mm.

#### **2.3.6.1.2 Características y propiedades deseables de los agregados gruesos para su utilización en las mezclas asfálticas.**

##### **✓ Granulometría**

La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para encajar una granulometría dentro de algún Huso normalizado se parte de fracciones uniformes que se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado; el procedimiento es análogo al que se emplea para suelos.

El tamaño máximo de los agregados viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad.

En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia la fracción de tamaño inferior a

63 $\mu$ m, llamada, como se ha indicado, polvo mineral o filler, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen del mástico formado por la unión del polvo mineral y del ligante asfáltico.

✓ **Rozamiento interno**

La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados. También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor de primer orden.

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante asfáltico o conglomerante. La cohesión entre las partículas suele ser despreciable, y cuando existe se debe únicamente a la plasticidad de la fracción fina, y en general es más nociva que útil. Sólo interesa una cierta plasticidad de los finos y muy reducida de todas formas, cuando se trata de capas granulares no revestidas en caminos de baja intensidad de tráfico.

✓ **Angulosidad del agregado grueso**

La angulosidad del agregado grueso beneficia al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. El empleo de agregados triturados trae consigo el aumento de la angulosidad de las partículas. La mayoría de las normativas establecen un mínimo de angulosidad del agregado grueso, dependiendo de las condiciones de tráfico al que va a estar expuesto el pavimento.

### ✓ **Forma del agregado grueso**

Las exigencias de forma para el agregado grueso varían ligeramente, con un mismo tráfico, para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas planas, alargadas y en forma de lascas, ya que como lo hemos dicho antes, este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

Existen restricciones en las normativas de materiales para pavimentos en donde se restringe el uso de partículas con estas formas no deseadas, por medio de los índices de lascas y de agujas de las distintas fracciones del árido grueso.

### ✓ **Resistencia a la fragmentación de los agregados gruesos**

Los agregados pétreos deben de cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo que da una orientación del comportamiento que tendrá dicho agregado dentro de la mezcla asfáltica al entrar en servicio el pavimento.

### ✓ **Resistencia al pulimento del agregado grueso para capas de rodadura**

En el ensayo de Pulimento Acelerado, determina el grado de pulimento del agregado o coeficiente de pulido acelerado con el mismo péndulo de fricción con el que se mide el coeficiente de rozamiento en una superficie de rodadura. El coeficiente de pulido acelerado depende fundamentalmente de la naturaleza petrográfica de la roca origen, fue diseñado como un medio para predecir la susceptibilidad de una piedra al pulido cuando se utiliza como ya lo hemos dicho en la capa de rodadura de un pavimento flexible.

### ✓ **Limpieza del agregado grueso**

El agregado grueso deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

El contenido de impurezas del agregado grueso, según las normativas deberá ser mínimo, algo muy aproximado al cinco por mil (0,5%) en masa. Aunque se podrá exigir su limpieza por lavado, aspiración u otros, y realizando una nueva comprobación. La exigencia anterior podría cuestionarse considerando que en las plantas asfálticas modernas existen poderosos sistemas para extraer el polvo e impurezas del agregado. Sin embargo en una secuencia lógica de exigencias de calidad y prevenciones, la limpieza inicial del agregado está totalmente justificada.

### ✓ **Adhesividad del agregado grueso**

El agregado grueso tiene un comportamiento específico respecto a la adhesividad y a la resistencia al desplazamiento. Se preconiza la comprobación de la adhesividad agregado y ligante mediante una evaluación global de resistencia conservada en los ensayos de inmersión – compresión, o de pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro. Estos criterios se refieren obviamente a las propiedades de las mezclas terminadas más que a la caracterización inicial de los materiales simples: agregados y ligantes.

En cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad agregado–ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Se enmarcan unos parámetros mínimos en los valores de inmersión – compresión según el tipo de mezcla asfáltica a utilizar. Se podrá mejorar la adhesividad entre el agregado y el ligante asfáltico mediante activantes o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. Se establecerán las especificaciones que tendrán que cumplir dichos aditivos y las mezclas resultantes.

## **2.3.6.2 Agregado Fino**

### **2.3.6.2.1 Definición de agregado fino.**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200. Y según la normativa Europea UNE-EN 933-2, se define como agregado fino, a la parte

del agregado pétreo total que pasa el tamiz 2 mm. y queda retenido en el tamiz 0.063 mm.

#### **2.3.6.2.2 Características y propiedades deseables de los Agregados Finos para su utilización en las mezclas asfálticas**

##### **✓ Procedencia del agregado fino**

El agregado fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales. Existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas. Regularmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos con una baja intensidad de tráfico y a bajos niveles de cargas, se deberá señalar la proporción máxima de arena natural no triturada, a emplear en la mezcla, la cual regularmente no será superior al 10% de la masa total del agregado combinado y sin que supere el porcentaje de agregado fino triturado empleado en la mezcla, la limitación de la cantidad de arena rodada o no triturada que puede incorporarse a la mezcla, se hace por temor a una disminución de la rigidez final de ésta. Hay autores y administraciones que consideran que una proporción del orden del 10% puede mejorar al tiempo la manejabilidad, la compacidad e incluso la estabilidad de la mezcla.

##### **✓ Limpieza del agregado fino**

El agregado fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas, para evitar que se presenten comportamientos extraños del material dentro de la mezcla, tales como reacciones químicas, pérdida de estabilidad de la mezcla, abundamientos, entre otros.

##### **✓ Resistencia a la fragmentación del agregado fino**

El material que se triture para obtener agregado fino deberá cumplir las condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste Los Ángeles.

Se recomienda usar agregado fino de otra naturaleza, que mejore alguna característica, especialmente la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de agregado grueso con coeficiente de desgaste de Los Ángeles inferior a 25 para capas de rodadura e intermedias y a 30 para capas de base.

#### ✓ **Adhesividad del agregado fino**

Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino – ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o químico – físicas en las partículas de menor tamaño son más complejas. Su mayor superficie específica, facilidad para acumular humedad y gran heterogeneidad de su naturaleza determinan una mayor sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, fenómenos polares y de adhesividad, absorción, etc.

### **2.3.6.3 Polvo mineral (Filler)**

#### **2.3.6.3.1 Definición de Polvo mineral (Filler)**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200. Y según la normativa Europea UNE-EN 933- 2., se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz 0.063 mm.

El fíller o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mástico para mezclas asfálticas. Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. Cuando se utiliza el otro tipo de filler, (de recuperación), que es aquel que se obtiene de las plantas asfálticas, no se sabe exactamente cuáles son sus componentes y en ocasiones varía su composición con el tiempo y puede estar o no, dentro de las normativas, debido a que es un residuo.

### 2.3.6.3.2 Características deseables o de mayor interés acerca del polvo mineral (filler)

Las características que más suelen interesar de un polvo mineral son:

#### ✓ **Finura**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico. El polvo mineral consigue cumplir con su función rellenadora, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

La densidad aparente del polvo mineral en Tolueno es una medida relativa del grado de finura del polvo, cualidad muy importante para las características finales de las mezclas. La densidad aparente del polvo mineral, en algunas normas aparece comprendida entre cinco y ocho decigramos por centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm<sup>3</sup>).

#### ✓ **Modificación del comportamiento reológico**

El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

#### ✓ **Acción estabilizante frente al agua**

Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular evitando el acceso del agua al interior, y por otro lado debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la

resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico.

Las características de finura y comportamiento reológico se hayan vinculadas el tamaño y forma de las partículas. La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales. Las funciones del polvo mineral no pueden apartarse del contenido y consistencia del ligante asfáltico en la mezcla.

#### ✓ **Procedencia del polvo mineral**

El polvo mineral podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado de aquéllos como un producto comercial o especialmente preparado.

Las proporciones del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deben cumplir lo que fijen las normas, debido a que es un material que se debe de utilizar en proporciones adecuadas en cada tipo de mezcla y condiciones, para obtener un resultado óptimo.

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los agregados tras su paso por el secador de la planta de asfalto en ningún caso podrá rebasar ciertos límites que algunas normas contienen, este valor está aproximadamente dentro del dos por ciento (2%) de la masa de la mezcla. Si se asegurase que el polvo mineral procedente de los agregados cumple las condiciones exigidas al de aportación, se podrá rebajar la proporción mínima de éste.

#### **2.3.6.3.3 Propiedades del polvo mineral (filler) como componente de las mezclas asfálticas**

En la interfase filler-asfalto y en el comportamiento de la mezcla asfáltica, tienen que ver las propiedades físicas y químicas tanto como las características geométricas, propiedades de superficie, adsorción, adhesión, etc.

La irregularidad geométrica (forma, angulosidad y textura de superficie), es uno de los aspectos más importantes en el papel del fíller dentro de la mezcla. La irregularidad geométrica afecta directamente el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, a las características de interfase del mástico y a su comportamiento reológico. Todos estos aspectos influyen directamente en el comportamiento estructural y mecánico de las mezclas.

La irregularidad geométrica se puede evaluar cualitativamente y cuantitativamente mediante el microscopio electrónico, y caracterizar la forma, angulosidad, textura superficial y la porosidad accesible de las partículas.

Para la caracterización físico-química del fíller y su influencia en el comportamiento y durabilidad de las mezclas asfálticas, el factor más significativo es la intensidad de adsorción. En los sistemas fíller-asfalto, existe adsorción entre un sólido y una fase viscosa, los factores que influyen más en el mecanismo de adsorción son la composición del asfalto y las propiedades del fíller, es decir, su composición mineralógica, sus características estructurales, la textura superficial y la superficie específica, el tipo de adsorción depende del tipo de fíller principalmente, todos los procesos de adsorción son exotérmicos y la cantidad de calor liberado depende del carácter de la interacción entre los átomos y moléculas adsorbidos y de la superficie del sólido.

El efecto que se logra en un pavimento a partir de la utilización de un fíller activo en la dosificación de la mezcla asfáltica, es que aumenta considerablemente su durabilidad.

Existen fílleres activos como cal hidratada y dolomíticos que suelen mantener su resistencia en periodos de tiempo largos de tiempo en condiciones de contenido óptimo de asfalto, mientras que los fílleres no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarse rápidamente, también bajo condiciones de contenido óptimo de asfalto.

El contenido de asfalto tiene sus repercusiones en la durabilidad de una mezcla, se sabe que un incremento en el contenido de asfalto tiene un efecto favorable significativo en la durabilidad de los pavimentos, este efecto se debe principalmente, a que las capas de asfalto que recubren los agregados son más gruesas y a la reducción en el volumen de

huecos, que hace disminuir la penetración del agua a las capas. La mejora en la durabilidad con el incremento de contenido de asfalto no es uniforme debido a que depende del tipo de fíller involucrado en la mezcla.

Las propiedades de los fílleres tienen un efecto muy importante en la durabilidad potencial de las mezclas asfálticas, el efecto del fíller suele manifestarse, si es activo suele mantener resistencia por más tiempo que si no es activo.

La durabilidad potencial de la mezcla asfáltica suele mejorar con un incremento en el contenido de asfalto por encima del óptimo básico, es decir las condiciones óptimas de durabilidad se obtienen para contenidos de asfalto superiores al óptimo convencional, en este caso las muestras con fílleres no activos resultan ser más sensibles al contenido de asfalto que en aquellas que contienen filleres activos.

## **2.3.7 Análisis Granulométrico**

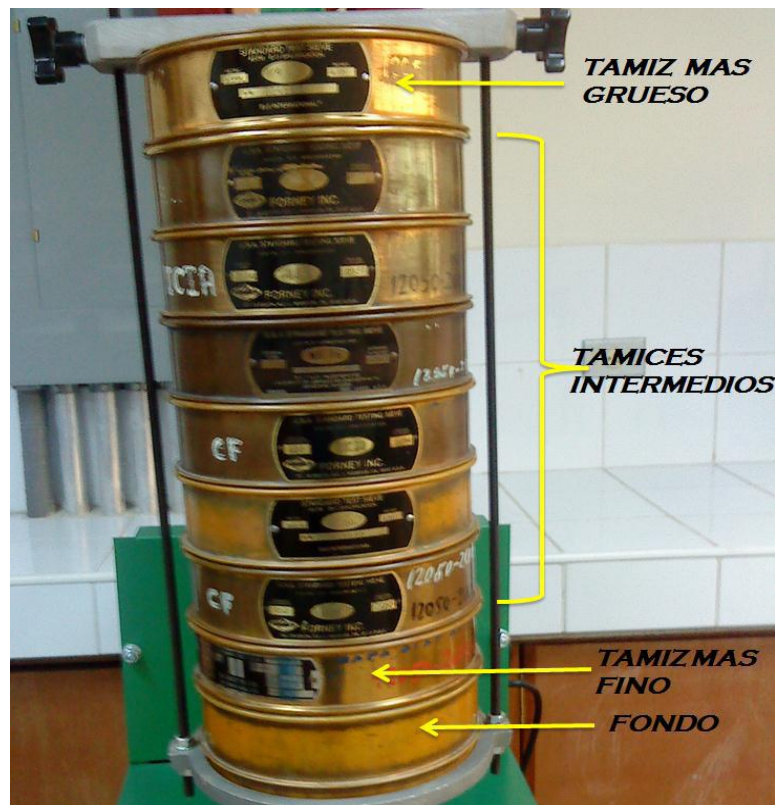
### **2.3.7.1 Definición e Importancia de una buena granulometría del agregado**

La granulometría de una base de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas. Esta granulometría se determina haciendo pasar una muestra representativa de agregados por una serie de tamices ordenados, por abertura de mayor a menor.

La granulometría de los agregados es un factor muy importante en las mezclas asfálticas, ya que de este factor depende la economía, manejabilidad y resistencia de la mezcla.

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 (Figura 2.10).

**Figura 2.9** Juego de tamices



Fuente: Laboratorio de Tacuara, Empresa Erika

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.

El análisis o prueba de tamices se lleva a cabo tamizando los agregados a través de una serie de tamices enumerados. Estos tamices están en números ascendentes, esto es #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y bandeja para los agregados finos; y en orden descendente 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", #4, #8 y bandeja para los agregados gruesos. El número de los tamices indica las aberturas de los tamices por pulgada lineal.

El uso de los tamices dependerá de la precisión que se requiera o de las especificaciones técnicas, ya que en ocasiones solo se utilizarán algunos de ellos. Se conoce como agregado fino a todo aquel que pasa a través del tamiz de 3/8" y el #4 y es retenido casi

completamente en el tamiz #200. Agregado grueso es aquel que se retiene en el tamiz #4.

Los resultados de un análisis granulométrico también se representan en forma gráfica y en tal caso se llaman curvas granulométricas.

Estas graficas se representan por medio de dos ejes perpendiculares entre si, horizontal y vertical, en donde las ordenadas representan el porcentaje que pasa y en el eje de las abscisas la abertura del tamiz cuya escala puede ser aritmética, logarítmica o en algunos casos mixta. Las curvas granulométricas permiten visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados y permite conocer además que tan grueso o fino es.

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. La Tabla 2.5 ilustra cinco tipos diferentes de concreto asfáltico y sus contenidos respectivos de agregado.

**Tabla 2.6** Composición típica del concreto asfáltico

Tamaño de Tamiz	Designación de la mezcla usando el Tamaño Máximo Nominal del Agregado				
	37,5 mm 1 1/2 in	25,4 mm 1 in.	19,0 mm 3/4 in.	12,5 mm 1/2 in.	9,5 mm 3/8 in.
	Porcentaje Total que Pasa (en Peso)				
<b>50 mm (2 in)</b>	100	-	-	-	-
<b>37,5 mm (1 1/2 in)</b>	90 - 100	100	-	-	-
<b>25,0 mm (1 in)</b>	-	90 - 100	100	-	-
<b>19,0 mm (3/4 in)</b>	56 - 80	-	80 - 100	100	-
<b>12,5 mm ( 1/2 in)</b>	-	56 - 80	67 - 85	90 -100	100
<b>9,50 mm ( 3/8 in)</b>	-	-	60 - 77	-	90 - 100
<b>4,75 mm (N° 4)</b>	23 - 53	29 - 59	43 - 54	44 - 74	55 - 85
<b>2,36 mm (N° 8)</b>	15 - 41	19 - 45	-	28 - 58	32 - 67
<b>1,18 mm (N° 16)</b>	-	-	29 - 45	-	-
<b>0,60 mm (N° 30)</b>	-	-	-	-	-
<b>0,30 mm (N° 50)</b>	4 - 16	5 - 17	14 - 25	5 - 21	7 - 23
<b>0,15 mm (N° 100)</b>	-	-	8 - 17	-	-
<b>0,075 mm (N° 200)</b>	0 - 5	1 - 7	4 - 8	2 - 10	2 - 10
<b>Cemento Asfáltico, porcentaje en peso del total de la mezcla</b>	<b>3 a 8</b>	<b>3 a 9</b>	<b>4 a 10</b>	<b>4 a 11</b>	<b>5 a 12</b>

Fuente: Serie de manuales N° 22 (MS-22)

Las especificaciones de granulometría de agregado para una obra dada pueden ser presentadas gráficamente. La Figura 2.11 muestra un gráfico típico de granulometría. En el gráfico, los tamaños de los tamices se muestran horizontalmente tanto en unidades métricas como en unidades habituales.

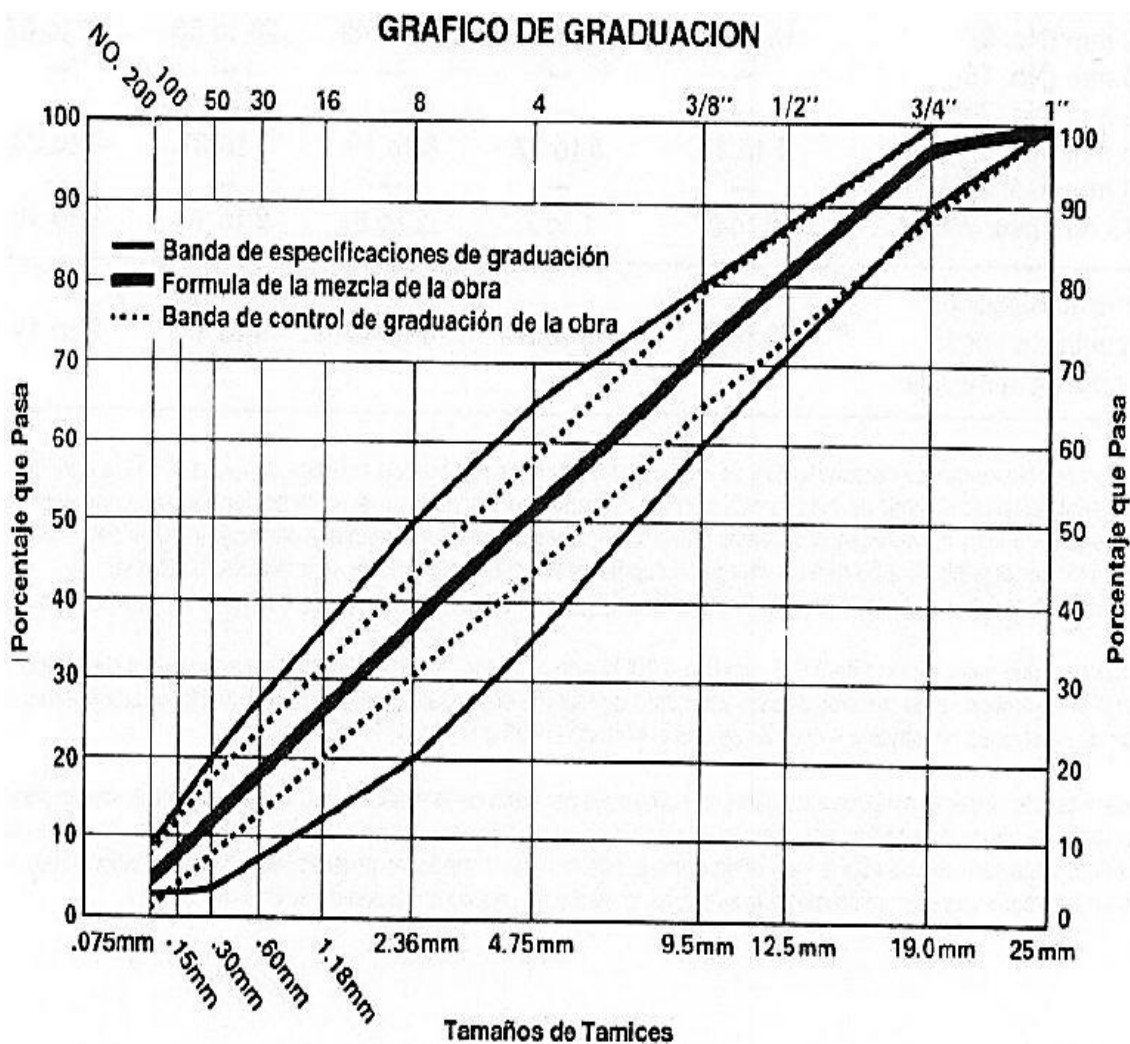
El porcentaje de material que pasa se muestra verticalmente. Las especificaciones para una obra dada están representadas por la región que está entre las líneas sólidas delgadas. La fórmula de la mezcla de pavimentación está representada por la línea sólida gruesa. La banda de control de granulometría para la obra - establecida como referencia para controlar la granulometría en la obra - está situada dentro de la región encerrada por las líneas punteadas.

Examinemos, usando la (Figura 2.11), que nos dice un gráfico de granulometría. Tomando el tamiz de 9.5 mm (3/8 pulgada) como ejemplo, podemos observar que la banda de control de graduación permite que pase, por este tamiz, el 65 a 80 por ciento

de agregado. La fórmula de la mezcla de la obra requiere que el 72 por ciento de agregado pase a través del tamiz de 9.5 mm (3/8 pulgada).

Sin embargo, el margen usado durante el mezclado y la construcción está entre el 65 y el 80 por ciento (material pasando el tamiz). Un gráfico de granulometría permite que el inspector comprenda, rápida y fácilmente, las graduaciones requeridas por la banda de especificaciones, por la fórmula de mezcla de la obra, y por la banda de control de graduación de la obra.

**Figura 2.10** Grafico Típico de una Granulometría Exponencial y Ejemplo de una Banda de Granulometría.



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

En la norma ASTM E 11-95 se encuentran los tamices para laboratorio para análisis granulométrico en general. En la Tabla 2.6 se muestran los tamaños y números de tamices más frecuentemente usados en la graduación de agregado para mezclas asfálticas de pavimentación.

