

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

La mezcla asfáltica en caliente es un material compuesto por un asfalto y un agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva en forma muy efectiva, por lo que resulta un material muy atractivo para fabricar pavimentos flexibles. El asfalto como todo material presenta limitaciones, siendo una de las principales la oxidación del mismo.

Debido a que el asfalto está constituido por moléculas orgánicas, estas reaccionan con el oxígeno del medio ambiente, esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto y el resultado es una estructura más rígida y frágil es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento.

El endurecimiento del asfalto debido a la oxidación se produce debido a las elevadas temperaturas a las que está sometido el asfalto, en su mayor parte de este endurecimiento se produce durante el proceso de mezclado en caliente y durante la etapa de colocación y compactación de la mezcla asfáltica debido a que en estos procesos se emplea una alta temperatura en donde el asfalto se encuentra adherido al agregado en forma de una película muy delgada que está en contacto con grandes cantidades de oxígeno por lo que la oxidación se produce a una velocidad mayor a la que ocurre en el servicio de los pavimentos.

Debido a que el asfalto es un componente importante para la elaboración de mezclas asfálticas y pavimento, nos interesa conocer acerca de sus limitaciones en cual en este caso es la fragilidad y rigidez que sufre el asfalto por la oxidación.

Por lo que en el presente trabajo se realizara un análisis de como es el comportamiento de la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación por temperatura en un tiempo definido.

Se realizará un análisis en la que a diferentes muestras de mezclas asfálticas que se elaborarán poniéndolos a prueba a diferentes temperaturas en lo que posteriormente se

evaluarán como es que esto afectó a la fragilidad y rigidez del asfalto mediante el flujo y la estabilidad de Marshall respectivamente.

Este trabajo está elaborado con un fin académico que abarca una mejor comprensión sobre uno de los principales componentes del pavimento como es en el caso del asfalto y cómo es que sus limitaciones pueden afectar a la mezcla asfáltica y al pavimento.

Para que los estudiantes puedan tener una mejor comprensión del tema y puedan buscar solución a este problema con el fin de tener pavimentos más durables y de mejor calidad.

## **1.2. Justificación**

El presente trabajo se realizó por que el asfalto al ser uno de los componentes de la mezcla asfáltica y del pavimento es importante determinar como el pavimento es afectado por las limitaciones del asfalto en este caso la oxidación debido a la temperatura en las diferentes etapas por la que pasa el pavimento.

Para que se pueda entender mejor cómo es que afecta la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación y envejecimiento del mismo causado por la temperatura el cual es uno de los principales culpables de la generación de grietas o fisuras en el pavimento la cual con lleva que poco a poco vaya dañándose el pavimento hasta terminar con su vida útil, la cual en muchos de los casos es antes de lo previsto.

La rigidez y fragilidad del asfalto afecta sobre todo a las carreteras las cuales fueron o serán emplazadas en zonas de climas de elevadas temperaturas haciendo que el asfalto se oxide más rápido y se vuelva rígido y frágil

Este trabajo servirá sobre todo a los estudiantes de ingeniería civil para que tengan más referencia sobre cómo afecta al pavimento las limitaciones de sus componentes como ser en este caso la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo causado por la temperatura y que posteriormente puedan realizar proyectos de grado buscando soluciones factibles a esta problemática.

A los ingenieros civiles los cuales no están muy familiarizados con el tema y que les sirva de ayuda para entender como la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo causado por la temperatura puede causar deterioros y reducir la vida útil del

pavimento, y que pueda considerar a la hora de diseñar una carretera en zonas de climas elevados.

El aporte académico del presente trabajo se detallará de como a medida que va aumentando la temperatura en muestras de pavimento se van produciendo modificaciones en las propiedades de los pavimentos debido a la rigidez y fragilidad del asfalto por la oxidación del mismo. Para que los estudiantes e ingenieros civiles tengan más referencia acerca de esta problemática.

### **1.3. Planteamiento del problema**

#### **1.3.1. Situación problemática**

Debido a que el pavimento es una de las estructuras más utilizadas en la actualidad para la circulación de vehículos, nos es de interés analizar el asfalto al ser uno de sus principales componentes. El asfalto como cualquier material presenta sus limitaciones siendo una de estas la rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo que puede tener influencia directamente en el pavimento.

La rigidez y fragilidad del asfalto debido a la oxidación del mismo es una limitación del asfalto que está ligada directamente a las elevadas temperaturas por las que pueda pasar el pavimento en sus diferentes etapas.