**Tabla 2.7** Tamaños típicos de tamices

Designación de tamices para agregados gruesos		Designación de tamices para agregados finos	
Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano	Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano
63 mm	2 1/2 in	2,36 mm	N° 8
50 mm	2 in	1,18 mm	N° 16
37,5 mm	1 1/2 in	0,60 mm	N° 30
25,0 mm	1 in	0,30 mm	N° 50
19,0 mm	3/4 in	0,15 mm	N° 100
12,5 mm	1/2 in	0,075 mm	N° 200
9,50 mm	3/8 in		
4,75 mm	N° 4		

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

### 2.3.7.2 Métodos utilizados para determinar la granulometría

Los dos métodos usados para determinar la graduación de agregados son: tamizado en seco, para “Análisis por Tamizado de Agregados Fino y Grueso” (AASHTO T 27-99 Con equivalencia en ASTM C 136-01) y tamizado por lavado, para “Materiales más Finos que Pasan el Tamiz de 75- $\mu$ m (No. 200) en Agregado Minerales por Lavado, (AASHTO T 11-97 (2000) Con equivalencia en ASTM C 117-95). El tamizado en seco se usa generalmente con material agregado de graduación gruesa. Sin embargo, cuando las partículas de agregado están cubiertas de polvo o material limo-arcilloso, se debe efectuar un tamizado por lavado.

#### 2.3.7.2.1 Tamizado en seco

Se usa generalmente con material agregado de graduación gruesa. Sin embargo, cuando las partículas de agregado están cubiertas de polvo o material limo-arcilloso, se debe efectuar un tamizado por lavado.

- Las muestras para el tamizado son reducidas por medio de un “cuarteador” de muestras, o mediante cuarteo manual.
- Los material finos y gruesos son separados usando un tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- Las muestras son secadas hasta un peso constante.
- Las muestras finas y las muestras gruesas son tamizadas separadamente.
- El peso de las fracciones (porciones) retenidas en cada tamiz, y en el plato que esta al final de los tamices, es registrado, así como la graduación de cada muestra (parte fina y parte gruesa).
- En la norma (AASHTO T 27-99 y ASTM C 136-01) se puede encontrar el procedimiento para tamizado en seco.

## **2.3.8 Especificaciones para los agregados utilizados en mezcla asfáltica caliente diseñadas por el método Marshall**

### **2.3.8.1 Especificaciones técnicas**

Son aquellas que se utilizan para establecer los requisitos de calidad de los materiales pétreos que son utilizados para la elaboración del esqueleto de una carpeta asfáltica, ya que es el agregado que proporcionará la mayor resistencia a las cargas que ejercerá el tráfico he aquí la importancia de presentar las mejores propiedades establecidas en normas, disposiciones tanto internacionales como nacionales, relativos a la ejecución de la obra.

Proveen de un lenguaje común, preciso, y libre de ambigüedades que regula y facilita las interrelaciones que se darán entre las personas involucradas en el proyecto. Las especificaciones técnicas a su vez recurren a normas ya desarrolladas internacionalmente (Ej. ASTM, AASHTO o FP, etc.), que conforman un estándar de terminologías, ensayos, patrones, etc. que facilitan y hacen útil la experiencia ingenieril en el intercambio de conocimientos tecnológicos a nivel internacional, así como la facilitación de licitaciones internacionales, enmarcadas en la globalización comercial.

Las especificaciones técnicas están incluidas y juegan un papel importante en los documentos de licitación y contratación del contratante (propietario).

### 2.3.8.2 Requisitos que deben cumplir los agregados

#### 2.3.8.2.1 Agregado Grueso.

Este 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:

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

No deben usarse agregados con caras pulidas o agregados que contengan carbonato soluble. El residuo insoluble debe ser menor del 25%, de acuerdo a ASTM D 3042.

#### 2.3.8.2.2 Agregado fino.

Este 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:

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

##### 2.3.8.2.2.1 Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29.

La graduación del agregado fino será conforme a la graduación en la **Tabla 2.7** para el número de graduación especificado en la orden, u otra graduación designada por el comprador.

**Tabla 2.8** Requerimiento de graduación para agregado fino

Tamaño de Tamiz		Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación N° 1	Graduación N° 2	Graduación N° 3	Graduación N° 4	Graduación N° 5
<b>3/8"</b>	9,5 mm	100	-	-	100	100
<b>N° 4</b>	4,75 mm	95 - 100	100	100	80 - 100	80 - 100
<b>N° 8</b>	2,36 mm	70 - 100	75 - 100	95 - 100	65 - 100	65 - 100
<b>N° 16</b>	1,18 mm	40 - 80	50 - 74	85 - 100	40 - 80	40 - 80
<b>N° 30</b>	0,60 mm	20 - 65	28 - 52	65 - 90	20 - 65	20 - 65
<b>N° 50</b>	0,30 mm	7 - 40	8 - 30	30 - 60	7 - 40	7 - 46
<b>N° 100</b>	0,15 mm	2 - 20	0 - 12	5 - 25	2 - 20	2 - 30
<b>N° 200</b>	0,075 mm	0 - 10	0 - 5	0 - 5	0 - 10	-

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Secretaria de Integración Económica Centroamericana.

### 2.3.8.2.3 Granulometría de agregados combinados (finos y gruesos).

Consiste en la combinación de diferentes tamaños de agregado, que debe llenar los requisitos siguientes:

- |   |       |
|---|-------|
| (1) Granulometría   | Tabla |
| 2.8   |       |
| (2) Grumos de arcilla y partículas friables, AASHTO T 112                             | 1%    |
| máx.  |       |
| (3) Libre de materiales vegetales, basura, terrones, arcilla y sustancias deletéreas. |       |

## **2.3.9 Ensayos realizados a los agregados pétreos para ser utilizados en mezclas asfálticas calientes**

### **2.3.9.1 Análisis por tamizado de agregados grueso y fino. (AAHSTO T 27- 99) (ASTM C 136-01)**

#### ***Resumen del método***

Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, para la determinación de la distribución de tamaño de las partículas. Los resultados se usan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas, según los requisitos especificados y para proporcionar información necesaria en el control de la producción de agregados y mezclas que contienen agregados. La información también puede ser usada en el desarrollo de relaciones concernientes a la porosidad y empaque.

### **2.3.9.2 Partículas planas, partículas alargadas, o partículas planas y alargadas en agregado grueso. (ASTM C 4791-99)**

#### ***Resumen del método***

Este método de ensayo cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas, o partículas planas y alargadas en agregados gruesos. Los valores declarados en unidades de libra-pulgada deben ser considerados como el estándar excepto con atención al tamaño del tamiz y al tamaño de agregado. Las partículas individuales de agregado de un tamaño específico de tamiz es medido para determinar las relaciones de ancho a espesor, de largo a ancho, o largo a espesor.

### **2.3.9.3 Finos plásticos en agregado graduado y suelos por el uso del ensayo del equivalente de arena. (AAHSTO T 176- 02) (ASTM D 2419)**

#### ***Resumen del método***

La intención de éste ensayo es que sirva como una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados. A un volumen determinado de suelo o agregado fino se le adiciona una pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro de plástico graduado y agitándolos para que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa. La muestra es entonces "irrigada", usando una cantidad adicional de solución floculante, para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena.

Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El "equivalente de arena" es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

### **2.3.9.4 Gravedad específica y absorción del agregado fino. (AAHSTO T 84-00) (ASTM C 128-97)**

#### ***Resumen del método***

Se toma una muestra representativa de agregado fino la cual se sumerge durante 15 horas. Al día siguiente se expande la muestra sobre la superficie de un recipiente o bandeja la cual no es absorbente. Con el secador se le inyecta una corriente de aire hasta conseguir un secado uniforme, la operación es terminada cuando los granos del agregado están sueltos. Luego se introduce la muestra en un molde cónico, se apisona unas 25 veces dejando caer el pisón desde una altura aproximada de 1 cm, posteriormente se nivela y si al quitar el molde la muestra se deja caer es porque no existe humedad libre, si es lo contrario se sigue secando y se repite el proceso hasta que cumpla con la condición. Cuando se cae el agregado al quitar el molde cónico es porque se ha alcanzado una condición saturada con superficie seca.

Se procede a tomar una muestra de 500 gramos del agregado para envasarla en el picnómetro llenándolo con agua a 20°C hasta más o menos 250 cms<sup>3</sup>, luego se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles. Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor. Al término de este paso, se embaza la muestra en tazas para ser dejadas en el horno por espacio de 24 horas. Y por último, al día siguiente se llevaron las muestras a la balanza y su cuantifico su valor. Se tomaron apuntes.

#### **2.3.9.5 Gravedad específica y absorción del agregado grueso. (AAHSTO T 85-91)(2000) (ASTM C 128-88)(1993)**

##### ***Resumen del método***

Los agregados muestreados sumergirlos en agua por aproximadamente 15 horas hasta llenar esencialmente los poros. Entonces removerlos del agua, secar el agua superficial de las partículas, y pesar. Seguidamente tomar la muestra y pesarla mientras se sumerge en agua. Finalmente las muestras son secadas en el horno y pesada por tercera vez. Usando la masa y peso de las mediciones obtenidas, y las fórmulas del método, es posible calcular los tres tipos de gravedad específica y la absorción.

#### **2.3.9.6 Resistencia al desgaste de agregado grueso de tamaño pequeño por impacto y abrasión en la máquina los Ángeles. (AAHSTO T 96-2002) (ASTM C 131-2001)**

##### ***Resumen del método***

Este ensayo es una medida al desgaste de los agregados minerales de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto, y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número especificado de esferas de acero, el número de esferas depende de la graduación de la muestra de ensayo. A medida que el tambor gira, una lámina del estante recoge la muestra y las esferas de acero, llevándolos de un lado hacia el otro hasta dejarlos caer en el lado opuesto del tambor, creando un efecto de aplastamiento e impacto. Los contenidos entonces ruedan dentro del tambor con una acción de desgaste y

pulverización, hasta que la lámina del estante recoge la muestra y las esferas de acero, en ciclos repetitivos. Después del número prescrito de revoluciones, los contenidos son removidos del tambor y la porción del agregado es tamizada para medir el desgaste como un porcentaje de pérdida.

## **2.4 DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA CALIENTE CON EL METODO MARSHALL**

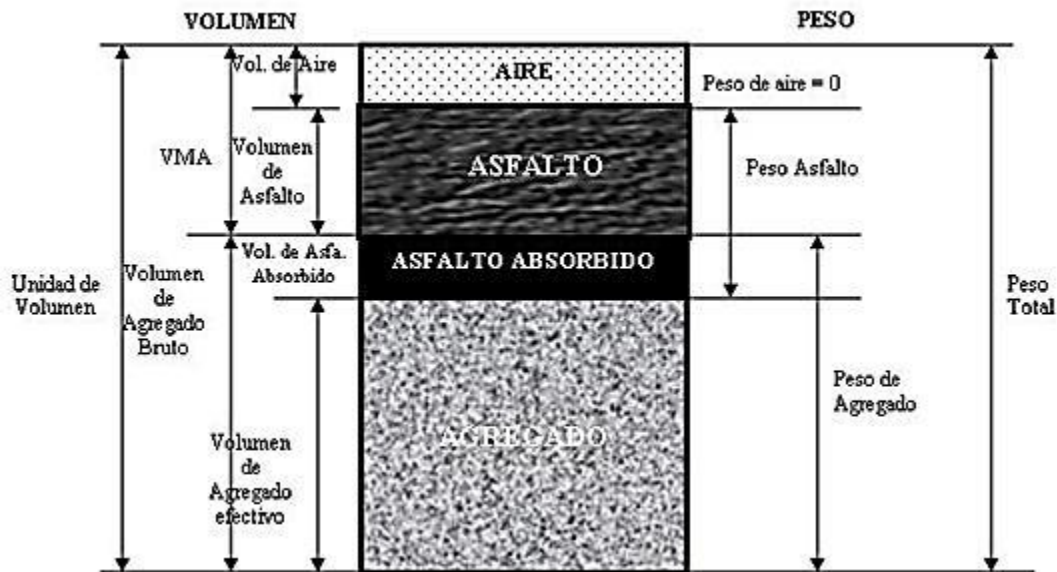
### **2.4.1 Contenido óptimo de cemento asfáltico**

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con espesor suficiente para resistir los elementos de interperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad.

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas.

Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca (Figura 2.12). Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

**Figura 2.11** Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.



Fuente: Strategic Highway Research Program SHRP A-369, 1994.

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

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

En las mezclas asfálticas, es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo; ya que en una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tal que sea suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa

ya que además de resultar antieconómica puede provocar una pérdida en la estabilidad dentro de la carpeta, además este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie.

Es conveniente que las partículas tengan la forma más cubica posible, por lo que no deben utilizarse materiales que contengan una cantidad grande de partículas en forma de lascas o de agujas, pues tienden a romperse con facilidad y así cambia la granulometría.

## **2.4.2 Características de la mezcla (Analizando el método Marshall)**

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

### **2.4.2.1 Densidad**

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb/ft}^3$ ), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$  o  $62.416 \text{ lb/ft}^3$ ). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar el grado de compactación del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

#### **2.4.2.2 Vacíos de aire**

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico.

El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico.

A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

#### **2.4.2.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Estos son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto.

Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado.

Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

#### **2.4.2.4 Vacíos llenos de asfalto (VFA)**

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

### **2.4.3 Método de diseño Marshall**

#### **2.4.3.1 Metodología**

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

#### **2.4.3.2 Propósito de la Metodología**

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método

puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

#### **2.4.3.3 Descripción General**

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 2.9 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

#### **2.4.3.4 Especificaciones de la Metodología**

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este apéndice. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 2.10). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

**Tabla 2.9** Criterios del Instituto del Asfalto para el Diseño Marshall

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO		TRANSITO MEDIANO		TRANSITO PESADO	
	CARPETA Y BASE		CARPETA Y BASE		CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	<b>Ver tabla 2.11</b>					
% VFA	70	80	65	78	75	85

**NOTAS**

1 Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 OC, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 OC, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas más bajas de ensayo.

## 2 Clasificaciones del Transito

Liviano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño < 104

Mediano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106

Pesado Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño > 106

3 Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.

4 Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

5 Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

6 El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

**Fuente:** Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

**Tabla 2.10** Porcentaje Mínimo de VMA

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

1 Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

2 El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

3 Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

**Fuente:** Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

#### 2.4.3.5 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño.

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado este dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados.

#### **2.4.3.5.1 Lineamientos Generales para Ajustar las Mezclas de Prueba.**

##### **➤ Bajo contenido de vacíos y estabilidad baja**

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento.

Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

##### **➤ Bajo contenido de vacíos y estabilidad satisfactoria**

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional. Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de

asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en la sección 2.4.3.4 sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

➤ **Contenido satisfactorio de vacíos y estabilidad baja**

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

➤ ***Contenido alto de vacíos y estabilidad satisfactoria***

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través de la mezcla asfáltica pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

➤ ***Vacíos altos y estabilidad baja***

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos

anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales.

#### **2.4.4 Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada**

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

##### ***2.4.4.1 Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas de Pavimentación***

Se determina la gravedad específica teórica máxima Gmm de acuerdo a la norma AASHTO T 209-05, de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; de preferencia en un rango en donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo. Una vez hecho lo anterior, se pueden determinar los valores de Gmm para los distintos contenidos de asfalto que se utilizan en el diseño, empleando fórmulas de aproximación tal como lo describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su manual de métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente.

##### ***2.4.4.2 Determinación de la gravedad específica bulk***

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

#### ***2.4.4.3 Resistencia de Mezclas Bituminosas al Flujo 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 Newtons (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.

#### ***2.4.4.4 Análisis de Densidad y Vacíos***

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la

gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

## **2.4.5 Dosificación de Agregados**

### **2.4.5.1 Dosificación**

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es muy fácil elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados, por su puesto se debe tener la granulometría de cada agregado a ser combinado. Estos métodos son descritos a continuación acompañados de ejemplos para hacer más fácil su comprensión.

### **2.4.5.2 Método analítico**

#### **2.4.5.2.1 Dosificación Para Dos Agregados**

La fórmula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = G * a + F * b + M * c \dots etc \qquad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

P=es el porcentaje de material que pasa un tamiz dado para la combinación de agregados, G, F, M, etc...

G, F, M, etc...= porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados G, F, M, etc...

a, b, c, etc...= proporciones de agregados G, F, M, etc. Usadas en la combinación y cuyo total es 1.

El proceso de dosificación resulta relativamente simple cuando se trata de la mezcla de dos agregados; tal es el caso uno grueso y por consiguiente el otro fino, identificados como G y F respectivamente. Una primera aproximación se obtiene al calcular el porcentaje que se requiere del material fino (F) de forma tal que se cumpla con la media de la especificación para el tamiz No. 200.

Por lo tanto la Ecuación para dos agregados es:

$$P = G * a + F * b \quad \text{Ec. 2}$$

Debido a que:

$$a + b = 1 \quad \text{Ec. 3}$$

Sustituyendo y despejando b tenemos:

$$b = \frac{P-G}{F-G} \quad \text{Ec. 4}$$

También tenemos para a:

$$a = \frac{P-G}{G-F} \quad \text{Ec. 5}$$

## 2.5 MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA

### 2.5.1 Definición de mezcla asfáltica modificada

Una **mezcla asfáltica Modificada** en general es una combinación de la mezcla asfáltica tradicional con otro tipo de elementos a los normalmente conocidos en su composición. Su función es alterar las características mecánicas, las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso, la cual debe presentar resultados más óptimos en su aplicación.

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando son sometidas a niveles elevados de tránsito y de gradientes de temperatura. En el mundo, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología.

La modificación de Mezclas asfálticas es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de las mezclas asfálticas en la pavimentación de vías. En este proyecto de estudio, la técnica consiste en la adición de lechada de cemento en una mezcla asfáltica tradicional, sin material pétreo fino, con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones o Estabilidad Marshall.

Los agentes modificadores utilizados en los Mezclas asfálticas, mejoran el comportamiento reológico de los mismos. Se puede decir que una mezcla asfáltica modificada es una mezcla de ligante hidrocarbonado y agregado grueso ya consolidado sin fino, la cual experimentara una interacción física y/o mecánica al ser alterada con lechada de cemento, la cual cumplirá la misión de rellenar los vacíos existentes entre el agregado grueso y la película de asfalto.

En general un agente modificador de una mezcla asfáltica debe lograr:

- Disminuir la susceptibilidad térmica.
- Aumentar la cohesión interna.
- Mejorar la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas.
- Mejorar el comportamiento a fatiga.
- Aumentar la resistencia al envejecimiento.

## **2.5.2 Lechada de Cemento o Mortero de Cemento**

### **2.5.2.1 Definición**

Es un Mortero de cemento que contiene una gran cantidad de agua que le da la consistencia de un líquido viscoso y permite ser utilizado para rellenar cavidades y juntas entre materiales adyacentes.

El diseño tradicional de lechadas de cemento, se fundamenta en una relación masa sobre volumen y el agua como aditivo modificador de la densidad, en función de aumentar o disminuir su concentración en la lechada. Esto ocasiona que el cemento ya fraguado desarrolle poca resistencia a la compresión, poco homogéneo muy permeable y poroso, reduciendo las posibilidades y condiciones propicias para la obtención de un adecuado sello hidráulico.

El aglomerante es en la mayoría de las ocasiones cemento (generalmente cemento Portland) mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos (que se clasifican en grava, gravilla y arena). La sola mezcla de cemento con arena y agua (sin la participación de un agregado) se denomina mortero.

La teoría del concreto líquido o lechada, ha sido tomada de la industria de la construcción, con el objeto de subsanar o ayudar en la solución para lograr mejores diseños, desde el punto de vista de capacidad resistente, así como permitir mejorar otros parámetros derivados de la teoría, como son homogeneidad, permeabilidad y porosidad. En el presente proyecto, la lechada de cemento posee la función de rellenar los vacíos existentes en la mezcla asfáltica abierta, para de tal formar la mezcla asfáltica modificada deseada.

Con la rigidez que brindara la lechada de cemento dentro de la flexibilidad de la mezcla asfáltica, se espera que esto ayude a incrementar la resistencia a las deformaciones; ya la principal característica estructural de una lechada es su resistencia a los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos dicho objetivo será medido mediante la estabilidad Marshall, esperando que los resultados logrados sean aptos para ser aplicados en trabajo.

#### **2.5.2.2 Características mecánicas**

La principal característica estructural de una lechada es su resistencia a los esfuerzos de compresión, pese a su consistencia de líquido viscoso que posee. Sin embargo, tanto su resistencia a tracción como al esfuerzo cortante son relativamente bajas, por lo cual se debe utilizar en situaciones donde las solicitaciones por tracción o cortante sean muy bajas.

Los aditivos permiten obtener lechadas de alta resistencia; la inclusión de monómeros y adiciones que son utilizados en el hormigón, aportan de la misma manera múltiples mejoras en las propiedades mecánicas de una lechada.

#### **2.5.2.3 Clasificación de la lechada de cemento o morteros**

Las lechadas de cemento o morteros pueden clasificarse de acuerdo a los siguientes parámetros:

- **Según la forma como endurecen**
  - ✓ Mortero aéreo
  - ✓ Mortero Hidráulico
  
- **Según los materiales que lo componen**
  - ✓ Mortero calcáreo
  - ✓ Mortero de cal y cemento portland
  - ✓ Mortero de yeso

➤ **Según su utilización**

- ✓ Mortero de pega
  - Mampostería simple
  - Mampostería reforzada
  
- ✓ Mortero de relleno
  - Relleno fino
  - Relleno grueso

El mortero a utilizar en este proyecto poseerá las siguientes características, las cuales le darán el aspecto de lechada de cemento, el cual será usado de relleno dentro de la mezcla asfáltica abierta:

- ✓ Será un mortero de cemento:

Estos morteros son utilizados con cemento Portland. Ofrecen alta resistencia, tanto iniciales como después de su endurecido. Las condiciones de trabajabilidad de la mezcla está directamente relacionada con la cantidad de cemento. A menor cemento, será más áspera e intrabajable.

- ✓ El relleno será realizado con agregado de granulometría fina, cuyas características físico mecánicas son las mismas que las utilizaran en el diseño de la mezcla asfáltica tradicional.
  
- ✓ La consistencia del mortero de cemento tendrá un porcentaje de fluides de 130%, la cual le dará el aspecto de lechada de cemento.

#### **2.5.2.4 Composición de la lechada de cemento**

##### **2.5.2.4.1 Cemento**

Los cementos son productos que amasados con agua fraguan y endurecen formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua.

Hay varios tipos de cementos. Las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresa en forma de sus óxidos, y que según cuales sean formaran compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación.

Cada tipo de cemento está indicado para unos usos determinados; también las condiciones ambientales determinan el tipo y clase del cemento afectando a la durabilidad de los hormigones. Los tipos y denominaciones de los cementos y sus componentes están normalizados y sujetos a estrictas condiciones. La norma española establece los siguientes tipos: cementos comunes, los resistentes a los sulfatos, los resistentes al agua de mar, los de bajo calor de hidratación, los cementos blancos, los de usos especiales y los de aluminato de calcio. Los cementos comunes son el grupo más importante y dentro de ellos el portland es el habitual. En España sólo pueden utilizarse los cementos legalmente comercializados en la Unión Europea y están sujetos a lo previsto en leyes específicas.

### **Cemento Portland**

Se define como Cemento Portland al material compuesto principalmente de Silicato tricálcico, Silicato Dicálcico, Aluminato tricálcico y Ferroaluminato Tetracálcico, capaz de endurecer en presencia de agua, de allí su nombre, y que una vez endurecido genera resistencia a la compresión, como resultado de la hidratación que tiene lugar, que involucra reacciones químicas entre el agua y los compuestos químicos presentes, y no por un proceso de deshidratación como generalmente se cree. El desarrollo de su resistencia es predecible, uniforme y rápido, generándose un cuerpo sólido con una baja permeabilidad, e insoluble en el agua, propiedades estas que lo permiten lograr y mantener el aislamiento zonal, que es el objetivo principal de una cementación.

#### **2.5.2.4.2 Relación agua cemento**

La **relación agua-cemento**, también conocida como **razón agua/cemento**, *a/c*, es uno de los parámetros más importantes de la tecnología del hormigón, pues influye grandemente en la resistencia final del mismo.

Expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento.

Dado que el peso del agua utilizada siempre es menor que el peso del cemento, el guarismo resultante es menor que la unidad.

Una relación agua/cemento baja, conduce a un hormigón de mayor resistencia que una relación agua/cemento alta. Pero entre más alta esta relación, el hormigón se vuelve más trabajable.

La menor relación a/c para obtener una hidratación completa del cemento se considera igual a 0,58.

## CAPITULO III

### NORMATIVA SOBRE LOS MATERIALES

#### 3.1 DATOS DEL AGREGADO PÉTREO

##### 3.1.1 Agregados provenientes de la Chancadora Tacuara

Esta chancadora de material pétreo se encuentra a 4 km en el cruce hacia la comunidad de Cañas, sobre la vía que une a la ciudad de Tarija con Chaguaya. Perteneciente al municipio de Padcaya en la provincia Arce, a una altura de 2041 msnm. Este sitio se encuentra ubicado a orillas del río Camacho, el cual baña el paisaje de esta zona.

La chancadora es productora de agregado en diferente granulometría, como ser ripio desde  $\frac{3}{4}$ " ,  $\frac{3}{8}$ " hasta la producción de agregado fino. El agregado de  $\frac{3}{4}$ " está siendo usado en la actualidad para la producción de mezcla asfáltica.

**Figura 3.1** Imágenes de la Chancadora Tacuara



### **3.1.2 Geología**

El agregado del río Camacho es de procedencia sedimentaria, siendo un material de arrastre producido por las crecidas de este afluente.

Este tipo de agregado es de orden de los calcáreos, perteneciente a la familia de las Calizas.

### **3.1.3 Muestreo de materiales pétreos de la Chancadora Tacuara empleando la norma ASTM D 75 (AASHTO T-2)**

#### **3.1.3.1 Objetivo**

Este ensayo cubre el muestreo de agregados gruesos y finos para las siguientes finalidades:

- Investigación preliminar de fuentes potenciales de suministro.
- Control del producto en la fuente de suministro.
- Control de operaciones en el sitio de empleo.
- Aceptación o rechazo de materiales.

#### **3.1.3.2 Toma de muestras**

- El muestreo es tan importante como el ensayo, y, quien realice esta labor tomara todas las precauciones para obtener muestras que exhiban la verdadera naturaleza y condición de los materiales que ellas presentan.
- Las muestras para ensayos de investigación preliminar son obtenidas por la parte responsable de la explotación de una fuente potencial. Las muestras de materiales para el control de la producción de origen o control de trabajo en el lugar de empleo son obtenidas por el productor, contratista u otras personas responsables de verificar el trabajo. Las muestras para ensayos que no utilicen en la decisión de aceptación o rechazo por parte del comprador, las obtendrá el comprador o su representante autorizado.
- Donde sea viable, las muestras para calidad se tomaran del producto terminado. Las muestras para ensayos de desgaste, tomadas de productos terminados, no

serán sometidas a una posterior trituración o reducción manual del tamaño de sus partículas a fin de prepararlas para tal ensayo, a menos que el tamaño de partículas, del producto terminado, sea tal que requiera una mayor reducción para fines del ensayo.

### **3.1.3.3 Muestreo**

#### **3.1.3.3.1 Muestreo de correas transportadoras**

Se seleccionan las unidades de producción a ser muestreadas mediante un procedimiento al azar. Se obtienen tres porciones, por lo menos, aproximadamente iguales y tomadas al azar, de la unidad que está siendo muestreada y se las combina para formar una muestra de campo cuyo peso iguale o exceda un mínimo recomendado.

Se detiene la correa transportadora mientras se toman los incrementos de muestra. Se colocan dos plantillas sobre el flujo de agregado de la correa y que estén espaciadas lo suficiente para que el material, que queda entre ellas, tenga el peso requerido para una de las porciones de la muestra.

**Figura 3.2** Banda transportadora de agregado pétreo



### 3.1.3.3.2 Muestreo de acopios

Siempre que sea posible se evitara tomar muestras de acopios, particularmente cuando el muestreo se haga con la finalidad de determinar propiedades del agregado que pueden depender de la granulometría de la muestra. Si, por otra parte, las circunstancias imponen la obtención de muestras de una pila de acopio de agregados gruesos o de una de agregados gruesos y finos combinados, se preparara un plan de muestreos para el caso específico que este considerado.

**Figura 3.3 Acopio de material pétreo**



### 3.1.4 Peso específico y absorción de los agregados finos empleando la norma ASTM C 128 (AASHTO T-84)

#### 3.1.4.1 Objetivo

Este ensayo se lo realiza para determinar el peso específico a granel, el peso específico aparente y la absorción del agregado. El peso específico a granel es el valor utilizado generalmente para cálculos relacionados con la dosificación de hormigones de cemento Portland, y en este estudio será utilizado en la dosificación del mortero o lechada de cemento.

### 3.1.4.2 Procedimiento

- Se introduce en el picnómetro 500 g. de agregado fino y se lo llena con agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad. Se hace rodar al picnómetro, agitándolo u invirtiéndolo, con el objeto de eliminar todas las burbujas de aire.
- Si es necesario se ajusta su temperatura mediante la calibración del frasco mediante su curva de calibración.
- La muestra se secura hasta peso constante, es decir que no perderá más de 0,1 por ciento de humedad después de 2 horas de secado a la temperatura especificada.

### 3.1.4.3 Cálculos

Para el cálculo del peso específico del material impermeable de las partículas se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Peso específico} = \frac{a}{x + b - f}$$

Para el cálculo del porcentaje de absorción se utiliza la siguiente formula:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{x - a}{a} * 100$$

Dónde:

x=Peso de la muestra saturada con superficie seca, en gramos.

a= Peso de la muestra seca, en gramos.

b=Peso del picnómetro lleno de agua, en gramos

f=Peso del picnómetro con la muestra saturada, en gramos.

### 3.1.4.4 Resultados

**Tabla 3.1** Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado fino

DESCRIPCION	Unidad	Muestra	Muestra	Muestra	Promedio	
		1	2	3		
Peso frasco seco vacío (u)	grs.	155,8	155,7	156,1		
Peso frasco + muestra (f)	grs.	655,8	656,1	655,4		
Peso de muestra SSS (x)	grs.	500	500	500		
Peso de muestra seca (a)	grs.	488,5	489,1	488,8		
Peso de agua (t)	grs.	322,2	323,2	323,1		
Peso de muestra más agua (b)	grs.	640,5	642,1	641,5	Mortero	Asfalto
P. E. de agregado seco ( $a/((x+t)-b)$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2,69	2,70	2,69	2,69	
P. E. de agregado SSS ( $x/((x+t)-b)$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2,75	2,76	2,75	2,76	2,69
P.E. Aparente ( $a/(a+t)-b$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2,87	2,87	2,87	2,87	
% de Absorción ( $(x-a)/a*100$ )	%	2,35%	2,23%	2,29%	2,29%	2,29%

### 3.1.5 Peso específico y absorción de los agregados gruesos empleando la norma ASTM C 127 (AASSHTO T - 85)

#### 3.1.5.1 Objetivo

- Este método determina el peso específico a granel, y aparente y el peso específico a granel a base del peso del agregado grueso en condición de superficie seca saturada, y la absorción.

#### 3.1.5.2 Procedimiento

- Después de lavar totalmente la muestra para eliminar el polvo y otras sustancias de la superficie de las partículas, se la seca hasta peso constante a temperatura del horno a  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ), se enfría en aire a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas, luego se coloca en inmersión, en agua a temperatura ambiente, durante un periodo mínimo de 15 horas.

- Se saca la muestra del agua y se la hace secar. Se tendrá cuidado para evitar que se evapore el agua de los poros del agregado durante la operación de sacado de las superficies. Se pesa la muestra en la condición de saturada a superficie seca, se registra este, y los subsiguientes con la aproximación de 1,0 gramo.
- Después de pesar, colocar inmediatamente la muestra en condición saturada a superficie seca en un recipiente para la muestra y determinar su peso en agua a temperatura estándar a  $20 \pm 1,7$  °C ( $75,4 \pm 3$ °F). Se tendrá cuidado en sacar todo el aire atrapado antes de pesar, agitando, el recipiente mientras está sumergido.
- Se seca la muestra hasta peso constante a una temperatura en el horno de  $110 \pm 5$ °C, se enfría a temperatura ambiente, entre 1 a 3 horas y se pesa.

### 3.1.5.3 Cálculos

Para el cálculo del peso específico del material impermeable de las partículas se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Peso específico} = \frac{f}{f - g}$$

Para el cálculo del peso específico de las partículas saturadas con superficie seca se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Peso específico} = \frac{e}{e + g}$$

Para el cálculo del peso específico de las partículas secas se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Peso específico} = \frac{f}{e - g}$$

Para el cálculo del porcentaje de absorción se utiliza la siguiente formula:

$$\% \text{ absorcion} = \frac{e - f}{f} * 100$$

Dónde:

e= Peso de la muestra saturada con superficie seca, en gramos

f= Peso de la muestra seca, en gramos

g= Peso del picnómetro con la muestra saturada, en gramos

### 3.1.5.4 Resultados

**Tabla 3.2** Resultados del ensayo de pesos específicos y absorción del agregado grueso.

DESCRIPCION	Unidad	Muestra	Muestra	Muestra	Promedio	
		1	2	3		
Peso muestra SSS (e)	grs.	5000	4870	4625		
Peso material seco (f)	grs.	4935	4812	4568,4		
Peso muestra + cesto susp. en agua	grs.	4563	4487	4126,3		
Peso de cesto suspendido en agua	grs.	0	0	0		
Peso de muestra suspendida en agua (g)	grs.	3093	3017	2870,4	Mortero	Asfalto
P.E. del agregado seco (f / (e-g))	gr/cm <sup>3</sup>	2,59	2,60	2,60	2,60	
P. E. de agregado SSS (e/(e-g))	gr/cm <sup>3</sup>	2,62	2,63	2,64	2,63	2,64
P.E. Aparente (f/ (f-g))	gr/cm <sup>3</sup>	2,68	2,68	2,69	2,68	
% de Absorción ((e-f)/f)*100	%	1,32%	1,21%	1,24%	1,25%	1,25%

### 3.1.6 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos aplicando la norma ASTM C 136 (AASHTO T 27)

#### 3.1.6.1 Objetivo

Esta norma de ensayo se refiere a un procedimiento de la distribución por tamaño de las partículas de agregados gruesos y finos, utilizando tamices de abertura cuadrada. No es aplicable para usar el análisis por tamizado de agregados recuperados de mezclas bituminosas ni para el análisis granulométrico de rellenos minerales.

#### 3.1.6.2 Procedimiento

- Las muestras serán sometidas en primer lugar, al procedimiento de la norma AASTHO T 11. Este procedimiento puede omitirse si no se requiere conocer la cantidad total de material menor que el tamiz de 0,075 mm (Nº 200) y si las

exigencias de precisión para el análisis granulométrico no requieren en lavado de las partículas.

Todas las muestras de agregados grueso y finos, donde el porcentaje de humedad absorbida cambia para los diferentes tamaños de partículas, serán secadas hasta sustancialmente peso constante a una temperatura en el horno de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . Las muestras de agregado grueso, donde el porcentaje de humedad absorbida es esencialmente constante para los diferentes tamaños de partículas, pueden tamizarse con superficie seca.

- Se obtiene el tamaño máximo nominal del agregado a especificar, o describir un agregado, que es la abertura del tamiz mínima a través de la cual pasa la cantidad total del agregado.
- Se obtiene el Tamaño máximo nominal del agregado a especificar, o describir un agregado, que es la abertura del tamiz mínima a través de cual pasa la cantidad total del agregado.

**Tabla 3.3** Tamaño máximo nominal

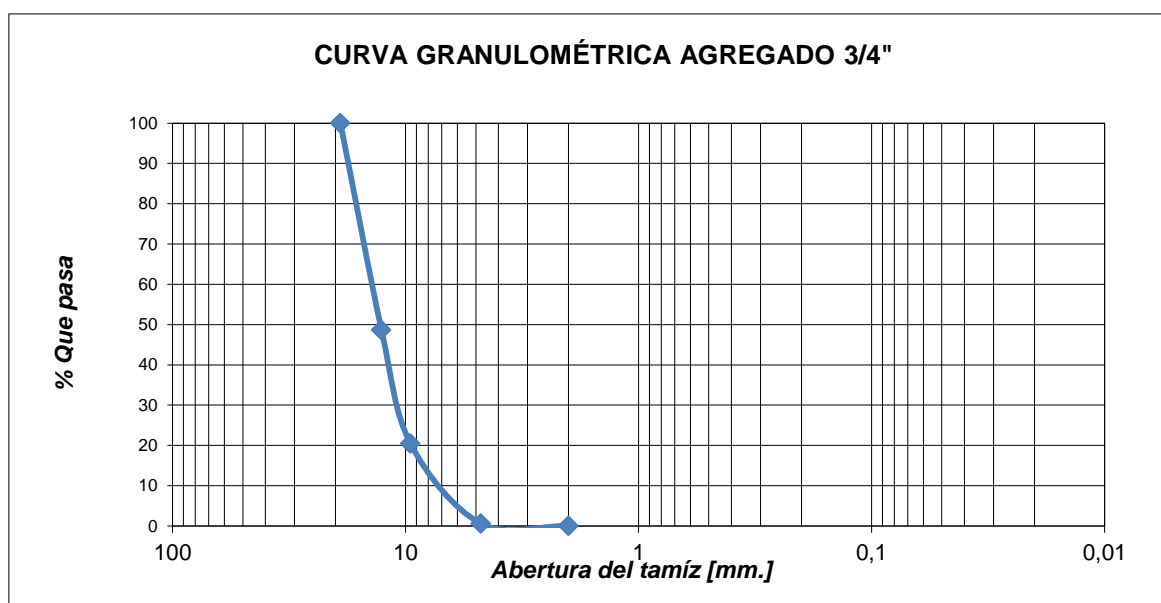
<b>Tamaño Máximo nominal de las partículas</b>		<b>Peso mínimo de la muestra</b>
<b>mm</b>	<b>(“)</b>	<b>Kg.</b>
9,5	3/8	1
12,5	1/2	2
19	3/4	5
25	1	10
37,5	1 1/2	15
50	2	20
63	2 1/2	25
75	3	30
90	3 1/2	35

- La muestra será preparada en una serie de tamaños, utilizando los tamices que sean necesarios para cumplir con las especificaciones del material bajo ensayo. La operación de tamizado será llevada a cabo mediante el movimiento vertical y lateral del tamiz, acompañado de una acción de percusión que mantenga la muestra moviéndose continuamente sobre la superficie del tamiz. Se puede realizar el movimiento de los tamices por medio de un agitador mecánico o manualmente. El tamizado se continuara hasta que no más del 0,5 %, por peso, de la muestra pase por cualquier tamiz pase durante 1 minuto de tamizado manual.

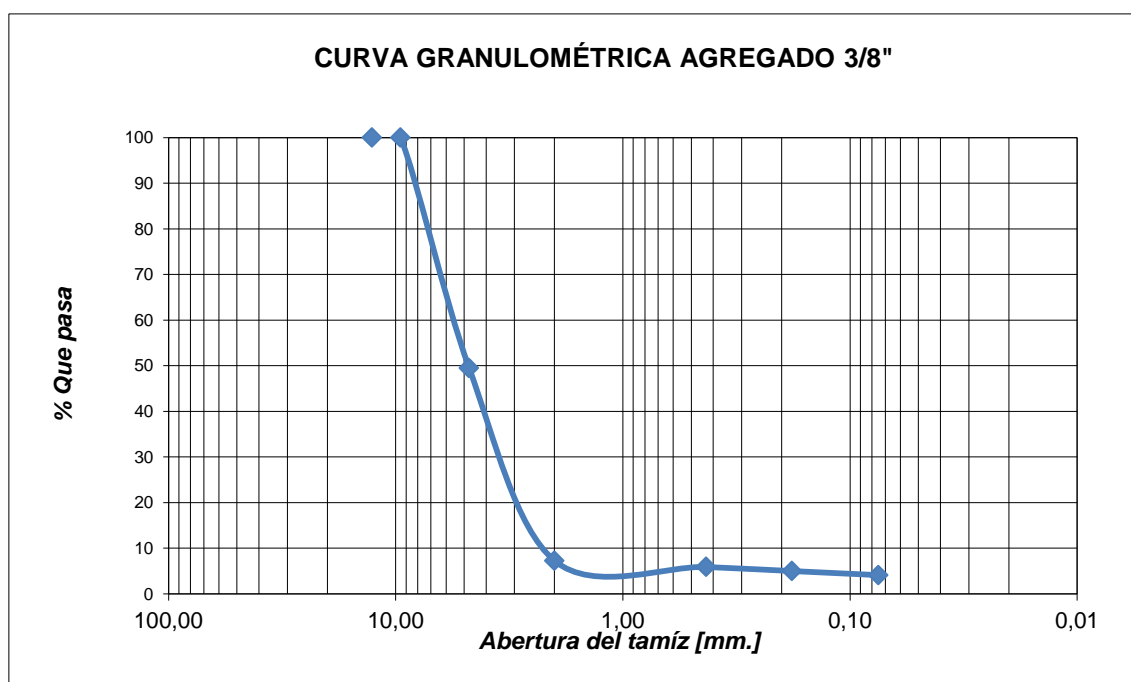
### 3.1.6.3 Resultados

**Tabla 3.4 Granulometría de los agregados grueso de  $\frac{3}{4}$ "**

N° Ensayo	Fecha	Origen	% QUE PASA				
			3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10
			<b>19,05</b>	<b>12,7</b>	<b>9,53</b>	<b>4,75</b>	<b>2</b>
1	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,0	48,47	20,52	0,57	0,00
2	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,0	48,46	20,48	0,52	0,02
3	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,0	48,46	20,51	0,56	0,01
4	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,0	48,42	20,44	0,54	0,06
5	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,0	49,69	20,33	0,72	0,05
<b>Numero de ensayos</b>			<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Valor Máximo</b>			100	49,69	20,52	0,723	0,062
<b>Valor Mínimo</b>			100	48,42	20,33	0,524	0
<b>Promedio</b>			<b>100</b>	<b>48,7</b>	<b>20,45</b>	<b>0,584</b>	<b>0,029</b>
<b>Desv. Estándar</b>			0	0,553	0,079	0,079	0,027

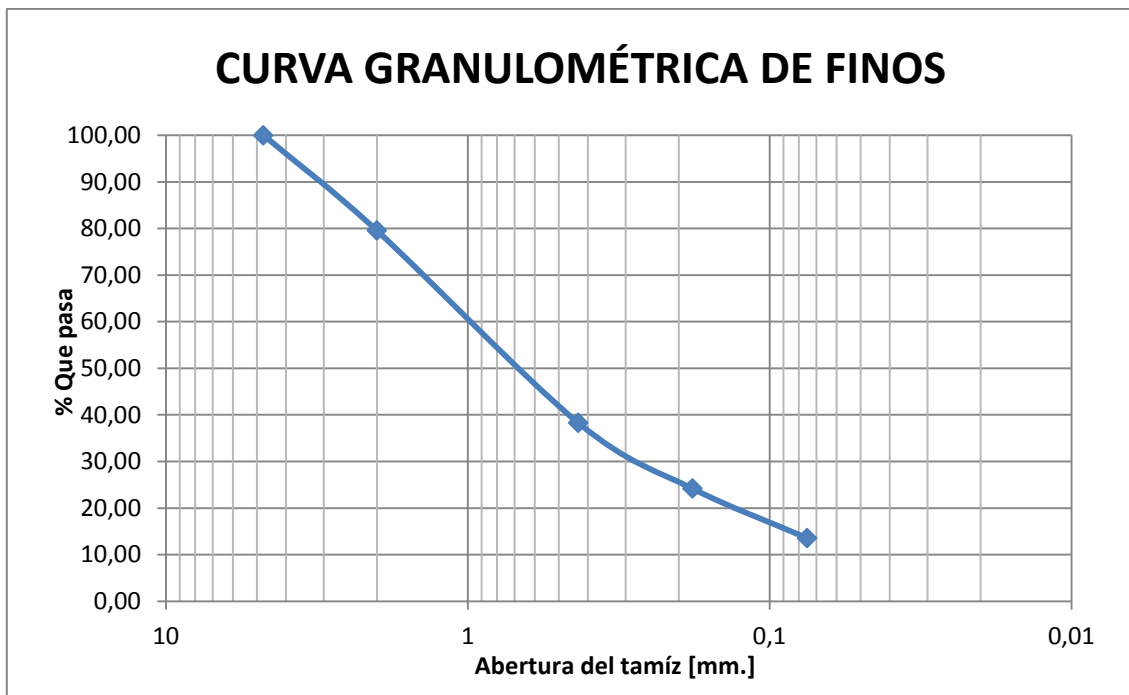
**Cuadro 3.1** Curva granulométrica del agregado 3/4"**Tabla 3.5** Granulometría del agregado medio de 3/8"

N° Ensayo	Fecha	Origen	% QUE PASA						
			1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
			<b>12,7</b>	<b>9,525</b>	<b>4,75</b>	<b>2</b>	<b>0,43</b>	<b>0,18</b>	<b>0,075</b>
1	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	100,00	49,39	7,02	5,61	4,67	3,77
2	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	100,00	49,50	7,22	5,76	4,76	3,81
3	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	100,00	49,64	7,52	6,22	5,52	4,73
4	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	100,00	49,46	7,13	5,67	4,79	3,78
5	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	100,00	49,58	7,43	6,14	5,22	4,38
<b>Numero de ensayos</b>			<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Valor Máximo</b>			100,00	100,00	49,64	7,52	6,22	5,52	4,73
<b>Valor Mínimo</b>			100,00	100,00	49,39	7,02	5,61	4,67	3,77
<b>Promedio</b>			<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>49,51</b>	<b>7,26</b>	<b>5,88</b>	<b>4,99</b>	<b>4,10</b>
<b>Desv. Estándar</b>			0,00	0,00	0,10	0,21	0,28	0,36	0,44

**Cuadro 3.2** Curva granulométrica del agregado de 3/8"**Tabla 3.6** Granulometría del agregado fino

N° Ensayo	Fecha	Origen	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
			4,75	2	0,43	0,18	0,075
1	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	79,52	37,94	24,00	13,87
2	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	79,56	38,93	24,75	14,16
3	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	79,51	37,93	24,01	13,88
4	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	79,54	35,90	22,35	12,21
5	18/03/2014	Chancadora Tacuara	100,00	79,58	40,58	25,70	13,56

Numero de ensayos	5	5	5	5	5
<b>Valor Máximo</b>	100,00	79,58	40,58	25,70	14,16
<b>Valor Mínimo</b>	100,00	79,51	35,90	22,35	12,21
<b>Promedio</b>	<b>100,00</b>	<b>79,54</b>	<b>38,26</b>	<b>24,16</b>	<b>13,54</b>
<b>Desv. Estándar</b>	0,00	0,03	1,70	1,23	0,77

**Cuadro 3.3** Curva granulométrica del agregado fino**Tabla 3.7** Valores mínimos, medios y máximos para curva granulométrica óptima.