Iniciándose con esta reacción de oxidación del asfalto en la etapa de mezclado, compactación y colocación de la mezcla asfáltica y continua por toda la etapa de servicio del pavimento.

Produciéndose con mayor rapidez en aquellos pavimentos los cuales se encuentren emplazados en zonas con climas de temperaturas elevadas permitiendo que el pavimento se agriete o fisure más rápido permitiendo que se pueda dañar más rápido a lo previsto hasta llegar a la vida útil del pavimento.

Este problema no solo altera y daña la estructura del pavimento sino que también genera daño económico ya que este problema provoca que el pavimento dañado sea retirado o reparado con mayor anterioridad a lo planeado en su diseño.

### **1.3.2. Problema**

De qué manera y en qué magnitud la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación afecta a los pavimentos por la influencia de la temperatura?

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación para determinar cómo es afectado un pavimento en servicio por la temperatura.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Describir los conceptos del pavimento, oxidación y envejecimiento.
- Caracterizar y evaluar la calidad del cemento asfáltico y de los agregados.
- Analizar la rigidez y fragilidad del asfalto mediante el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall respectivamente en mezclas asfálticas en caliente.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos.
- Establecer conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos.

### **1.5. Hipótesis**

Si la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación del mismo altera las propiedades del asfalto produciendo fisuras en el pavimento, entonces terminara dañando con mayor rapidez al pavimento.

### **1.6. Definición de variables independiente y dependiente**

#### **1.6.1. Variable independiente**

- Cemento asfáltico en mezclas asfálticas.

#### **1.6.2. Variable dependiente**

- Fragilidad y rigidez del asfalto (depende de la oxidación y por ende de la temperatura).

### 1.6.3. Cuadro de operalización de variables

Variable	Concepto	Dimensión	Indicadores
<b>Independiente</b> Cemento asfáltico	Material aglomerante sólido o semisólido que se ablanda al calentarse que se usan como aglomerante en mezclas asfálticas	-Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para fabricación de mezclas asfálticas en caliente	-Método Marshall
		-Caracterización del cementos asfálticos	-Índice de penetración -Viscosidad Saybolt Furol -Ductilidad -Punto de llama e ignición -Punto de Ablandamiento -Película delgada
<b>Dependiente</b> Fragilidad y rigidez del asfalto	Resultado de la oxidación del asfalto por la acción de la temperatura	-Alteración de las propiedades físico-químicos del pavimento	-Deterioro del pavimento a través del paso del tiempo -menor durabilidad -Formación de agrietamientos o fisuras
		-Cambio de las propiedades de la mezcla asfáltica	Ensayos de laboratorio -estabilidad (N) y -flujo (mm) Marshall
		-Efecto resultante de la oxidación	-Alteración de la estructura molecular del asfalto -Alteración del orden químico, físico, mecánico, y reologico de la mezcla asfáltica

## **1.7. Alcance de la investigación**

El presente trabajo de investigación radica en analizar la variación de la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación del mismo, en la cual el análisis de la fragilidad y rigidez se realizara con la ayuda de briquetas de mezclas asfálticas en caliente, con agregados y cemento asfáltico PEN 85/100 de la empresa betunel de Brasil obtenido de la chancadora de charajas, que posteriormente se oxidada por temperatura y se realizara el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall los cuales serán relacionados con la rigidez y fragilidad respectivamente para así obtener datos a los cuales se realizará un análisis estadístico para obtener los resultados y sacar las conclusiones y recomendaciones correspondientes al tema de investigación.

Comenzaremos realizando una introducción de cuáles serán el contenido del proyecto, del porque se quiere realizar este tipo de estudio y aplicación, también definimos los objetivos con el fin de definir qué es lo que se quiere lograr y cómo lo lograremos, luego en el diseño metodológico se realiza la observación del tema de estudio analizando de cómo se realizara el análisis de la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación.

Se procede a realizar una elaboración de recopilación de información de varios libros y/o proyectos, investigaciones u otros, todo relacionado sobre la fragilidad y rigidez del asfalto debido a la oxidación, los pavimentos y sus componentes, las mezclas asfálticas y la estabilidad y flujo de Marshall.