Tamices	Abertura [mm]	Mínimo	Medio	Máximo
1"	25,4	100	100	100
3/4"	19,05	90	95	100
1/2"	12,7	80	85,75	91,5
3/8"	9,53	73,5	80,5	87,5
Nº4	4,75	54,4	59,4	64,4
Nº 10	2,00	30,4	35,4	40,4
Nº 40	0,43	15,7	20,7	25,7
Nº 80	0,18	10	13	16
Nº200	0,075	6	8	10

### **3.1.7 Determinación del valor “Equivalente de arena” de suelos y agregados finos aplicando la norma ASTM D 2419**

#### **3.1.7.1 Objetivo**

Este procedimiento tiene por objetivo ser empleado como un ensayo rápido de correlación en el campo. La finalidad del ensayo, es indicar, en condiciones normalizadas, la proporción relativa de finos plásticos o de naturaleza arcillosa en los suelos granulares y agregados pasando en tamiz de 4,75 mm (Nº4).

#### **3.1.7.2 Procedimiento**

- Llenamos la probeta hasta 10 cm con solución tipo (Cloruro de calcio, glicerina y agua destilada).
- Vertemos contenido de muestra de arena.
- Golpeamos parte inferior para desalojar burbujas y humedecer la muestra.
- Dejamos reposar 10 minutos.
- Tapamos la probeta y agitar 90 ciclos (Ida y vuelta 20 cm) durante 30 segundos.
- Lavamos el tapón y las paredes interiores de la probeta con disolución lavadora.
- Introducimos tubo irrigador al fondo de la muestra y ascendemos poco a poco (permite al ascenso del material fino atrapado).
- Dejar reposar durante 20 minutos.
- Hacer lecturas h1 y h2 para las dos muestras.

### 3.1.7.3 Cálculos

Para el cálculo del equivalente de arena del suelo se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

**Tabla 3.8** Resultados del equivalente de arena.

ENSAYOS	LECTURAS			PROMEDIO	ESPECIFICACION
	1	2	3		
LECTURA NIVEL SUPERIOR	116	113	111	113,33	
LECTURA NIVEL INFERIOR	55	52	49	52	
PORCENTAJE DE ARENA	47,41%	46,02%	44,14%	<b>45,86%</b>	<b>&gt;45%</b>

### 3.1.8 Ensayo de determinación de la resistencia a la abrasión del agregado grueso de tamaño pequeño usando la Máquina de Desgaste de los Ángeles, empleando la norma AASHTO T 96 (ASTM C 131).

#### 3.1.8.1 Objetivo

Determinar el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento superficial en una muestra de agregado grueso.

La prueba consiste en hacer golpear una muestra de material con una carga abrasiva dentro de un tambor metálico giratorio, a una determinada velocidad y durante un tiempo especificado. La evaluación de la resistencia a la abrasión se realiza a partir del incremento en material fino q se produce por el efecto de golpeo con la carga abrasiva del tambor cilíndrico. Este ensayo se lo realiza en la Maquina de los Ángeles.

#### 3.1.8.2 Procedimiento

- Cuartear el agregado pétreo, tomar una muestra y lavarla.
- Secar en horno el agregado a 110 °C hasta que tenga un peso constante

- Una vez seco el material se procede a tamizarlo de acuerdo al juego de tamices establecidos en la tabla 3.7, de esta manera se obtiene la granulometría.

**Tabla 3.9** Juego de tamices

<b>Designación</b>	<b>Apertura tamiz (mm)</b>
3/4"	19,05
1/2"	12,7
3/8"	9,5
Nº4	4,75
Nº8	2,36
Nº16	1,18
Nº30	0,6
Nº50	0,3
Nº100	0,15
Nº200	0,075

- Se lo recombinara hasta lograr la granulometría de la Tabla 3.8 que se aproxime al rango de tamaños en el agregado empleado. El peso de la muestra antes de ensayar será registrado con la aproximación de 5 gramos.

**Tabla 3.10** Gradación de las muestras de ensayo de abrasión

<b>Tamaño del tamiz</b>		<b>Peso de los tamaños indicados, en gramos</b>			
		<b>Gradación</b>			
<b>Pasa</b>	<b>Retenido en</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
37,5 (1 ½")	25,4 (1")	1250±25			
25,4 (1")	19,0 (¾")	1250±25			
19,0 (¾")	12,5 (½")	1250±10	2500±10		
12,5 (½")	9,5 (⅜")	1250±10	2500±10		
9,5 (⅜")	6,3 (¼")			2500±10	
6,3 (¼")	4,75 (Nº4)			2500±10	
4,75 (Nº4)	2,36 (Nº8)				5000±10
<b>TOTAL</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

- Colocar la muestra a probar en la Máquina de los Ángeles. De igual manera se introduce la carga abrasiva de acuerdo a la Tabla 3.9 que indica el número de esferas a colocar según la combinación seleccionada.

**Tabla 3.11** Carga de acuerdo al tipo de composición

Tipo de Composición	Número de esferas	Carga Aplicada (gr.)
A	12	5000±10
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

- Accionar la máquina para que gire durante 500 revoluciones a una velocidad de 30 a 33 r.p.m.
- Después del número prescrito de revoluciones, descargar el material de la máquina y retirar las esferas.
- Separar el material sobre el tamiz de 4,75 mm (Nº4) y pesarlo.

### 3.1.8.3 Cálculos

Para determinar el porcentaje de desgaste que sufrió el agregado pétreo después de haberse sometido al ensayo en la Máquina de los Ángeles utilizamos la siguiente formula:

$$Pd = \left( \frac{Pa - Pb}{Pa} \right) * 100$$

Dónde:

Pd=Porcentaje de desgaste (%)

Pa= Masa de la muestra seca antes del ensayo (g)

Pb= Masa de la muestra seca después del ensayo, sobre el tamiz de 4,75 mm (Nº4), en gramos.

### 3.1.8.4 Resultados

**Tabla 3.12 Resultados del desgaste por Abrasión en el agregado**

<b>ENSAYO:</b>					
<b>Gradación:</b>	(A)	(B)	(C)	(D)	
<b>Carga abrasiva con:</b>	(12")	(11")	(8")	(6")	Esferas a 32,5 RPM
<b><u>PORCIONES DE MUESTRA:</u></b>					
<b>PASADO</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>CANTIDAD TOMADA</b>			
3/4"	1/2"	2500			
1/2"	3/8"	2500			
<b>CANTIDAD TOTAL DE MATERIAL TOMADO:</b>			5000	g	
<b>RETENIDO EN EL TAMIZ DE CORTE N° 12 (1,7 mm):</b>			3935	g	
<b>DIFERENCIA:</b>			1065	g	
<b><u>CALCULO</u></b>					
$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$		<b>21,3%</b>	<b>Esp. Técnica</b>		
			<b>&lt; 40%</b>		

## 3.2 DATOS DEL CEMENTO ASFALTICO

El cemento asfáltico utilizado en este estudio es proveniente de la empresa brasileira BETUPEN PLUS 85/100 es un cemento asfáltico modificado con goma de neumático molida y otros aditivos que, bajo condiciones especiales de proceso, presentan características de desarrollo tales como: aumento del punto de ablandamiento, resistencia a tensiones térmicas y mecánicas repetidas (elasticidad) y resistencia al envejecimiento.

**Figura 3.4** Cemento asfáltico Betupen CA – 85/100



### 3.2.1. Viscosidad de materiales bituminosos empleando la norma AASHTO T 72

#### 3.2.1.1. Objetivo

Este método se utiliza para determinar el grado de fluidez del material bituminoso en una temperatura de 135° (315 °F), utilizando el viscosímetro de Viscosímetro Zeytfuchs Cross.

### 3.2.1.2 Procedimiento

Para la realización de esta práctica se siguen los siguientes pasos:

- Colocar el cemento asfáltico (estado sólido) en un envase metálico, para poder calentarlo hasta llevarlo a un estado plasmático de la misma manera calentar el aceite en un vaso precipitado.
- Con un termómetro medir la temperatura hasta que ambas alcancen los 135 °C.
- Verificar que el viscosímetro se encuentre limpio y seco antes de utilizarlo.
- Introducir el viscosímetro al vaso presipitado teniendo cuidado que el aceite no se derrame.
- Si existe demaciado aceite, con la ayuda de una pipeta disminuir la cantidad para que no se derrame.
- Vaciar el asfalto líquido al viscosímetro por el orificio mayor hasta que este llegue a la primera marca.
- Verificar que la temperatura del aceite se mantenga constante para que así el alquitran por la acción de la gravedad pueda fluir.
- Medir con un cronómetro el tiempo, en segundos, que tarda el cemento asfáltico en fluir entre dos de las marcas.
- Se procede a limpiar el equipo con el cuidado necesario teniendo en cuenta que se está trabajando con materiales que están a altas temperaturas para lo cual es recomendable limpiarlo con kerosen y no así con gasolina por ser un producto muy inflamable.

### 3.2.1.3 Resultados

Los resultados de este ensayo se especifican en **la tabla 3.13**.

**Tabla 3.13** Resultados de Viscosidad cinemática del material bituminoso

DESCRIPCION	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
<b>Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-201</b>	cts	294,075	299,032	<b>296,55</b>	30	6000

## **3.2.2 Índice de penetración en cementos asfálticos empleando la norma ASTM D 5 (AASHTO T 49)**

### **3.2.2.1 Objetivo**

Determina la dureza o consistencia relativa, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente a una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se determina la penetración normal.

Esta se hace a 25 °C, calentando la muestra en un baño de agua termostáticamente controlada, la aguja cargada con 100 g. y la carga se aplica durante 5 segundos. La unidad de penetración es la décima de milímetro.

### **3.2.2.2 Procedimiento**

- Calentar el material en un recipiente, agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas.
  
- Se llena el molde para la probeta calentándolo a una temperatura semejante a la del material, hasta una altura que sea superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta.
- Después de llenar los moldes, protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y dejar enfriar al aire a una temperatura por un periodo entre 1 y 1,5 horas.
  
- Sumergir el recipiente en el baño de agua a la temperatura controlada de 25 °C, durante un periodo de 30 minutos.
  
- Comprobar que el vástago soporte de la aguja este perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre su guía.

- Fijar la aguja firmemente en su soporte. Se coloca el peso suplementario de 50 g sobre el vástago, para obtener la masa móvil total de  $100 \pm 0,1$  g.
- Aproximar la aguja del Penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Poner en cero el Penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado.
- Se lee y se anota la distancia, expresada en milésimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.
- Se puede realizar más perforaciones en la muestra para lo cual se la vuelva a introducir al baño de agua durante un periodo de 15 minutos.
- Al momento de repetir el ensayo se debe tener en cuenta que se las debe realizar tanto a 10 mm de la perforación inicial y del borde.

### 3.2.2.3 Resultados

**Tabla 3.14 Resultados de los ensayos de penetración**

DESCRIPCION	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Índice de penetración AASHTO T-49	0,1 mm	95	94	94,5	85	100

## 3.2.3 Determinación del punto de ignición mínimo de una muestra de cemento asfáltico empleando la norma AASHTO T 48

### 3.2.3.1 Objetivo

El objetivo general de este ensayo de laboratorio es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto al cual puede ser calentado, antes que este se encienda debido a los vapores combustibles liberados; a través de la copa abierta de Cleveland.

### 3.2.3.2 Procedimiento

- Ubicar el equipo en una superficie plana y firme, preferentemente en una zona libre de la presencia de corrientes de aire.
- Verificar que la copa de ensayo este limpia y libre de cualquier aceite, vestigios pegados o residuos remanentes de ensayos anteriores.
- Mantener el termómetro en posición vertical con el bulbo a una distancia de 6,5 mm del fondo de la copa, y localizada en el punto medio del trecho entre el centro y borde de la copa.
- Colocar la muestra de cemento asfáltico en la copa, dejar calentar hasta que dicha muestra alcance su estado líquido.
- Verificar que la parte superior del menisco este en la línea determinada de llenado.
- Aplicar calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17 C° por minuto.
- Disminuir el calor cuando la muestra se aproxime a los 55 °C por debajo del punto de inflamación esperado, hasta que la velocidad de la temperatura para 28 °C antes del punto de inflamación, sea de 5 a 6 °C por minuto.
- Pasar la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulo recto al diámetro que pasa a través del termómetro. El centro de llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2mm por encima del plano del borde superior de la copa, pasando en una dirección primero y en próximo intervalo en la dirección opuesta.
- El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 segundo.

- Previo antes del punto de ignición, aumentar la temperatura evitando alteraciones del vapor en la copa de ensayo.
- Registrar el valor de la temperatura cuando la muestra alcance su punto de inflamación.

### 3.2.3.3 Resultados

**Tabla 3.15** Resultados del ensayo de punto de ignición.

DESCRIPCION	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	241	242,0	241,5	>235	

## 3.2.4 Determinación del peso específico del material bituminoso aplicando la norma AASHTO T 228

### 3.2.4.1 Objetivo

El objetivo de esta práctica es determinar el peso específico del asfalto mediante el uso del picnómetro a la temperatura requerida.

### 3.2.4.2 Procedimiento

- Calibrar la probeta de 25 ml con la ayuda de una balanza de 0,01 gr de aproximación, determinando el peso de la misma; esta deberá estar limpia y seca.
- Registrar el peso y designar este dato con la letra “A”.

- Llenar la probeta con agua destilada para posteriormente sumergirla totalmente en un vaso precipitado con agua destilada.
- Colocar el vaso precipitado con la probeta en baño de agua (60°C) de forma que el agua del baño quede al mismo nivel que del vaso.
- Mantener el baño como mínimo 30 minutos a una temperatura de 60 °C
- Retirar la probeta del baño María y secar cuidadosamente la humedad superficial.
- Determinar el peso de dicha probeta con el agua destilada y designar este dato con la letra “B”.
- Calentar una pequeña cantidad de cemento asfáltico hasta alcanzar una condición fluida, mediante la aplicación de calor en forma suave.
- Una vez que la muestra este suficientemente fluida verter a la probeta aproximadamente una cantidad de 15 ml, tomando las precauciones para evitar que el material toque las paredes de la probeta por encima de su nivel final.
- Dejar que enfríe la probeta y su contenido a la temperatura ambiente para posteriormente pesar y designar este dato con la letra “C”.
- Llenar la probeta con agua destilada y sumergirlo completamente en el vaso lleno de agua destilada y colocarlo en el baño María a temperatura de ensayo (60 °C).
- Mantenerlo a esta temperatura por unos 30 minutos.
- Retirar la probeta del vaso precipitado, secar la humedad superficial y determinar el peso para designarlo con la letra “D”.

### 3.2.4.3 Cálculos

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w * 1000$$

$$\rho_w = \frac{(B - A) - (D - C)}{(C - A) * 1000} * \rho_b$$

Dónde:

$\rho_b$ =Densidad del agua a temperatura del ensayo (60 °C)

$\rho_w$ =Densidad del asfalto a la temperatura del ensayo (60 °C)

**A**= Peso de la probeta seca y limpia

**B**= Peso de la probeta + agua destilada (25 ml a 60 °C)

**C**= Peso de la probeta + material asfáltico (°T ambiente)

**D**= Peso de la probeta + agua destilada (60 °C)

**Tabla 3.16 Resultados de peso específico del cemento asfáltico**

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	32,5	32,5			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	66,21	66,3			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	50,5	50,1			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	66,27	66,3			
Peso Específico AASHTO T-228	grs./cm3	1,003	1,004	<b>1,0037</b>	0,95	1,05

## CAPITULO IV

# DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA TRADICIONAL Y LA MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON LECHADA DE CEMENTO

## 4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL

### 4.1.1 Requerimientos

Tabla 4.1 Requerimientos para el diseño de la mezcla asfáltica

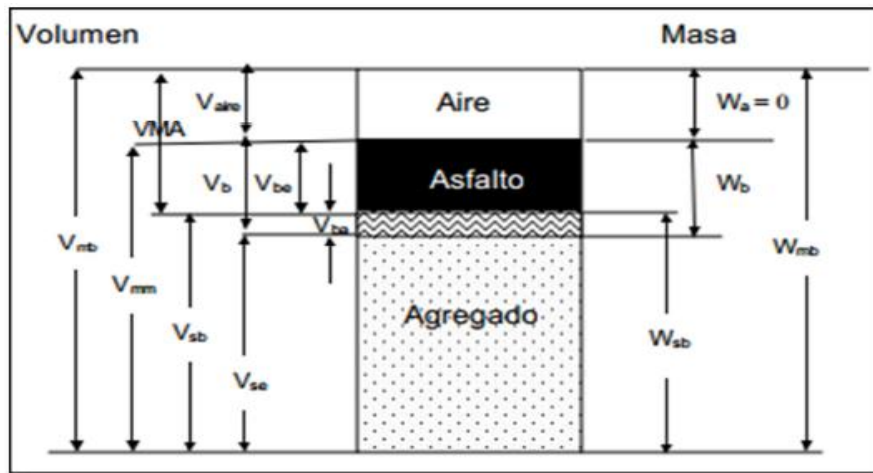
Porcentajes de mezclas de agregados
Medir el peso específico del agregado grueso (ASTM C 127)
Medir el peso específico del agregado fino (ASTM C 128)
Medir el peso específico del cemento asfáltico (ASTM D 70)
Peso específico Bulk de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 – ASTM D 2726)

### 4.1.2 Relaciones volumétricas y gravimétricas de las mezclas asfálticas.

Es ampliamente reconocido que el comportamiento de la mezcla asfáltica está influenciado significativamente por las proporciones relativas de asfalto, agregado y aire.

En una mezcla asfáltica se tienen tres fases: la sólida, que está formada por el agregado mineral; la líquida, que es el cemento asfáltico; y la fase gaseosa, que comprende al aire.

**Figura 4.1** Diagrama esquemático de una mezcla asfáltica compactada



Fuente: Asphalt institute MS-2, 1996)

Dónde:

**$V_{mb}$** = Volumen total de la mezcla compactada

**$V_{mm}$** = Volumen de la mezcla sin vacíos

**$VMA$** = Volumen de vacíos en el agregado mineral

**$V_{sb}$** = Volumen total del agregado

**$V_{se}$** = Volumen efectivo del agregado

**$V_{be}$** = Volumen efectivo del asfalto

**$V_{ba}$** = Volumen de asfalto absorbido

**$V_{aire}$** = Volumen de aire

**$W_{mb}$** = Masa total de la mezcla compactada

**$W_a$** = Masa del aire

**$W_b$** = Masa del asfalto

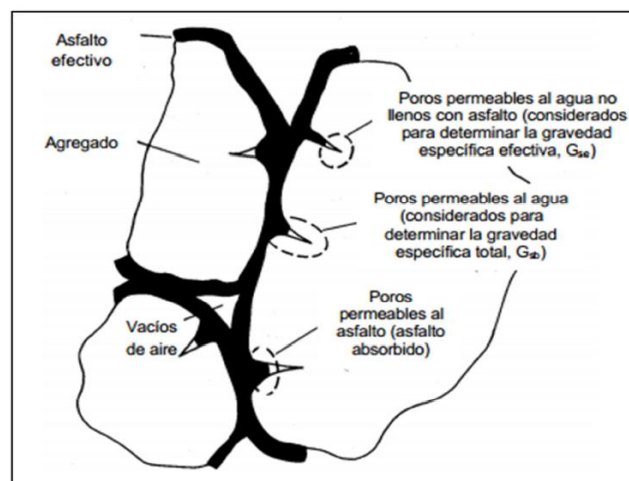
**$W_{sb}$** = Masa total del agregado

Las fases de asfalto efectivo y de aire de la mezcla, se consideran como volumen de vacíos en el agregado mineral; y la fase de aire como el volumen de aire de la mezcla.

La mezcla asfáltica compactada debe analizarse con base en el volumen, por tanto, es importante definir y entender cada uno de los volúmenes del diagrama de fases.

- **Volumen de asfalto efectivo ( $V_{be}$ ):** Es el volumen de asfalto que cubre las partículas de agregado, es decir, es el asfalto que no es absorbido por los poros del agregado.
- **Volumen de asfalto absorbido ( $V_{ba}$ ):** Es el volumen de asfalto que es absorbido por los poros externos del agregado.
- **Volumen total del agregado ( $V_{sb}$ ):** Es el volumen total del agregado que comprende el volumen sólido y el de los poros permeables al agua.
- **Volumen efectivo del agregado ( $V_{se}$ ):** Es el volumen del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.
- **Volumen aparente del agregado ( $V_{sa}$ ):** Es el volumen del sólido del agregado, es decir, no incluye el volumen de los poros permeables del agua.

**Figura 4.2** Ilustración del volumen de aire, volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido en una mezcla asfáltica compactada



#### 4.1.2.1 Peso específico Bulk del agregado ( $G_{sb}$ )

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso y agregado fino con diferentes pesos específicos, el peso específico Bulk para el agregado total se calcula empleando la siguiente relación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

**$G_{sb}$** = Peso específico Bulk para el agregado total.

**$P_1, P_2 P_n$** = Porcentajes individuales por masa de agregado.

**$G_1, G_1, G_n$** = Peso específico individual de cada tipo de agregado.

#### 4.1.2.2 Peso específico Efectivo del agregado ( $G_{se}$ )

Cuando se basa en el peso específico máximo de una mezcla,  $G_{mm}$ , el peso específico efectivo del agregado  $G_{se}$ , incluye todos los espacios vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. Se determina empleando la siguiente relación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Dónde:

**$G_{se}$** = Peso específico efectivo del agregado

**$G_{mm}$** = Peso específico teórico máximo de la mezcla sin vacíos de aire

**$P_{mm}$** = Porcentaje de masa total de la mezcla suelta = 100%

**$P_b$** = Contenido de asfalto con el cual se determina la  $G_{mm}$  expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla.