Una vez teniendo el conocimiento adecuado y sabiendo los objetivos los cuales tenemos como meta para la realización de la investigación empezaremos caracterizando los agregados y el cemento asfáltico para luego evaluar su calidad con las normas y especificaciones técnicas correspondientes para que así podamos elaborar las briquetas Marshall para la determinación del cemento asfáltico óptimo con el cual se realizaran las briquetas para la investigación y proceder a envejecer las briquetas y una vez envejecidas obtener el flujo y estabilidad Marshall.

Una vez obtenidos los resultados se procederá a realizar una depuración de datos con el cual tendremos los resultados para realizar el análisis correspondiente ya así poder redactar las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la investigación realizada.

## **CAPÍTULO II**

### **EL PAVIMENTO Y LA OXIDACIÓN**

#### **2.1. Pavimento**

Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores, distribuyéndolas con uniformidad. Este conjunto de capas proporciona también la superficie de rodamiento, en donde se debe tener una operación rápida y cómoda.

De acuerdo con las teorías de esfuerzos y las medidas de campo que se realizan, los materiales con que se construyen los pavimentos deben tener la calidad suficiente para resistir. Por lo mismo, las capas localizadas a mayor profundidad pueden ser de menor calidad, en relación con el nivel de esfuerzos que recibirán, aunque el pavimento también transmite los esfuerzos a las capas inferiores y los distribuye de manera conveniente, con el fin de que éstas los resistan. (Bustamante Olivera, 2004)

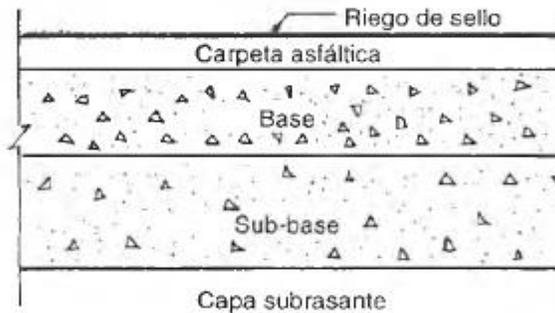
##### **2.1.1. Tipos de pavimentos**

Existen dos tipos principales de pavimento: los flexibles y los rígidos.

###### **2.1.1.1. Pavimentos flexibles**

Una carpeta asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales; y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. Las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y sub-base, las cuales se construyen sobre la capa subrasante. (Bustamante Olivera, 2004)

Figura 1. Capas que forman en general un pavimento flexible

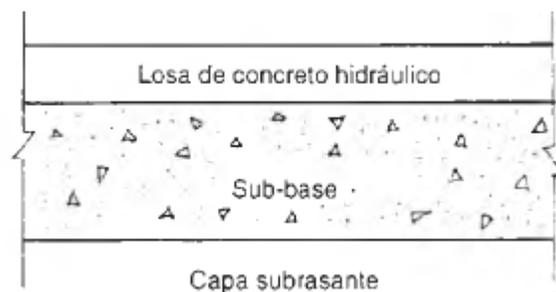


Fuente: Estructuración de vías terrestres, Fernando Olivera Bustamante.

### 2.1.1.2. Pavimentos rígidos

La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de concreto hidráulico, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Aunque en teoría las losas de concreto hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesario construir una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al pasar los vehículos, lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla en la losa. La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por la losa de concreto hidráulico y la sub-base, que se construyen sobre la capa subrasante. (Bustamante Olivera, 2004)

Figura 2. Capas que forman un pavimento rígido



Fuente: Estructuración de vías terrestres, Fernando Olivera Bustamante.

## **2.1.2. Componentes estructurales de un pavimento**

Un pavimento puede estar constituido por una o varias capas, construidas sucesivamente sobre la porción superior del terreno en corte o relleno, que ha sido nivelada, perfilada y compactada. Quedando lista para soportarlo. Esta porción superior de suelo tratado in-situ, se conoce en nuestro medio como sub-rasante. (Romero Vivar, 1995)

Un pavimento está pues constituido de abajo hacia arriba, por las siguientes capas:

- Capa de desgaste o superficie de rodadura.
- Base.
- Subbase.

### **2.1.2.1. Capa de desgaste o superficie de rodadura**

Es la capa más superficial, que estará en contacto con las solicitaciones y tiene como función principal el proporcionar una superficie suave al deslizamiento y resistente al desgaste. En el caso de los pavimentos rígidos, constituye además el principal elemento estructural. (Bustamante Olivera, 2004)

Figura 3. Capa de desgaste o superficie de rodadura



Fuente: Diseño y construcción de pavimentos, German Vivar Romero.