**$G_b$** = Peso específico del asfalto

#### 4.1.2.3 Peso específico teórico máximo (Gmm)

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado se necesitara el peso específico teórico máximo Gmm, Con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto:

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gsb} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Dónde:

**Gmm**= Peso específico máximo de la mezcla (sin vacíos de aire)

**Pmm**= Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100%

**Ps**= Contenido del agregado expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla (Ps= 100 – Pb).

**Pb**= Contenido de asfalto expresado como porcentaje del total de la masa de la mezcla.

**Gsb**= Peso específico efectivo del agregado.

**Gb**= Peso específico del asfalto.

#### 4.1.2.4 Absorción de asfalto (Pba)

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado y no como un porcentaje del total de la masa de la mezcla. La absorción del asfalto Pba, se determina mediante la siguiente relación:

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse}$$

Dónde:

**Pba**= Asfalto absorbido expresado como porcentaje de la masa del agregado.

**Gse**=Peso específico efectivo del agregado

**Gsb**= Peso específico Bulk del agregado

**Gb**= Peso específico del asfalto

#### 4.1.2.5 Contenido efectivo de asfalto ( $P_{be}$ )

Es el volumen total de asfalto menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas del agregado.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s$$

Dónde:

**$P_b$** = Contenido de asfalto (%)

**$P_{ba}$** = Asfalto absorbido (%)

**$G_b$** = Peso específico del asfalto

**$P_s$** = % de agregado en la mezcla

#### 4.1.2.6 Vacíos de agregado mineral

Se define como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, el cual incluye los vacíos de aire ( $V_a$ ) y el contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ), expresado como un porcentaje del volumen total.

$$VAM = \%C.A. + \frac{\%C.A.* Gmb}{\gamma_{asf}}$$

Dónde:

**% C.A.**= Porcentaje de asfalto en la mezcla

**$Gmb$** = Peso específico Bulk de la mezcla asfáltica

**$\gamma_{asf}$** = Peso específico del cemento asfáltico

#### 4.1.2.7 Vacíos de aire ( $V_a$ )

Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla asfáltica compactado.

#### 4.1.2.8 Vacíos llenados con asfalto (VFA)

Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado que es ocupado por el asfalto efectivo.

$$VFA = \frac{100 * (VMA - V_a)}{VMA}$$

Dónde:

**VMA**= Vacíos agregado mineral

**Va**= Vacíos de aire

### 4.1.3 Dosificación de los agregados para la mezcla asfáltica convencional

Independientemente del número de agregados o combinados del método por el cual se determinan, la ecuación básica que expresa la combinación mediante el **método analítico** es la siguiente:

$$P = Ga + Mb + Fc \dots$$

Dónde:

**P**= El porcentaje de los agregados combinados que pasan por un tamiz dado.

**G, M, F**= Porcentaje de material que pasa a un tamiz dado para los agregados individuales.

**a, b, c**= Proporción de los agregados individuales que se utilizan en la combinación, en donde el total es igual al 100%

#### 4.1.3.1 Combinación de tres agregados

La ecuación básica para la combinación de tres agregados es la siguiente:

$$P = Ga + Mb + Fc$$

**Tabla 4.2** Combinación de agregados

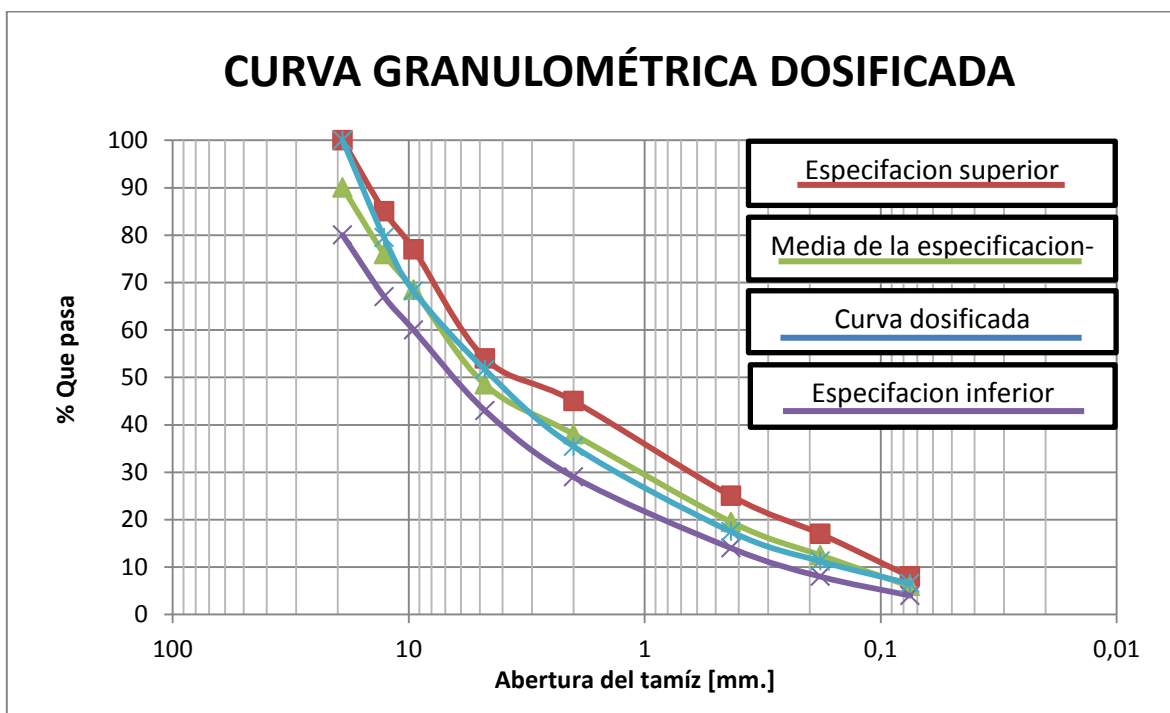
<b>a</b> = Porcentaje de grava de 3/4"	40%
<b>b</b> = Porcentaje de grava de 3/8"	17%
<b>c</b> = Porcentaje de agregado fino	43%

El procedimiento de cálculo esta descrito en anexos.

**Tabla 4.3** Granulometría de la mezcla de agregados para una mezcla asfáltica convencional con los agregados de la Chancadora Tacuara.

TAMIZ	% Que pasa							
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº80	Nº200
	19,05	12,7	9,525	4,75	2	0,43	0,18	0,075
Especificación	80 - 100	67 - 85	60 - 77	43 - 54	29 - 45	14 - 25	8 - 17	4 - 8
Media de la especificación	90	76	68,5	48,5	38	19,5	12,5	6
Agregado grueso 3/4" (40 %)	40,00	19,48	8,18	0,23	0,01	0,00	0,00	0,00
Agregado grueso 1/2" (17 %)	17,00	17,00	17,00	8,42	1,23	1,00	0,85	0,70
Agregado fino (43 %)	43,00	43,00	43,00	43,00	34,20	16,45	10,39	5,82
<b>MEZCLA</b>	<b>100,00</b>	<b>79,48</b>	<b>68,18</b>	<b>51,65</b>	<b>35,45</b>	<b>17,45</b>	<b>11,24</b>	<b>6,52</b>

**Cuadro 4.1** Curva granulométrica obtenida con la mezcla de los agregados de la Chancadora Tacuara, según las especificaciones técnicas.



**Tabla 4.4** Granulometría requerida para una briqueta de 1200 gramos.

Tamiz	Pasa (%)	Pasa (g)	Reten. (%)	Reten. (g)	Peso por tamiz
3/4"	100,00	1200,00	0,00	0	<b>0,00</b>
1/2"	79,48	953,75	20,52	246,253	<b>246,25</b>
3/8"	68,18	818,18	31,82	381,817	<b>135,56</b>
Nº4	51,65	619,81	48,35	580,19	<b>198,37</b>
Nº10	35,45	425,39	64,55	774,606	<b>194,42</b>
Nº40	17,45	209,39	82,55	990,609	<b>216,00</b>
Nº80	11,24	134,86	88,76	1065,14	<b>74,54</b>
Nº200	6,52	78,20	93,48	1121,8	<b>56,66</b>
Base	0,00	0,00	100,00	1200	<b>78,20</b>
<b>TOTAL</b>					1200,00

**Figura 4.3** Obtención de la granulometría para las briquetas mediante tamizado y pesaje.



**Figura 4.4** Paquetes de 1200 g. de mezcla de agregado para briquetas de mezcla tradicional



## **4.1.4 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente tradicional**

### **4.1.4.1 Método Marshall del diseño de mezcla**

Los procedimientos originales de prueba Marshall Son aplicables solo en mezclas para pavimentación de asfalto caliente que contengan agregados de un tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada) o menos.

El método de Marshall utiliza muestras de prueba estándar de 64 mm (2 ½ pulg.) de alto por 102 mm (4 pulg.) de diámetro. Estas son preparadas mediante un proceso específico de calefacción, mezcla y compactación de la mezcla de agregados asfálticos.

Las dos características principales del método Marshall son los análisis de densidad y vacíos, y la evaluación de la estabilidad de fluidez de las muestras de prueba.

La estabilidad de las muestras de prueba es la máxima resistencia de carga en Newtons (libras) que la muestra de prueba estándar ejercerá a 60 °C (140 °F) cuando se evalúa tal como está indicado, con la debida corrección según la altura que tengan cada briqueta. El valor de la fluidez es el movimiento total o tensión, en unidades de 0,25 mm (1/100 pulg.) que se produce entre un punto sin carga y el punto de carga máxima durante la prueba de estabilidad.

### **4.1.4.2 Dosificación del asfalto**

El contenido de asfalto es la concentración de masa de ligante asfáltico. Se expresa como el porcentaje de la masa total de la mezcla o como porcentaje de la masa total de agregado. El contenido óptimo de asfalto en una mezcla depende en gran medida de las características del agregado, como la graduación y la absorción.

El contenido mínimo de cemento asfáltico está en función de las características del material pétreo, para determinar el contenido mínimo, este puede ser realizado por dos métodos: El Método de área superficial y el Método de distribución de agregados.

#### 4.1.4.2.1 Método del área superficial

Para la aplicación del método se aplica la siguiente expresión:

$$C_{\min}CA = (0,27H - 0,41G + 2,05J + 15,38A + 53,30F)I_a$$

Dónde:

**C<sub>min</sub>CA**= Contenido mínimo de cemento asfáltico (%)(Kg CA/100 Kg de agregado)

**I<sub>a</sub>**= Índice asfáltico según la rugosidad y porosidad de los agregados

**H**= % material entre tamiz 1 1/2" y 3/4"

**G**= % material entre tamiz y 3/4" N°4

**J**= % material entre tamiz N° 4 y N° 40

**A**= % material entre tamiz N° 40 y N° 200

**F**= % material que pasa tamiz N° 200

**Tabla 4.5** Datos de Índice asfáltico (I<sub>a</sub>) por el Método del Área Superficial, según el material pétreo

<b>MATERIAL PETREO</b>	<b>Índice asfáltico</b>
Gravas y arenas o materiales redondeados de baja absorción	0,0055
Gravas angulosas o redondas, trituradas de baja absorción	0,0060
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de mediana absorción	0,0070
Rocas trituradas de alta absorción	0,0080

**Calculo:**

Teniendo la siguiente mezcla de agregados para mezcla asfáltica cuya granulometría es:

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
	25,4	19,05	12,70	9,53 mm	4,75mm	2,00 mm	0,43 mm	0,18 mm	0,074
	mm	mm	mm						mm
% Que pasa	100,00	100,00	79,48	68,18	51,65	35,45	17,45	11,24	6,52

Se tiene:

Ia=	<b>0,0070</b>
H=	0,00
G=	48,35
J=	34,20
A=	10,93
F=	6,52

---


$$\text{Cmin CA 1} = 4,24$$


---

**4.1.4.2.2 Método de Distribución de los agregados**

Para la aplicación del método se aplica la siguiente expresión:

$$\text{C}_{\min} \text{CA} = 0,02a + 0,045b + cd$$

Dónde:

$\text{C}_{\min} \text{CA}$  = Contenido mínimo de cemento asfáltico (%) (Kg CA/100 Kg de agregado)

**a** = % material retenido en el tamiz N° 10

**b** = % material entre tamiz N°10 y N° 200

**c** = % material que pasa tamiz N° 200

**d** = Índice asfáltico

**Tabla 4.6** Datos de Índice asfáltico (d) por el Método Distribución de Agregados, según el material pétreo

<b>MATERIAL PETREO</b>	<b>Índice asfáltico</b>
Gravas y arenas o materiales redondeados de baja absorción	0,15
Gravas trituradas de baja absorción	0,20
Gravas trituradas de mediana absorción	0,30
Gravas trituradas de alta absorción	0,35

**Calculo:**

a=	68,18
b=	28,93
c=	6,52
d=	0,30

#### 4.1.4.2.3 Contenido de asfalto promedio

Para la obtención de este dato, se realizó el cálculo del promedio entre los contenidos mínimos de asfalto encontrados a través de los métodos anteriores:

$$\overline{C_{min}CA} = \frac{CA_1 + CA_2}{2}$$

$$\overline{C_{min}CA} = \frac{4,24 + 4,62}{2}$$

$$C_{min} CA 2 = 4,62$$

$$C_{min} CA \text{ asumido} = 4,50$$

A partir del contenido mínimo de asfalto promedio obtenido, se realizara la dosificación de

las briquetas de 1200 gramos cada una, en las cuales el contenido de asfalto se irá incrementando 4 veces cada 0,5%

**Tabla 4.7** Contenido de asfalto para una briketa de 1200 g. según el incremento

<b>Incremento</b>	<b>N°</b>	<b>Asfalto (%)</b>	<b>Asfalto (g)</b>
<b>1</b>	1	4,5	54
	2	4,5	54
	3	4,5	54
<b>2</b>	4	5,0	60
	5	5,0	60
	6	5,0	60
<b>3</b>	7	5,5	66
	8	5,5	66
	9	5,5	66
<b>4</b>	10	6,0	72
	11	6,0	72
	12	6,0	72
<b>5</b>	13	6,5	78
	14	6,5	78
	15	6,5	78

#### **4.1.4.3 Preparación de las briquetas de ensayo**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, en este caso se utiliza los porcentajes determinados en la **Tabla 4.7**.

La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico, indicadas en la **Tabla 4.4**.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan completamente, controlando que la temperatura no sobrepase los 140 °C, hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas de cemento asfáltico. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta de mezcla asfáltica.

**Figura 4.5** Calentamiento del asfalto y del agregado



- Preparación de molde y martillo: límpiense meticulosamente el montaje del molde de muestras y el martillo y debe calentarse a una temperatura entre los 95 °C y 150°C. Colóquese una pieza de papel de cera y colóquese el mismo en el fondo del molde previo a la colocación de la mezcla.

**Figura 4.6** Preparación de moldes y de martillo



- Se prepara la mezcla asfáltica caliente para ser colocada en el molde pre calentado como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

**Figura 4.7** Preparación de la mezcla asfáltica a 140 °C



- La briqueta es compactada mediante golpes del martillo de compactación. El número de golpes son 75 correspondiente a un diseño de mezcla para Tráfico Pesado. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes.

**Figura 4.8** Golpeo de briquetas



- Repetir este proceso con todos los porcentajes de asfalto que se obtuvo.
- Después de completar la compactación, las briquetas se enfrían y extraídas de los moldes usando un dispositivo de compresión, las cuales deben ser colocadas sobre una suave y nivelada superficie hasta que se encuentren listas para evaluarse. Normalmente las muestras se dejan enfriar por una noche.

**Figura 4.9** Extracción de las briquetas de los moldes



- De las briquetas con distintos porcentajes de asfalto se debe obtener 3 pesos distintos:
  - Peso en el aire: Pesar a las briquetas apenas se las desmolda y apuntar su resultado.
  - Peso SSS: Sumergir en agua a las briquetas durante un periodo de 15 minutos, sacarlas, secarlas y tomar su peso.
  - Peso sumergido: Tomar el peso de las briquetas sumergidas en agua, dejar estabilizar la lectura del peso durante 15 minutos.

#### **4.1.4.4 Ensayo de Muestras**

- A cada muestra se debe sumergirla en la tina de agua a 60 °C de 30 a 40 minutos antes de la evaluación.
- Limpie y lubrique con aceite completamente las superficies internas del cabezal y los postes guías de la prueba de estabilidad Marshall. La temperatura del cabezal debe mantenerse entre 21,1 a 38,7 °C, ubique la muestra en el cabezal inferior de prueba y céntralo, entonces acople el cabezal superior y centre el montaje completo en la Maquina Marshall. Coloque el medidor de flujos sobre la barra marcada.

**Figura 4.10** Rotura de briquetas con Maquina Marshall



- Aplique cargas de prueba a las muestras en una constante proporción de deformación, 51mm (2 pulg.) por minuto, hasta que alguna falencia se presente. El punto de falencia es definido por la máxima lectura de carga obtenida, registrada como el valor de Estabilidad Marshall.
- Mientras la prueba de estabilidad se encuentra en proceso, sostenga firmemente el medidor de flujos sobre la barra guía marcada y retírelo mientras la medida de carga disminuya, tome lectura y regístrese como el Flujo.
- El procedimiento completo para las medidas de Estabilidad y Fluidez, deberá ser completada en un periodo de 30 segundos. Esta lectura será corregida según la altura de la briqueta, según la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Factores de corrección según la altura de la briqueta

Volumen de la briqueta cm <sup>3</sup>	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección	Volumen de la briqueta cm <sup>3</sup>	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección
200 - 213	2,54	5,56	406 - 420	5,08	1,47
214 - 225	2,70	5,00	421 - 431	5,24	1,39
226 - 237	2,86	4,55	432 - 443	5,40	1,32
238 - 250	3,02	4,17	444 - 456	5,56	1,25
251 - 264	3,17	3,85	457 - 470	5,71	1,19
265 - 276	3,33	3,57	471 - 482	5,87	1,14
277 - 289	3,49	3,33	483 - 495	6,03	1,09
290 - 301	3,65	3,03	496 - 508	6,19	1,04
302 - 316	3,81	2,78	509 - 522	6,35	1,00
317 - 328	3,97	2,50	523 - 535	6,51	0,96
329 - 340	4,13	2,27	536 - 546	6,67	0,93
341 - 353	4,29	2,08	547 - 559	6,82	0,89
354 - 367	4,44	1,92	560 - 573	6,98	0,86
368 - 379	4,60	1,79	574 - 585	7,14	0,83
390 - 392	4,76	1,67	586 - 598	7,30	0,81
393 - 405	4,92	1,56	599 - 610	7,46	0,78

#### 4.1.4.1.5 Resultados

**Tabla 4.9** Resultados del cálculo de Gravedades

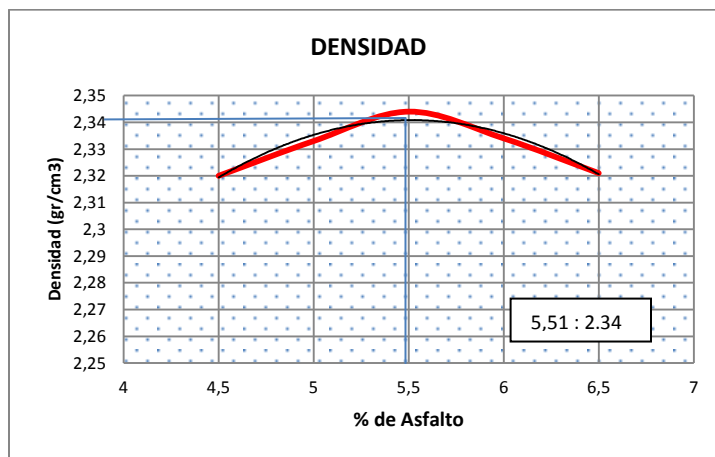
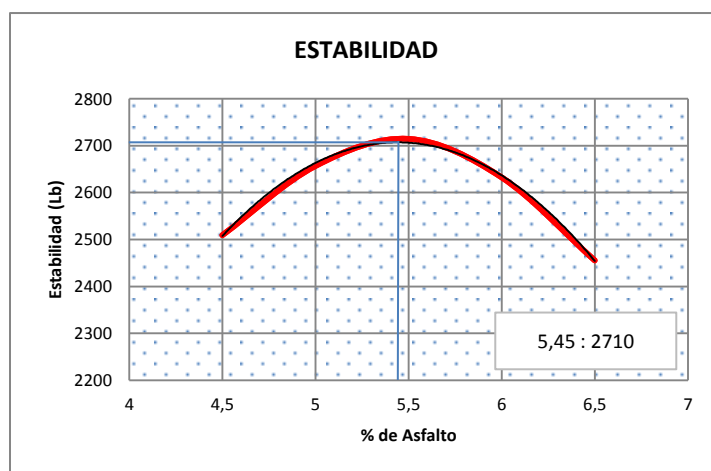
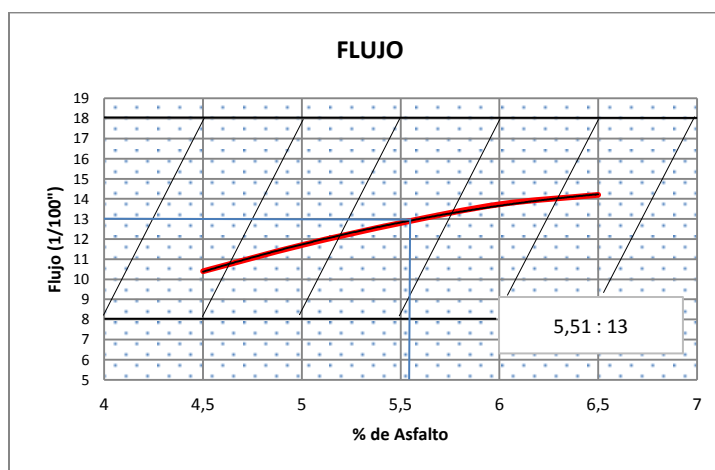
Peso específico Bulk del Agregado total (Gsb)	2,661	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del cemento asfáltico	1,0037	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico teórico máximo medido (Gmm)	2,477	g/cm <sup>3</sup>