### **2.1.2.2. Base**

Es el principal elemento estructural en los pavimentos flexibles y que en los pavimentos rígidos puede reemplazar a la sub-base, pudiendo ser de agregados aglomerados con asfalto (como en el caso de las bases negras y estabilizadas), de agregados aglomerados con cemento portland (como en el caso de las bases estabilizadas con cemento, o las bases de concreto compactado con rodillo); o de suelos sin aglomerar como en el caso de las bases de grava. (Bustamante Olivera, 2004)

Figura 4. Capa base



Fuente. Diseño y construcción de pavimentos, German Vivar Romero.

### **2.1.2.3. Subbase**

Tiene una función primaria de protección (drenante y anticontaminante) de la base en un pavimento flexible o de las losas en un pavimento rígido; y una función secundaria resistente principalmente en el caso de los pavimentos flexibles, pudiendo ser granular o estabilizada. (Bustamante Olivera, 2004)

## **2.2. Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas, que también reciben usualmente la denominación de aglomerados, están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de este. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se

extienden y se compactan. Actualmente se emplean no solo en los pavimentos de carreteras y de calles, sino también en otro tipo de infraestructuras con tráfico: aeropuertos, superficies industriales, pistas deportivas. Se emplean también a menudo en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados e intensos. (Kraemer, y otros, 2004)

### 2.2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas

Según el parámetro que se considere para establecer las diferencias entre las distintas mezclas, las clasificaciones pueden ser diversas.

En primer lugar, por analogía con otros materiales, las mezclas bituminosas o asfálticas pueden clasificarse según las fracciones de árido empleadas:

Tabla 1. Clasificación de las mezclas bituminosas

	<b>Tipo de mezcla</b>
Fracciones de arido empleadas	Mastico
	Mortero
	Macadam
	Hormigon
Temperatura de puesta en obra	En frio
	En caliente
% de huecos en mezcla	Cerradas ( $h < 6$ )
	Semicerradas ( $6 < h < 12$ )
	Abiertas ( $h > 12$ )
	Porosas ( $h > 20$ )
Tamaño de arido	Gruesas ( $t_{max} > 8 \text{ mm}$ )
	Finas ( $t_{max} < 8 \text{ mm}$ )
Estructura del arido	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometria	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Ingeniería de carreteras Volumen III, Kraemer.

- Masilla bituminosa: polvo mineral más ligante.
- Mortero bituminoso: árido fino más masilla.
- Hormigón bituminoso: árido grueso más mortero.
- Macadam bituminoso: árido grueso más ligante.

La diversidad de los materiales requiere, sin embargo, unas clasificaciones más precisas siguiendo diferentes criterios de construcción o de composición. (Kraemer, y otros, 2004)

### **- Por la temperatura de puesta en obra**

Cabe distinguir las mezclas en frío y las mezclas en caliente. En las primeras, el ligante suele ser una emulsión bituminosa, por lo que, aunque en la fabricación pueda ser necesario en cierto calentamiento, la puesta en obra se realiza a la temperatura ambiente. Por su parte, las mezclas en caliente se fabrican con betunes asfálticos a unas temperaturas más o menos elevadas (en general por encima de los 150 °C) según la viscosidad del ligante, calentándose también los áridos para que el ligante no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se lleva a cabo también a unas temperaturas muy superiores a la ambiente, pues de caso contrario estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Tras la compactación, incluso en las mezclas más cerradas, la compacidad no suele ser absoluta. La existencia de una cierta proporción de huecos en la mezcla suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas. Salvo en el caso de algunos tipos especiales, las mezclas tienen más de un 3 por 100 de huecos; si dicha proporción no supera el 6 por 100, se habla de mezclas densas o cerradas, mientras que si supera el 12 por 100 se denomina abiertas. Hay, finalmente, mezclas en las que la proporción de huecos es superior al 20 por 100 (son las denominadas drenantes o porosas). (Kraemer, y otros, 2004)

### **- Por el tamaño máximo del árido**

Se pueden distinguir las mezclas gruesas y finas, también llamadas microaglomerados. Estas mezclas finas, por analogía con las mezclas con cemento, pueden denominarse también morteros bituminosos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino (incluyendo el polvo mineral) y un ligante. El tamaño máximo del árido determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla (del orden del doble al triple del tamaño máximo). (Kraemer, y otros, 2004)