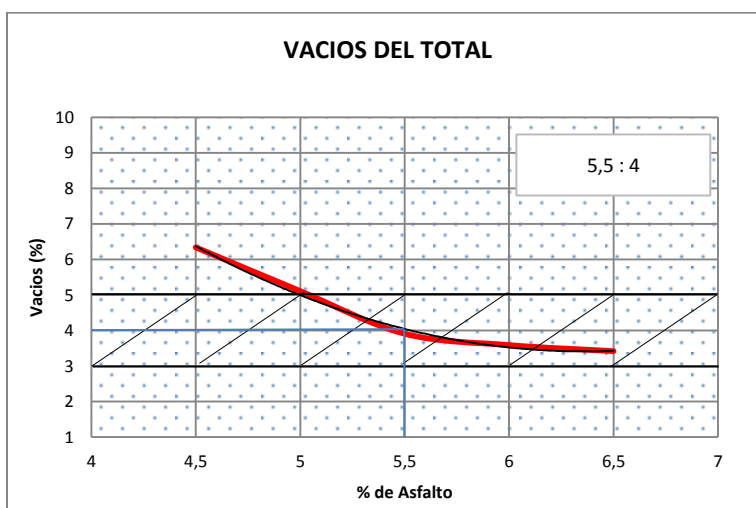
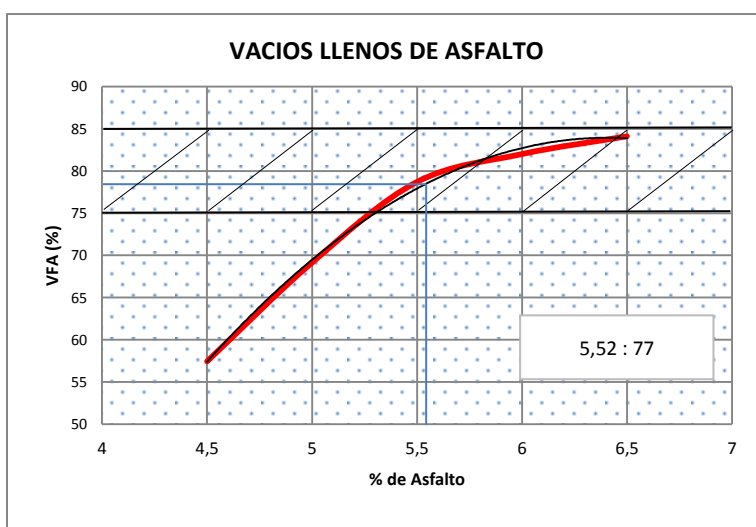
**Tabla 4.10** Resultados de Absorción de asfalto (PBA) y Contenido efectivo de asfalto

<b>N° Briqueta</b>	<b>de % de Asfalto</b>	<b>Absorción de Asfalto (PBA)</b>	<b>Contenido efectivo de asfalto (PBE)</b>
1			
2	4,5	0,273	4,239
3			
4			
5	5,0	0,022	4,979
6			
7			
8	5,5	0,167	5,342
9			
10			
11	6,0	0,154	5,855
12			
13			
14	6,5	0,148	6,362
15			

**Tabla 4.11** Resultados de ensayos Método Marshall

<b>No</b>	<b>Dosificación %</b>	<b>% C.A.</b>	<b>Densidad</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>(Vv)</b>	<b>(VAM)</b>	<b>(VFA)</b>	<b>Flujo</b>	
<b>1</b>	Grava	38,20	4,5	2,32	1908	6,34	14,9	57,45	10,4
	Gravilla	16,24							
	Arena	41,07							
<b>2</b>	Grava	38,00	5	2,333	2171	5,11	16,56	69,15	11,7
	Gravilla	16,15							
	Arena	40,85							
<b>3</b>	Grava	37,80	5,5	2,344	2335	3,91	18,35	78,7	12,8
	Gravilla	16,07							
	Arena	40,64							
<b>4</b>	Grava	37,60	6	2,334	2261	3,59	19,95	82	13,73
	Gravilla	15,98							
	Arena	40,42							
<b>5</b>	Grava	37,40	6,5	2,321	2130	3,42	21,53	84,1	14,2
	Gravilla	15,90							
	Arena	40,21							

**Cuadro 4.2** Densidad Bulk vs. Contenido de asfalto**Cuadro 4.3** Estabilidad vs. Contenido de asfalto**Cuadro 4.4** Flujo vs. Contenido de asfalto

**Cuadro 4.5** Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto**Cuadro 4.6** Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto**Tabla 4.12** Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico

VALORES		
% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRAFICOS	ESPECIFICACIONES TECNICAS
Densidad	2,34	-
% Vacios	4,0	3 - 5
VFA	77,0	75 - 85
Estabilidad	2710,0	> 1800 Lb
Fluencia	13,0	8 - 18
% Optimo de asfalto para el proyecto		<b>5,50%</b>

## 4.2 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

### 4.2.1 Dosificación de los agregados para la mezcla asfáltica sin agregado fino.

La dosificación de agregados para la elaboración de esta mezcla asfáltica modificada, deberá ser aquella graduación que presenta una mezcla asfáltica abierta, ya que deben aprovecharse los espacios vacíos producidos en la mezcla para que estos sean rellenados con la lechada de cemento.

La dosificación de la mezcla asfáltica abierta, estará conformada por el agregado grueso de 3/4" y el agregado intermedio de 3/8", cuya granulometría está definida en el Capítulo III.

#### 4.2.1.1 Combinación de dos agregados

La ecuación básica para la combinación de dos agregados es la siguiente:

$$P = Ga + Mb$$

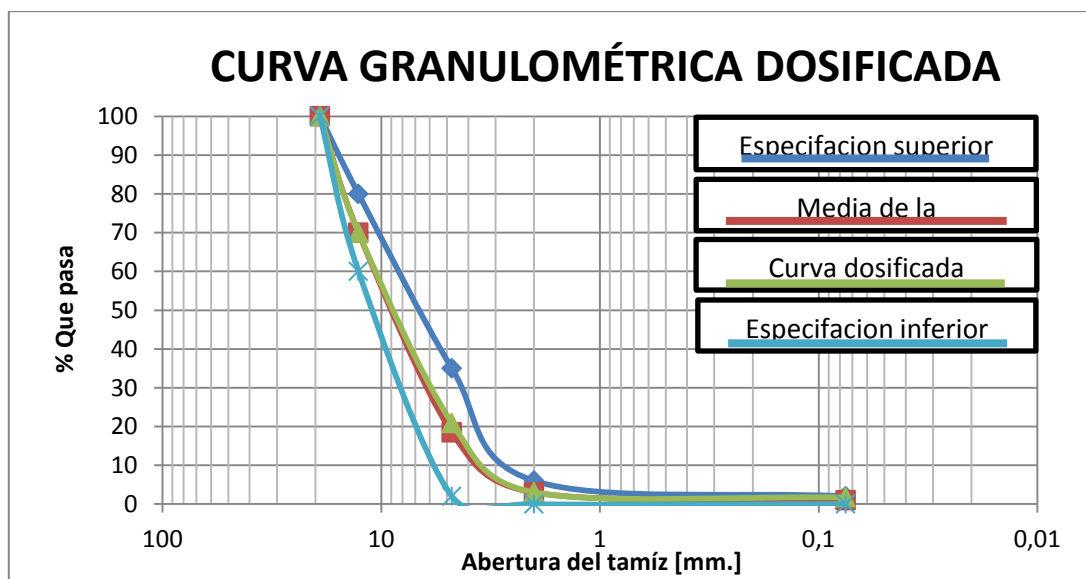
**Tabla 4.13** Combinación de agregados para mezcla asfáltica modificada

<b>a=</b> Porcentaje de grava de 3/4"	58%
<b>b=</b> Porcentaje de grava de 3/8"	42%

**Tabla 4.14** Granulometría de la mezcla de agregados para una mezcla asfáltica abierta con los agregados de la Chancadora Tacuara.

TAMIZ	% Que Pasa				
	3/4"	1/2"	N°4	N°10	N°200
	19,05	12,7	4,75	2	0,075
Especificación	100 - 100	60 - 80	2 - 35	0-6	0 - 2
Media de la especific.	100	70	18,5	3	1
Agregado grueso 3/4"	58,48	28,48	0,34	0,02	0,00
Agregado grueso 3/8"	41,52	41,52	20,56	3,02	1,70
<b>MEZCLA</b>	<b>100,00</b>	<b>70,00</b>	<b>20,90</b>	<b>3,03</b>	<b>1,70</b>

**Cuadro 4.7** Curva granulométrica para la mezcla asfáltica abierta, obtenida con la mezcla de los agregados de la Chancadora Tacuara, según las especificaciones técnicas.



**Tabla 4.15** Granulometría de mezcla abierta requerida para una briqueta de 1200 gramos.

Tamiz	Pasa (%)	Pasa (g)	Reten. %	Reten. (g)	peso
3/4"	100	1200	0	0	0
1/2"	70	840	30	360	360
Nº4	20,9	250,8	79,1	949,2	589,2
Nº10	3,03	36,36	96,97	1163,64	214,44
Nº200	1,7	20,4	98,3	1179,6	15,96
Base	0	0	100	1200	20,4
<b>TOTAL</b>					1200

**Figura 4.11** Paquetes de 1200 g. de mezcla de agregado para briquetas de mezcla modificada

## 4.2.2 Diseño de la mezcla asfáltica sin agregado fino, en caliente

### 4.2.2.1 Método Marshall del diseño de mezcla

El método y procedimiento de diseño de esta mezcla es la misma que la descrita el apéndice 4.1.4.1 de este capítulo.

#### 4.2.2.2 Dosificación del asfalto

##### 4.2.2.2.1 Método de Distribución de los agregados

Para la aplicación del método se aplica la siguiente expresión:

$$C_{\min} CA = 0,02a + 0,045b + cd$$

Dónde:

$C_{\min} CA$  = Contenido mínimo de cemento asfáltico (%) (Kg CA/100 Kg de agregado)

$a$  = % material retenido en el tamiz N° 10

$b$  = % material entre tamiz N° 10 y N° 200

$c$  = % material que pasa tamiz N° 200

$d$  = Índice asfáltico (Tabla 4.6)

**Calculo:**

$a =$	64,65	
$b =$	28,93	
$c =$	6,52	
$d =$	0,30	
		$C_{\min} CA = 2,50$

A partir del contenido mínimo de asfalto promedio obtenido, se realizara la dosificación de las briquetas de 1200 gramos cada una, en las cuales el contenido de asfalto se irá incrementando 2 veces cada 0,5% y reduciendo 2 veces 0,5%

**Tabla 4.16** Contenido de asfalto para una briqueta de 1200 g. de mezcla abierta según el incremento y la reducción

Incremento	N° Briqueta	Asfalto (%)	Asfalto (g)
1	1	1,5	18
	2	1,5	18
	3	1,5	18
2	4	2,0	24
	5	2,0	24
	6	2,0	24
3	7	2,5	30
	8	2,5	30
	9	2,5	30
4	10	3,0	36
	11	3,0	36
	12	3,0	36
5	13	3,5	42
	14	3,5	42
	15	3,5	42

**Figura 4.12** Briquetas de mezcla asfáltica sin contenido de agregado fino



#### 4.2.2.3 Resultados obtenidos en el diseño de la mezcla asfáltica sin agregado fino

**Tabla 4.17** Resultados del cálculo de Gravedades en la mezcla sin agregado fino

<b>Peso específico Bulk del Agregado total (Gsb)</b>	2,640	g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso específico del cemento asfáltico</b>	1,0037	g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso específico teórico máximo Promedio (Gmm)</b>	2,537	g/cm <sup>3</sup>

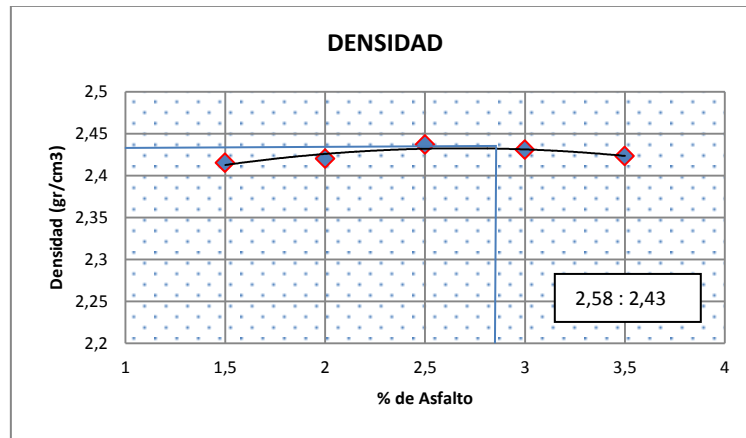
**Tabla 4.18** Resultados de Absorción de asfalto (PBA) y Contenido efectivo de asfalto

N° de Briqueleta	% de Asfalto	Absorción de Asfalto (PBA)	Contenido efectivo de asfalto (PBE)
1			
2	4,5	0,260	4,252
3			
4			
5	5,0	0,220	4,791
6			
7			
8	5,5	0,162	5,347
9			
10			
11	6,0	0,140	5,868
12			
13			
14	6,5	0,123	6,385
15			

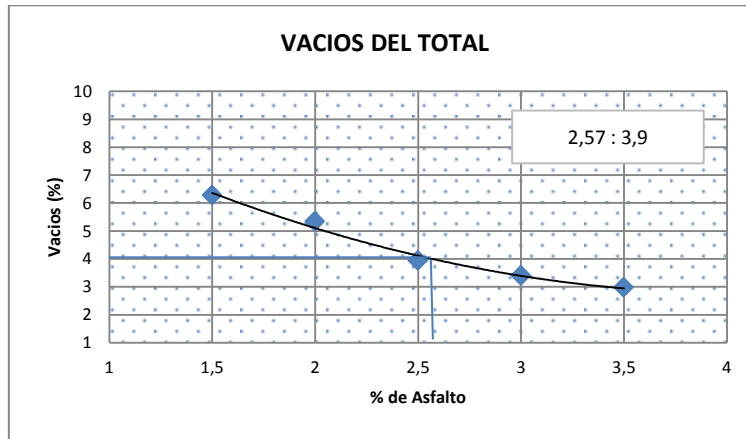
**Tabla 4.19** Resultados de los ensayos de Método Marshall en la mezcla asfáltica sin finos

Composición de la Mezcla	la Dosificación de (%) mezcla	Peso específico c/ agregado	N° de Briqueta	Peso de	Peso de	Peso de	Volumen	Densidad Briqueta			% Vacíos		
				Briqueta	Briqueta	Briqueta	de	Real	Promedio	Máxima	Mezcla	Agrega- dos	Llenos de Asfalto
				en el	en el	sumergi- da en	Briqueta	(Gmb)	Gmb	teórica			
				aire	aire	agua		(Kg/cm3)	(Kg/cm3)	(Gmm)			
(g)	(g)	(g)	(cm3)	(Kg/cm3)	(Kg/cm3)	(Kg/cm3)	(Vv)	(VAM)	(VFA)				
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j				
				a - c	a/d								
<b>Grava</b>	57,13	2,64	<b>1</b>	1167,3	1202,9	685,0	482,3	2,420	<b>2,42</b>	2,577	<b>6,28</b>	<b>11,82</b>	<b>46,9</b>
<b>Gravilla</b>	41,37	2,64	<b>2</b>	1164,9	1200,9	682,5	482,4	2,415					
<b>C. A.</b>	<b>1,5</b>		<b>3</b>	1165,4	1201,7	681,9	483,5	2,410					
<b>Grava</b>	56,84	2,64	<b>4</b>	1203,0	1235,6	702,7	500,3	2,405	<b>2,42</b>	2,557	<b>5,33</b>	<b>12,86</b>	<b>58,6</b>
<b>Gravilla</b>	41,16	2,64	<b>5</b>	1200,0	1233,1	708,4	491,6	2,441					
<b>C. A.</b>	<b>2,0</b>		<b>6</b>	1196,8	1229,6	701,4	495,4	2,416					
<b>Grava</b>	56,55	2,64	<b>7</b>	1176,8	1205,4	693,5	483,3	2,435	<b>2,44</b>	2,537	<b>3,94</b>	<b>13,85</b>	<b>71,5</b>
<b>Gravilla</b>	40,95	2,64	<b>8</b>	1179,2	1209,7	696,1	483,1	2,441					
<b>C. A.</b>	<b>2,5</b>		<b>9</b>	1177,4	1206,7	693,7	483,7	2,434					
<b>Grava</b>	56,26	2,64	<b>10</b>	1186,0	1212,4	697,9	488,1	2,430	<b>2,43</b>	2,517	<b>3,40</b>	<b>14,90</b>	<b>77,2</b>
<b>Gravilla</b>	40,74	2,64	<b>11</b>	1192,0	1216,1	701,6	490,4	2,431					
<b>C. A.</b>	<b>3,0</b>		<b>12</b>	1184,0	1208,8	697,4	486,6	2,433					
<b>Grava</b>	55,97	2,64	<b>13</b>	1156,6	1177,8	675,9	480,7	2,406	<b>2,42</b>	2,497	<b>2,97</b>	<b>16,41</b>	<b>81,9</b>
<b>Gravilla</b>	40,53	2,64	<b>14</b>	1171,0	1193,6	685,3	485,7	2,411					
<b>C. A.</b>	<b>3,5</b>		<b>15</b>	1162,4	1184,2	688,5	473,9	2,453					

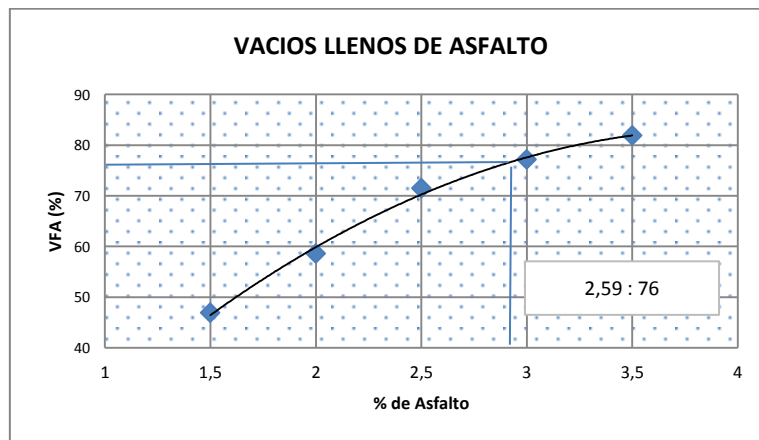
**Cuadro 4.8** Densidad Bulk Vs. Contenido de Asfalto



**Cuadro 4.9** Vacíos del total Vs. Contenido de Asfalto



**Cuadro 4.10** Vacíos llenos de Asfalto Vs. Contenido de Asfalto



**Tabla 4.20** Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica sin agregado fino

VALORES		
% DE	OBTENIDOS	DE ESPECIFICACIONES
ASFALTO	GRAFICOS	TECNICAS
Densidad	2,34	-
% Vacíos	4,0	3 - 5
VFA	77,0	75 - 85
% OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO	2,580	

### 4.2.3 Diseño de la Lechada de Cemento

El método de dosificación de la lechada de cemento, es la que esta especificada según la AASHTO, en la cual el único agregado participe para su diseño, es el agregado fino al 100%, cuyas características mecánicas están descritas según ensayos en el **Capítulo III**. El procedimiento de diseño está basado en el empleo de tablas, establecidas en el Manual de Laboratorio de Hormigón de la Carrera de Ingeniería Civil, UAJMS.

#### 4.2.3.1 Datos de diseño

Para la aplicación de esta lechada dentro de la mezcla asfáltica sin finos, se ha establecido empezar el diseño simulando un diseño de mortero simple.

**Tabla 4.21** Datos de entrada para el diseño de la lechada de cemento.

CLASE DE HORMIGON	MORTERO	Kg/cm2
P.E. Cemento	3,13	gr/cm3
P.E. Arena S.S.S	2,69	gr/cm3
Módulo de finura arena	2,58	-
% Absorción de la arena	2,29	%
Relación a/c	0,58	
Contenido de agua	180	Lt/m3
Aditivo Viscocrete	0.08	%

### 4.2.3.2 Desarrollo de la dosificación

**Tabla 4.22** Elección de la dosificación de la lechada

<b>DOSIFICACIONES DE MORTEROS</b>				
<b>Aplicación</b>	<b>Dosificación</b>	<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Agua</b>
	<b>Cemento/Arena</b>	<b>Kg/m3</b>	<b>Volumen/m3</b>	<b>lt/m3</b>
Muros de poca carga(1)	1 : 4	380	1.100	240
Muros cargados(2)	1 : 3	460	0.980	260
Revoques de relleno(3)	1 : 1	740	0.420	300
Raseos de fachadas(4)	2 : 3			

**Notas:** 1) El peso es de 1500 kg/m<sup>3</sup>  
 2) Para fábricas de ladrillo y raseos exteriores  
 3) Debe agregarse 5,9 Kg/m<sup>3</sup> de aditivo fluidificante  
 4) Dos partes de cemento y tres de arena

La dosificación de la lechada de cemento en este proyecto es simulado mediante el diseño de un mortero para **revoques de relleno**, siendo el tipo de revoque deseado para ser aplicado en la modificación de la mezcla asfáltica.

**Tabla 4.23** Dosificación por material y Proporciones

<b>Dosificación por Material</b>		
<b>MATERIAL</b>		<b>por m3</b>
<b>GRAVA (corregida)</b>	<b>kg</b>	0,0
<b>ARENA (corregida)</b>	<b>kg</b>	869,4
<b>CEMENTO</b>	<b>kg</b>	740,0
<b>AGUA</b>	<b>lt</b>	300,0
<b>VISCOCRETE</b>	<b>Kg</b>	5,92
<b>TOTAL</b>		1915,31

	CEMENTO	ARENA	ADITIVO
DOSIFICACION DE LECHADA DE CEMENTO	1,00	1,00	0,008

DOSIFICACION	POR	%
ARENA		45,39
CEMENTO		38,64
AGUA		15,66
ADITIVO		0,31

PESO  
ESPECIFICO DE LA LECHADA DE CEMENTO **2,521** gr/cm<sup>3</sup>

**Figura 4.13 Lechada de cemento**



## 4.2.4 Diseño de la Mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento por el método Marshall

### 4.2.4.1 Procedimiento

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación con mezcla modificada ya fabricada, son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de lechada, la cual será vertida a cálculo manual en laboratorio, de manera de lograr el mayor cubrimiento de la lechada dentro de los vacíos dentro las briquetas asfálticas si agregado fino.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- La lechada de cemento es preparada mediante la dosificación ya indicada, de tal manera que esta deberá ser tan fluida para poder penetrar mediante filtración en los espacios vacíos obtenidos en la fabricación de las briquetas sin agregado fino.
- Las briquetas ya fabricadas deberán estar encofradas de tal manera que se pueda evitar pérdidas en los laterales y en el fondo de estas al momento de verter la lechada sobre su superficie.

**Figura 4.14** Encofrado de las briquetas sin agregado fino para el vertimiento de la lechada



**Figura 4.15** Vertimiento de la lechada de cemento en las briquetas



- Mediante golpes, se tratara de que la lechada pueda penetrar en todos los espacios vacíos posibles de la mezcla asfáltica, logrando sellar a lo máximo posible los mismos.
- Como paso posterior, se dejara fraguar la briqueta por dos días, para lograr la lechada obtenga la rigidez deseada dentro de los vacíos. Posterior a esto se deberá realizar el respectivo curado de tal manera como se procede en una probeta de hormigón.

**Figura 4.16** Fraguado de la lechada de cemento en las briquetas



- Todos estos pasos deben repetirse para cada una de las briquetas a modificar.

- Posteriormente, se realizarán todos los ensayos que propone el método Marshall para poder calcular el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, y el porcentaje óptimo de lechada de cemento.

#### 4.2.4.2 Resultados

##### 4.2.4.2.1 Resultados obtenidos en el diseño de la mezcla modificada con lechada de cemento

**Tabla 4.24** Resultados del cálculo de Gravedades en la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

<b>Peso específico Bulk del Agregado total (Gsb)</b>	<b>2,640</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Peso específico del cemento asfáltico</b>	1,0037	g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso específico teórico máximo Promedio (Gmm)</b>	2,519	g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso específico de la lechada de cemento</b>	2,521	g/cm <sup>3</sup>

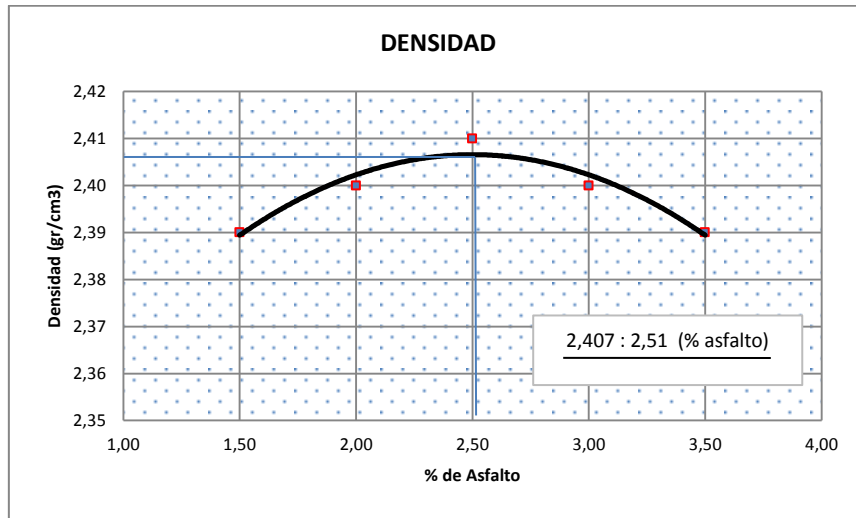
**Tabla 4.25** Resultados de Absorción de asfalto (PBA) y Contenido efectivo de asfalto en la mezcla asfáltica modificada

N° de Briqueta	% asfalto	% de lechada	Absorción de Asfalto y lechada (PBA)	Contenido efectivo de asfalto y lechada (PBE)
1				
2	1,5	18,0	0,263	17,784
3				
4				
5	2,0	17,0	0,219	16,818
6				
7				
8	2,5	16,0	0,182	15,847
9				
10				
11	3,0	15,0	0,162	14,862
12				
13				
14	3,5	14,0	0,164	13,859
15				

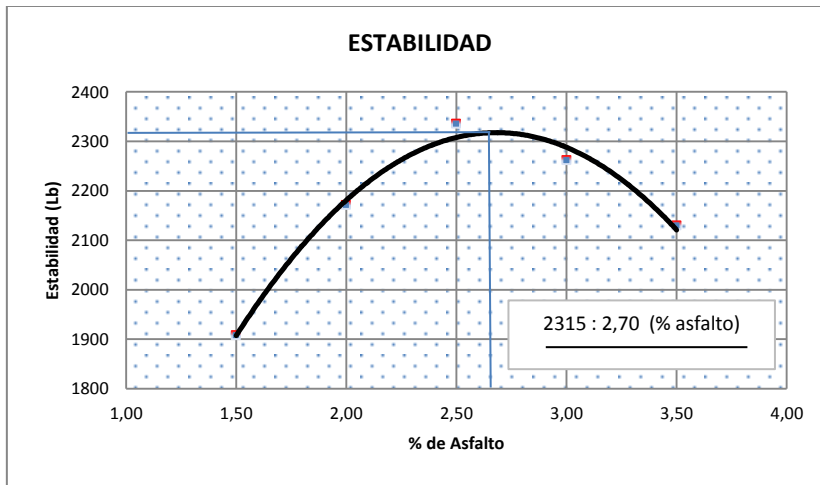
**Tabla 4.26** Resultados de los ensayos de Método Marshall en la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

N°	Dosificación %	% C. A.	% LECHADA	Densidad	Estabilidad (Vv)	(VAM)	(VFA)	Flujo (VFL)		
1	Grava 46,7	1,50	18,00	2,39	2509	6,30	32,75	80,8	10,67	35,10
	Gravilla 33,8									
2	Grava 47,0	2,00	17,00	2,40	2657	5,27	31,95	83,5	11,50	33,21
	Gravilla 34,0									
3	Grava 47,3	2,50	16,00	2,41	2715	4,38	31,14	85,9	12,40	31,28
	Gravilla 34,2									
4	Grava 47,6	3,00	15,00	2,40	2633	3,90	30,27	87,1	13,03	29,30
	Gravilla 34,4									
5	Grava 47,9	3,50	14,00	2,39	2455	3,91	29,34	86,7	14,13	27,24
	Gravilla 34,7									

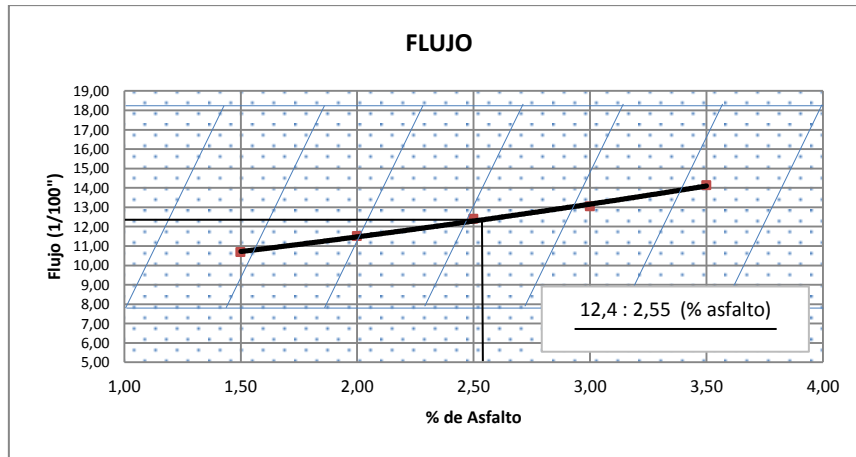
**Cuadro 4.11** Densidad Bulk (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de asfalto

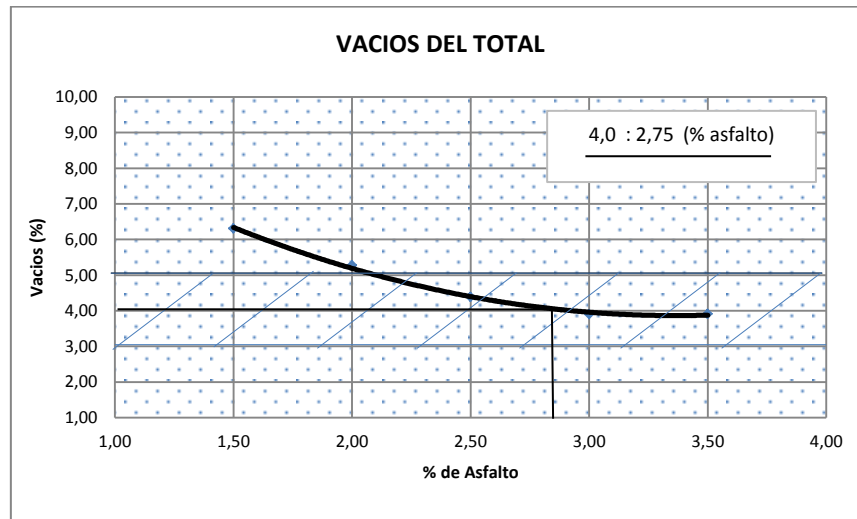
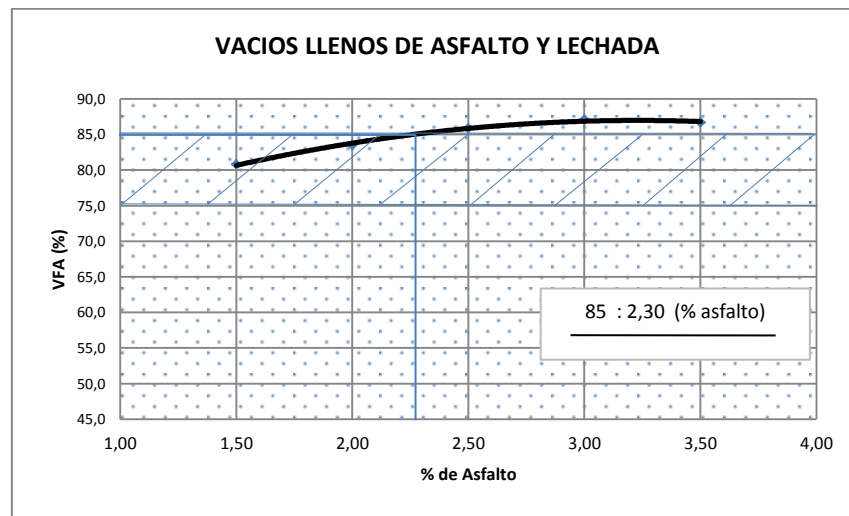


**Cuadro 4.12** Estabilidad (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de asfalto



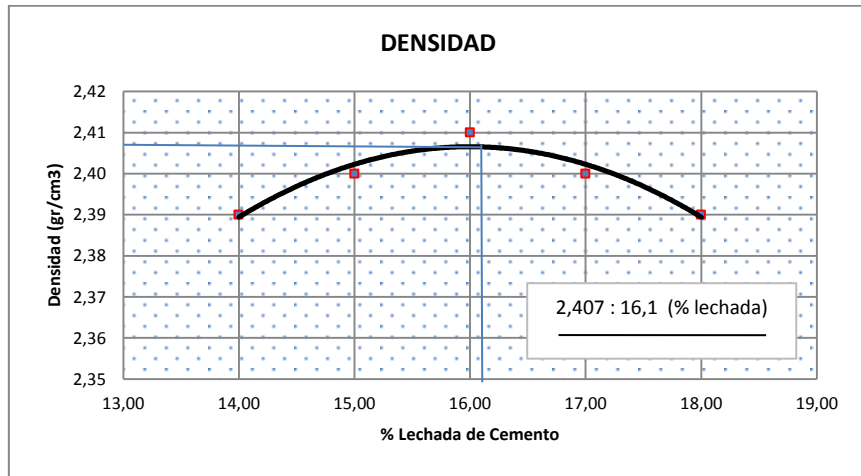
**Cuadro 4.13** Flujo (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de asfalto



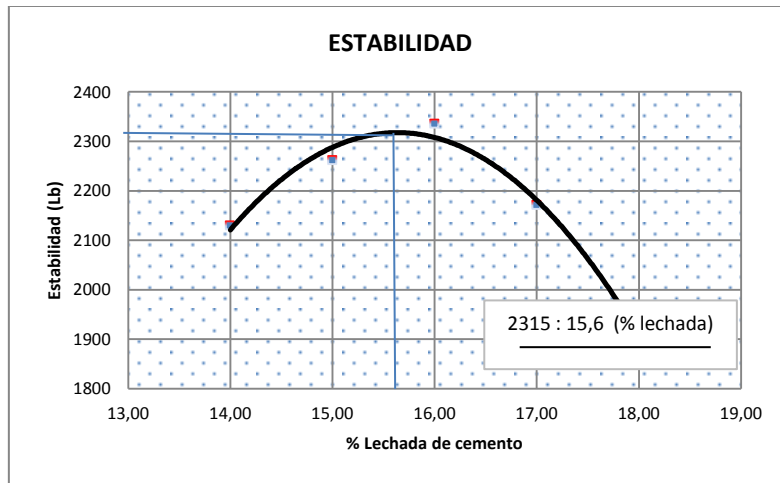
**Cuadro 4.14** Vacíos del total (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de asfalto**Cuadro 4.15** VFA (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de asfalto**Tabla 4.27** Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica modificada

VALORES		
% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRAFICOS	ESPECIFICACIONES TECNICAS
Densidad	2,407	-
% Vacíos	4,0	3 - 5
VFA	85	75 - 85
Estabilidad	2315	> 1800 Lb
Fluencia	12,4	8 - 18
<b>% Óptimo de asfalto para el proyecto</b>		
<b>2,54 %</b>		

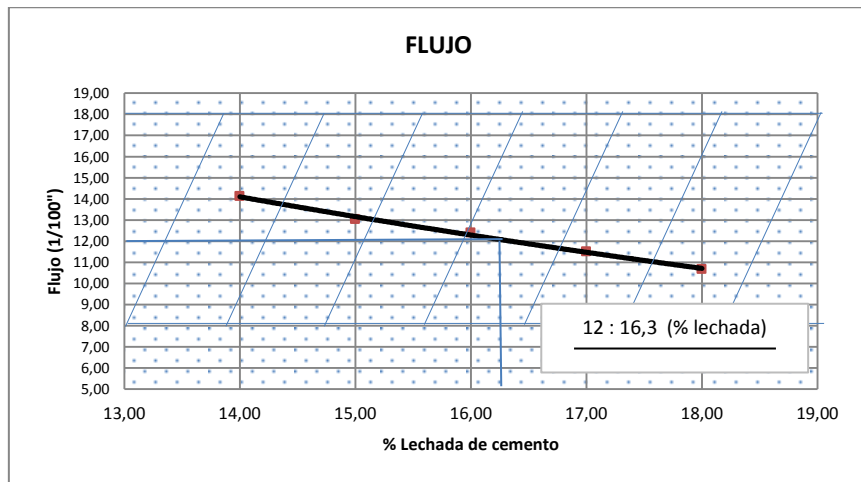
**Cuadro 4.16** Densidad Bulk (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de lechada de cemento

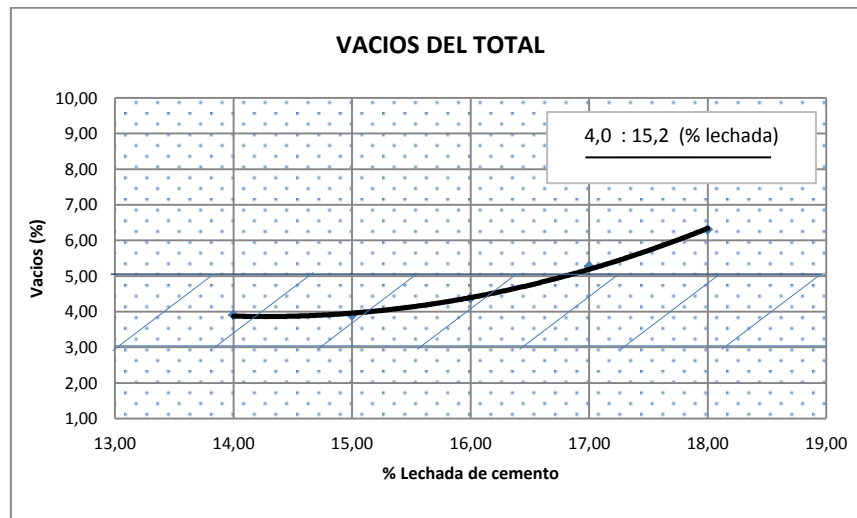
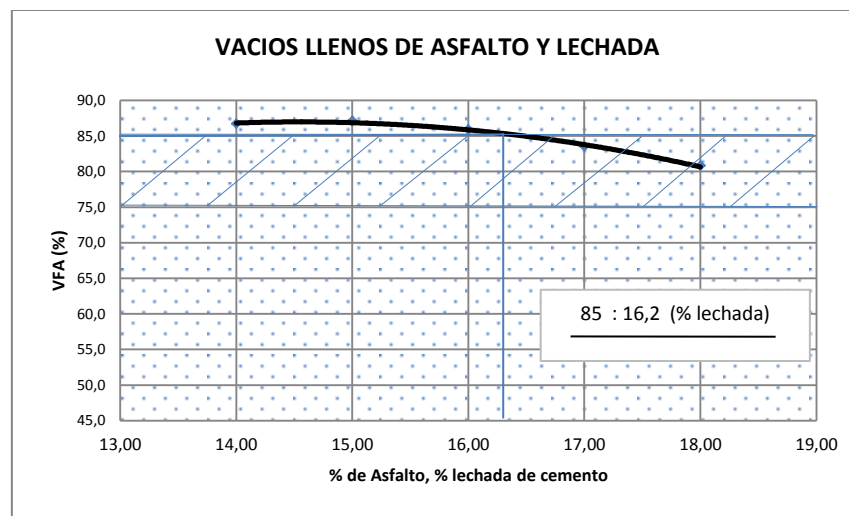


**Cuadro 4.17** Estabilidad (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de lechada de cemento



**Cuadro 4.18** Flujo (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de lechada de cemento



**Cuadro 4.19** Vacíos del total (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de lechada de cemento**Cuadro 4.20** VFA (mezcla modificada) Vs. Porcentaje de lechada de cemento**Tabla 4.28** Determinación de porcentaje óptimo de lechada de cemento para la mezcla asfáltica modificada

VALORES		
% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRAFICOS	ESPECIFICACIONES TECNICAS
<b>Densidad</b>	2,407	-
<b>% Vacíos</b>	4,0	3 - 5
<b>VFA</b>	85	75 - 85
<b>Estabilidad</b>	2315	> 1800 Lb
<b>Fluencia</b>	12,0	8 - 18
<b>% Optimo de lechada de cemento para el proyecto</b>	<b>15,90%</b>	

## 4.3 ANALISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIONES

### 4.3.1 Análisis comparativo de las mezclas asfálticas

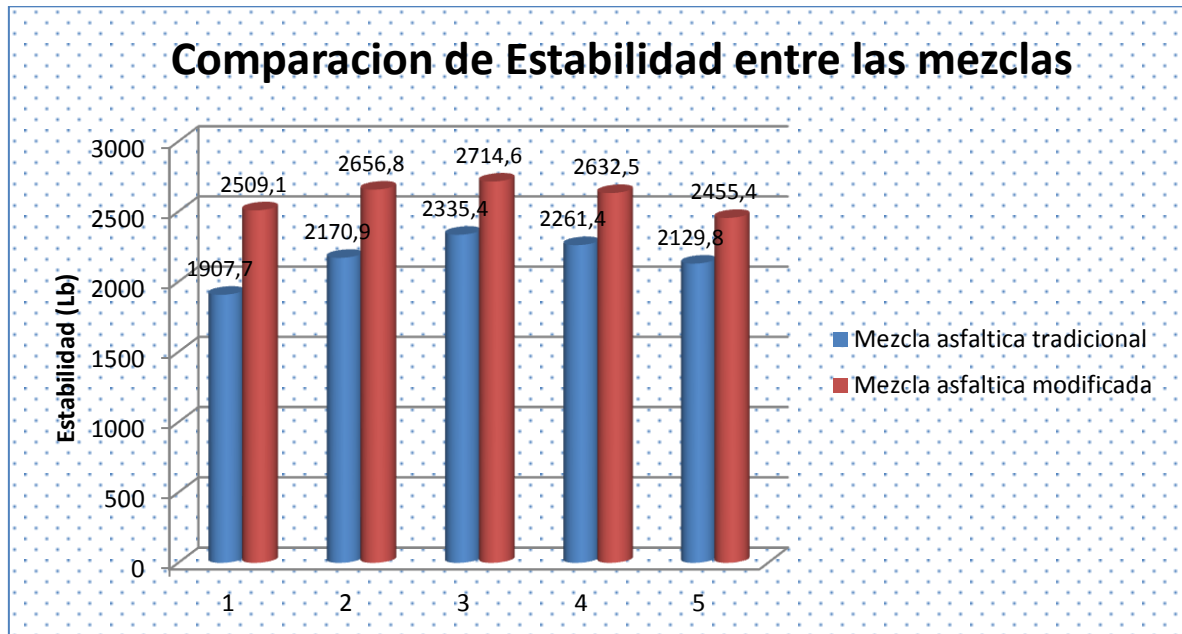
**Tabla 4.29** Resultados comparativos finales

Características Mecánicas	Resultados obtenidos en el diseño de las mezclas asfálticas		Especificaciones técnicas propuestas para método de diseño Marshall
	Mezcla Asfáltica Tradicional	Mezcla asfáltica Modificada con lechada de cemento	
Densidad	2,43	2,34	-
% Vacíos	4,0	4,0	3 - 5
VFA	80,0	77,0	75 - 85
Estabilidad	2315,0	2710,0	> 1800 Lb
Fluencia	12,0	13,0	8 - 18

Con los resultados obtenidos del ensayo Marshall tanto para la mezcla modificada con lechada de cemento, como así para la mezcla asfáltica tradicional, se procedió a realizar los cuadros 4.22 y 4.23 que enfoca a la estabilidad y el flujo, de la mezcla modificada con respecto a la mezcla tradicional, con la finalidad de realizar un análisis comparativo de resultados mismos que son importantes para determinar las mejoras o desmejoras de la mezcla.

**Cuadro 4.21** Comparación de resultados de la **Estabilidad** entre la mezcla asfáltica modificada obtenida con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

Estabilidad (Lb)				
N°	% asfalto	% lechada	Mezcla tradicional	Mezcla modificada
1	1,5	18	1907,7	2509,1
2	2,0	17	2170,9	2656,8
3	2,5	16	2335,4	2714,6
4	3,0	15	2261,4	2632,5
5	3,5	14	2129,8	2455,4

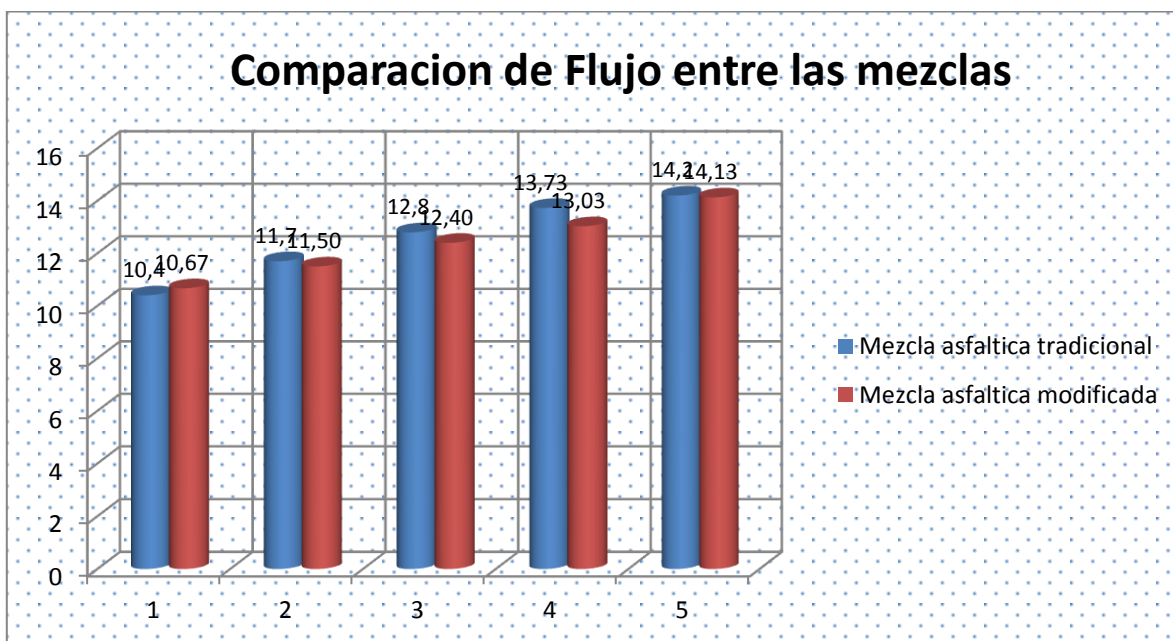


En el cuadro 4.21, puede apreciarse que la **Estabilidad Marshall** de la mezcla modificada con lechada de cemento, ha incrementado en comparación a la estabilidad obtenida con la mezcla asfáltica tradicional. Esto se debe a que la mezcla modificada que se realizó optimizó su porcentaje de vacíos mediante la adición de la lechada, haciendo a la mezcla más duradera y resistente a las fallas por agrietamiento.

De tal manera, la estabilidad máxima obtenida de la mezcla modificada se encuentra dentro del rango establecido por las especificaciones técnicas, donde presenta un valor mayor a las 1800 Lb, valor admisible para una vía de tráfico pesado.

**Cuadro 4.22** Comparación de resultados de **Flujo** entre la mezcla asfáltica modificada obtenida con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

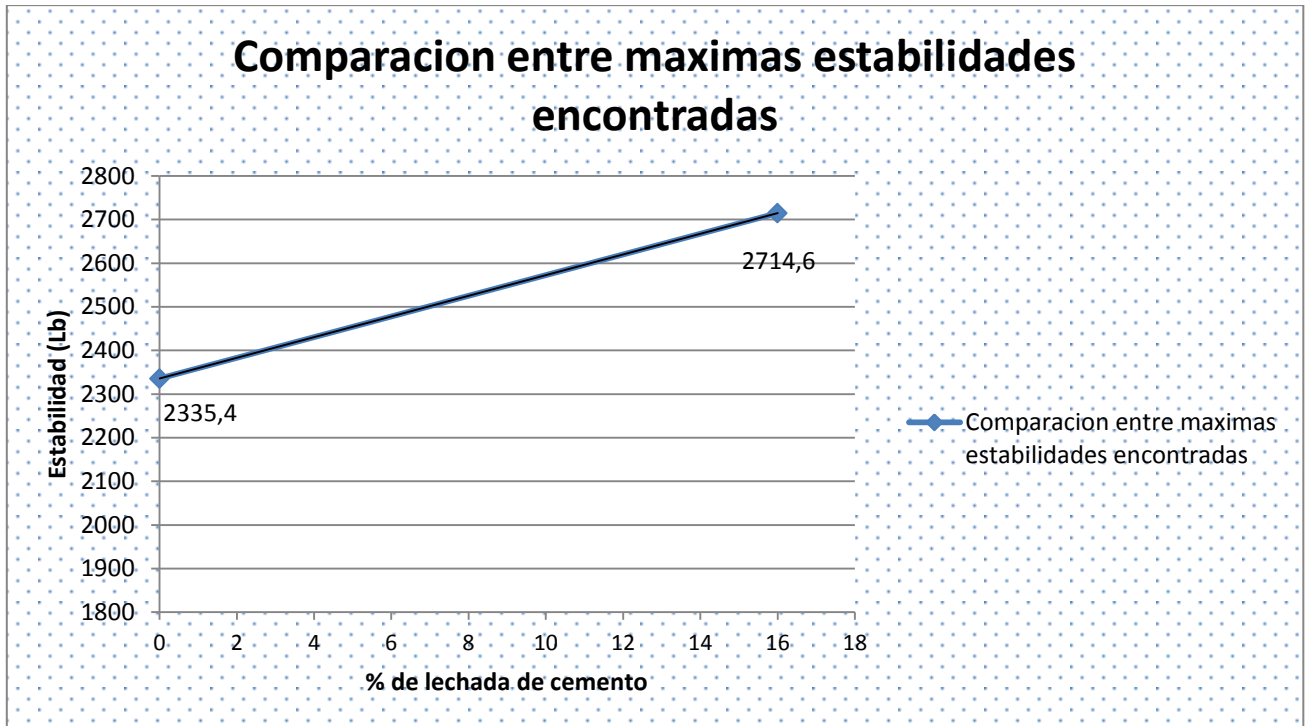
<b>Flujo (1/100")</b>				
N°	% asfalto	% lechada	Mezcla tradicional	Mezcla modificada
1	1,5	2,5	10,4	10,67
2	2,0	3	11,7	11,50
3	2,5	3,5	12,8	12,40
4	3,0	4	13,73	13,03
5	3,5	4,5	14,2	14,13



En el cuadro 4.22 se puede apreciar una disminución del flujo entre ambas mezclas asfálticas, pero están dentro del rango de valores que establecen las especificaciones técnicas del diseño de mezclas para tráfico pesado.

### 4.3.2 Afección en la estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

**Cuadro 4.23** Afección de la estabilidad Marshall



En el cuadro 4.23 se puede observar de qué manera la máxima estabilidad encontrada en la mezcla asfáltica modificada ha incrementado en comparación de la mezcla tradicional, con una **diferencia del 13,97 %**. Con este aumento de resistencia calculado, esta mezcla demuestra que puede crear buenos resultados en su aplicación en trabajo.

El incremento de la estabilidad Marshall en esta nueva mezcla modificada, del **13,97%**, nos da referencia a un **incremento de la vida útil de esta nueva mezcla en el mismo porcentaje**, ya que al mejorar la resistencia de la mezcla, proporcionamos mayor durabilidad a largo plazo en comparación de las mezclas asfálticas tradicionales habituales.

### 4.3.3 Análisis de precios unitarios

#### 4.3.3.1 Precio unitario de la mezcla asfáltica tradicional

Descripción	UNID.	CANTIDAD	Precio Productivo	Costo Total
<b>1. EQUIPO Y MAQUINARIA</b>				
-				
Planta de concreto asfáltico	h	0,010	40,24	0,40
Cargador frontal CAT 930	h	0,011	292,32	3,22
Grupo electrógeno IVECO AIFO, 50 kVA	h	0,020	76,56	1,53
Equipo pavimentador CAT AP30	h	0,025	689,04	17,23
Compactador de neumáticos CAT PS-180, 77 HP	h	0,008	167,04	1,29
Volqueta, cap. = 12 m3	h	0,014	215,76	3,02
HERRAMIENTAS - % DE LA MANO DE OBRA			0,05	1,33
<b>TOTAL EQUIPO Y MAQUINARIA</b>				<b>28,02</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
-				
Técnico	h-h	0,050	14,50	0,72
Peón	h-h	0,100	9,00	0,90
Operador Equipo Pesado	h-h	0,025	14,50	0,36
Operador Equipo Pesado	h-h	0,002	17,50	0,04
Chofer	h-h	0,332	15,50	5,15
BENEFICIOS SOCIALES - % DE LA MANO DE OBRA			55,00%	3,94
IMPUESTO IVA - % DE MANO OBRA + CARGAS SOCIALES			14,96%	1,66
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>12,77</b>
<b>3. MATERIALES</b>				
-				
Cemento asfáltico Betupen plus 85/100	T	0,13	10.360,00	1.346,80
Agregado 3/4"	m3	0,34	120,75	41,06
Agregado 3/8"	m3	0,14	120,75	16,91
Agregado fino	m3	0,35	120,75	42,26
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>1.447,02</b>
<b>4. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>				
-				
<b>TOTAL ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>				<b>0,00</b>
<b>GASTOS GENERALES</b>				
5.	GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3+4		10,00%	148,78
-				
UTILIDAD - % DE 1+2+3+4 + GASTOS GENERALES			10,00%	163,66
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DEL SUBTOTAL			3,09%	55,63
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>				<b>368,07</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO Bs.</b>				<b>1.855,88</b>

### 4.3.3.2 Precio unitario de la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

Descripción	UNID.	CANTIDAD	Costo	
			Productiv.	Total
<b>1.- EQUIPO Y MAQUINARIA</b>				
Planta de concreto asfáltico	h	0,010	40,24	0,40
Cargador frontal CAT 930	h	0,011	292,32	3,22
Grupo electrógeno IVECO AIFO, 50 kVA	h	0,020	76,56	1,53
Equipo pavimentador CAT AP30	h	0,025	689,04	17,23
Compactador de neumáticos CAT PS-180	h	0,008	167,04	1,29
Volqueta, cap. = 12 m <sup>3</sup>	h	0,014	215,76	3,02
Planta dosificadora de Hormigones	h	0,066	146,16	9,65
Mixer cap=8m <sup>3</sup>	h	0,066	76,56	5,05
Compactador Rodillo Vibratorio	h	0,012	299,98	3,60
HERRAMIENTAS - % DE LA MANO DE OBRA			5,00%	36,33
			<b>TOTAL EQUIPO Y MAQUINARIA</b>	<b>81,31</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
Técnico	h-h	0,050	14,50	0,72
Peón	h-h	0,100	9,00	0,90
Operador Equipo Pesado	h-h	0,025	14,50	0,36
Operador Equipo Pesado	h-h	0,250	14,50	3,63
Técnico	h-h	0,066	14,50	0,96
Operador Equipo Pesado	h-h	0,066	14,50	0,96
Operador Equipo Pesado	h-h	0,012	14,50	0,17
BENEFICIOS SOCIALES - % DE LA MANO DE OBRA			55,00%	4,24
IMPUESTO IVA - % DE MANO OBRA + CARGAS SOCIALES			14,96%	1,79
			<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>13,72</b>
<b>3.- MATERIALES</b>				
Cemento asfáltico Betupen plus 85/100	T	0,06	10.360,00	621,60
Agregado 3/4"	m <sup>3</sup>	0,42	120,75	50,72
Agregado 3/8"	m <sup>3</sup>	0,30	120,75	36,23
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0,05	120,75	6,04
Cemento Portland	kg	109,21	1,10	120,13
Aditivo Viscocret	kg	5,92	51,50	304,88
				<b>1.139,59</b>
<b>4.- ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>				
			<b>TOTAL ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>	<b>0,00</b>
<b>GASTOS GENERALES</b>				
5.- GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3+4			10,00%	119,87
UTILIDAD - % DE 1+2+3+4 + GASTOS GENERALES			10,00%	135,45
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DEL SUBTOTAL			3,09%	46,04
			<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>	<b>301,36</b>
			<b>TOTAL PRECIO UNITARIO Bs.</b>	<b>1.535,97</b>

#### 4.3.4 Análisis de resultados a los ensayos aplicados a los agregados y al cemento asfáltico

##### 4.3.4.1 Agregados procedentes de la Chancadora Tacuara

**Tabla 4.30** Caracterización del Agregado pétreo de la Chancadora Tacuara usados para la mezcla asfáltica en caliente tradicional, y para la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

ENSAYOS	NORMA	PARAMETROS		RESULTADOS	UNIDAD	OBSERVACIONES
		Máximo	Mínimo			
Peso específico del agregado fino	AASHTO T-84			2,69	gr/cm <sup>3</sup>	
Absorción del agregado fino				2,29	%	
Peso específico del agregado grueso	AASHTO T-85			2,64	gr/cm <sup>3</sup>	
Absorción del agregado grueso				1,25	%	
Equivalente de Arena	ASTM D 2419		45%	45,86	%	CUMPLE
Desgaste de los Ángeles agregado grueso	AASHTO T-96	40%		21,23	%	CUMPLE

#### 4.3.4.2 Cemento Asfáltico BETUPEN PLUS 85/100

**Tabla 4.31** Caracterización del Cemento asfáltico utilizado para la mezcla asfáltica en caliente tradicional, y para la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento

ENSAYOS	NORMA	ESPECIFICACIONES		RESULTADOS	UNIDAD	OBSERVACIONES
		Máximo	Mínimo			
Viscosidad de material bituminoso	AASHTO T-72	6000	30	296,75	cts	CUMPLE
Penetración en cementos asfálticos	AASHTO T-49	100	85	94,5	0,1 mm	CUMPLE
Punto de inflamación	AASHTO T-48		235	241,5	°C	CUMPLE
Peso específico material bituminoso	AASHTO T-228	1,05	0,95	1,0037	gr/cm <sup>3</sup>	CUMPLE

## CAPITULO V

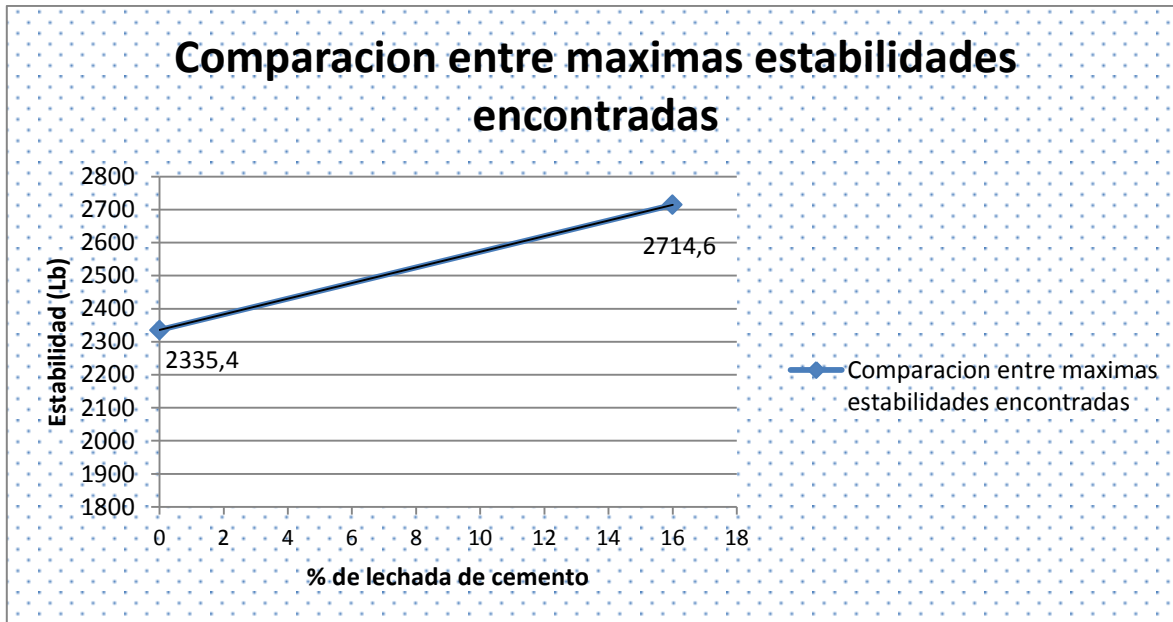
### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

En este capítulo se presentaran las conclusiones obtenidas durante el desarrollo y culminación de este Proyecto de Ingeniería Civil “**AFECCION DE LA ESTABILIDAD MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFALTICA TRADICIONAL MODIFICANDOLA MEDIANTE LA ADICION DE LECHADA DE CEMENTO, EN REEMPLAZO AL VOLUMEN DE AGREGADO FINO**”, los cuales estarán presentados en base a los resultados de los ensayos realizados, y de tal manera lograr con esto establecer un análisis comparativo de las mezcla asfáltica modificada y la mezcla asfáltica tradicional.

##### 5.1.1 Conclusiones generales

- Se hizo la comparación entre ambas mezclas asfálticas, en las cuales se determinó la afección producida en la Estabilidad cuando una mezcla asfáltica es modificada con lechada de cemento. En la **mezcla asfáltica tradicional**, la estabilidad al porcentaje óptimo de asfalto es de **2335.4 Lb**, mientras que la **mezcla modificada con lechada** el valor de la estabilidad es de **2714.6 Lb**. En este caso, la Estabilidad incremento en un 13,97 %, este valor proporciona a esta nueva mezcla encontrada la capacidad de ser aplicada como capa de rodadura, ya que cumple con todas las especificaciones técnicas.



- Se obtuvieron las características del cemento asfáltico, las cuales dieron resultados satisfactorios según lo que especifica los parámetros de evaluación en el control de materiales, cuyos resultados están especificados en el apéndice 4.3.3 del Capítulo IV.
- De la misma manera, se logró obtener buenos resultados en la evaluación de control de calidad sobre los agregados pétreos que intervienen en el diseño de mezclas asfálticas en este estudio, los cuales han cumplido con las especificaciones técnicas designadas a los mismos.
- Todos los ensayos concernientes a la calidad de los materiales usados en este proyecto, como ser los agregados pétreos y el cemento asfáltico, demuestran su cumplimiento a la norma establecida por la ASTM, los cuales prometen un buen funcionamiento en la realización de las mezclas asfálticas.
- El contenido mínimo de asfalto que se obtuvo para la mezcla asfáltica tradicional, fue de 4,50 %, con el cual se realizó los incrementos mediante la fabricación de 3 briquetas por incremento. Se determinó el porcentaje óptimo de contenido de asfalto en la mezcla mediante las curvas de diseño, con un valor promedio de 5,50 %, dado

para los agregados extraídos de la Chancadora de Taucara. De esta mezcla, se logró obtener el valor de **estabilidad** deseado para ser utilizado como patrón de comparación.

- Se hizo cálculo del contenido mínimo de asfalto para la mezcla asfáltica sin agregado fino, donde la fracción obtenida fue de 2,5 % de cemento asfáltico, con la cual se realizaron tanto incrementos y sustracciones de porcentajes en un 0,5%. Se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto con un contenido de 2,58%.
- Se realizó la dosificación correspondiente de la lechada de cemento, en la cual los resultados en proporciones fueron de: 45.39% de arena; 38.64% de cemento; 15.66% de agua y 0,31 de aditivo según la cantidad de cemento. La adición de este aditivo, permitió el diseño de un mortero de hormigón de consistencia fluida, permitiendo de tal forma su penetración dentro de los vacíos en la mezcla asfáltica sin agregado fino.
- Se calculó el diseño Marshall de la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento, en la cual la lechada se fue incrementado a partir de un porcentaje mínimo de 2,5 %, sobre las briquetas con mezcla si agregado fino ya constituidas. De este ensayo, se obtuvo mediante las curvas de diseño un porcentaje óptimo de lechada de 15.90 %, la cual destaco la estabilidad con más incremento, junto a un porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 2,5%.
- Se obtuvo la dosificación de agregados para las mezclas asfálticas donde:
  - En la mezcla asfáltica tradicional:
    - ✓ Agregado 3/4"= 40%
    - ✓ Agregado 3/8" = 17%
    - ✓ Agregado fino= 43%
  - En la mezcla asfáltica sin agregado fino:

- ✓ Agregado 3/4"= 58%
  - ✓ Agregado 3/8"= 42%
- Se realizó el análisis de precios unitarios por metro cubico (m3) de producción y colocado en obra de las mezcla asfálticas, en la cual pudimos obtener un precio de **Bs. 1855,88 para la mezcla asfáltica tradicional**, y un precio de **Bs. 1535,97 para la mezcla modificada con lechada de cemento**.

Tomando en cuenta la estabilidad Marshall estudiada en ambas mezclas, podemos definir que la mezcla modificada con lechada de cemento presenta una mejor resistencia en su aplicación a menor costo, considerándola como buena opción en su aplicación como material de capa de rodadura en las obras viales.

- Como conclusión final, se determina que, siendo la mezcla asfáltica modificada con lechada de cemento, una mezcla de experimento; esta pueda ser aplicada como prueba para observar con el tiempo su comportamiento de resistencia a las cargas. Los lugares establecidos serán aquellos donde la disposición de tránsito pesado es estacionario o está en reposo, es decir en sitios como estacionamientos industriales, terminal de buses, estaciones de servicio, y otros.

## 5.2 Recomendaciones

- Este trabajo realizado, es una investigación sobre la nueva tecnología que se está produciendo en el mundo de la construcción de pavimentos de este siglo, sobre la cual se espera se sigan profundizando estudios para lograr una mejoría en la calidad y costos de nuestras vías de comunicación.
- Debe tomarse en cuenta, que el cemento asfáltico que llega a nuestras plantas de producción de mezclas asfálticas, varía en sus propiedades físico mecánicas en cada abastecimiento, por lo cual se recomienda siempre realizar los ensayos de peso

específico, penetración, viscosidad y punto de ignición mínimo del asfalto; antes que este sea aplicado en el diseño de las mezclas, ya que se produciría variaciones en los cálculos de densidades.

- En la fabricación de la mezcla asfáltica sin contenido de agregado fino, se recomienda tanto la reducción como el incremento del contenido de asfalto en  $\pm 0,5\%$ , ya que la mezcla no presenta agregado fino, lo cual un elevado exceso de ligante asfáltico, produciría exudaciones precisamente causadas por la carencia de este material pétreo.
- Para lograr un incremento de la estabilidad en la mezcla modificada, se recomienda el enfriamiento de la mezcla sin finos de por lo menos 2 noches antes de que la lechada de cemento sea aplicada. Esto se da por que la carencia de finos y la reducción de ligante en la mezcla, hace más tardía la adhesividad entre los materiales pétreos que lo conforman.
- Se recomienda utilizar materiales pétreos de construcción cuyas características físico mecánicas cumplan con las especificaciones técnicas aprobadas por el método de diseño de mezclas asfálticas Marshall, ya que el ignorar de estas produciría serios defectos en el diseño, y más aún en su aplicación y uso como pavimentos.
- En la lechada de cemento se recomienda el uso de aditivo fluidificante, para obtener una pasta de cemento tan fluida la cual sea capaz de penetrar en todos los vacíos posibles de la mezcla sin finos, y de tal manera en su fraguado crear un aumento dentro de la mezcla asfáltica modificada.

### 5.1.3 Bibliografía

- AASHTO – 97, “Diseño de pavimentos” Universidad Nacional de San Juan, Argentina – Año 2000.
- CEMEX, “Pavimentos” Editorial CEMEX – Año 2004
- GONZALEZ. R. Juan, “Diseños de lechadas de cemento mediante la teoría concreto liquido utilizando un factor de empaquetamiento mejorado” Maracaibo - Junio 2007.
- INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas” Sanfandilla, Qro. – 2004
- INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, “Análisis comparativos de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas” Sanfandilla, Qro. – 2005
- INVIAS, “Especificaciones de mezclas asfálticas abiertas”
- MANUAL DE CARRETERAS DE PARAGUAY, “Normas para materiales y ensayos de materiales” Asunción - Año 2009
- ORGAZ Johnny, “Manual de laboratorio de Hormigón” Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Año 1991
- PADILLA RODRÍGUEZ Alejandro, “Mezclas Asfálticas”
- POLANCO RODRIGUEZ Abraham, “Manual de prácticas de laboratorio de pavimentos”

- SERVICIO NACIONAL DE CAMINOS, “Mantenimiento periódico de carreteras” La Paz, Bolivia – Año 2003
- THE ASPHALT INSTITUTE, “Tratamientos asfálticos Superficiales” Primera edición en español – Año 1965
- UNIVERSIDAD DEL SALVADOR, “Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño” Ciudad Universitaria – Septiembre de 2012