### **- Por la estructura interna del árido**

Se diferencian las mezclas que tienen un esqueleto mineral resistente, en las que la componente de la resistencia debido al rozamiento interno de los áridos es notable, y

aquellas otras carecen de dicho esqueleto mineral (la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla). En el primer grupo se sitúan las mezclas abiertas y todas las que, genéricamente, se denominan hormigones bituminosos, aunque en estos últimos una parte de las resistencias se debe a la cohesión que proporciona la masilla. En el segundo grupo se incluyen los diferentes tipos de masillas bituminosas y los llamados asfaltos fundidos, en los que el eventual árido grueso es un simple relleno en una masa que prácticamente carece de huecos. (Kraemer, y otros, 2004)

### **- Por la granulometría de los áridos**

Se pueden clasificar las mezclas en continuas y discontinuas; incluso hay mezclas de granulometría uniforme, como el denominado macadam bituminoso, que se emplean fundamentalmente en tareas de conservación de carreteras secundarias y cuya importancia técnica es relativamente marginal. En cambio, los otros dos tipos citados constituyen dos grandes familias de mezclas. (Kraemer, y otros, 2004)

#### **2.2.2. Mezcla asfáltica en caliente**

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. (Asphalt institute, 1982)

##### **2.2.2.1. Características y comportamiento de la mezcla asfáltica**

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

###### **2.2.2.1.1 Densidad**

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

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cubico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) o libras por pie cubico ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ ). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio. (Asphalt institute, 1982)

#### **2.2.2.1.2. Vacíos de aire**

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

La durabilidad de un pavimento asfaltico es función del contenido de vacíos. La razón de estos es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla.

Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en realidad) de vacíos; preferible menos del 8 por ciento. (Asphalt institute, 1982)

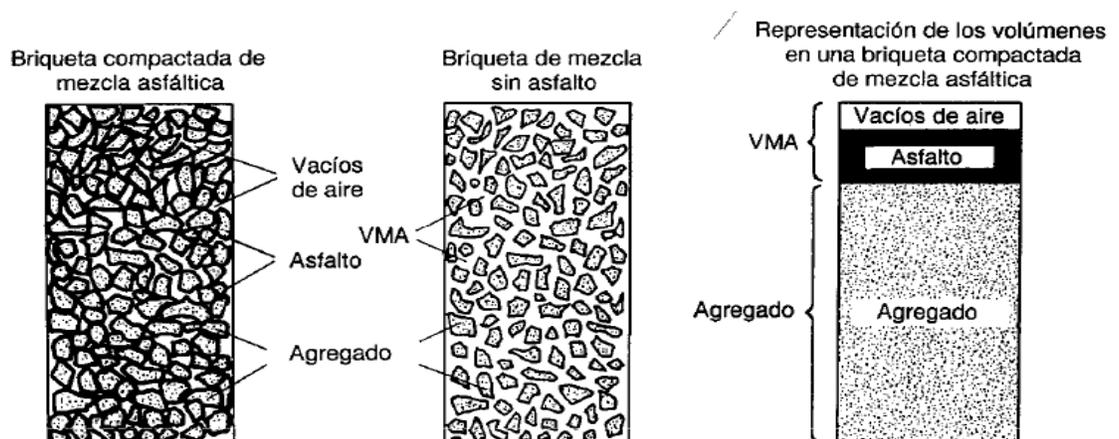
### 2.2.2.1.3. Vacíos en el agregado mineral

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

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (i.e. todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuánto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento de la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar en el contenido de asfalto. (Asphalt institute, 1982)

Figura 5. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

#### **2.2.2.1.4. Contenido de asfalto**

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

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

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No.200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultado en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral contiene poco, o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

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

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre 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 la mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas. (Asphalt institute, 1982)

#### **2.2.2.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas**

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. (Asphalt institute, 1982)

##### **2.2.2.2.1. Estabilidad**

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

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con

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

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

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico).

La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 2. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos, y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

#### **2.2.2.2. Durabilidad**

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

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

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

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

Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento.

La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos minerales como la cal hidratada.

La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 3. Causas y efectos de una poca durabilidad

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

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

### 2.2.2.2.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la permeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 4. Causas y efectos de la permeabilidad

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causaran, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

#### **2.2.2.2.4. Trabajabilidad**

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

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

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

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falla de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 5. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Tamaño máximo de partícula ; grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

#### **2.2.2.2.5. Flexibilidad**

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

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. (Asphalt institute, 1982)

#### **2.2.2.2.6. Resistencia a la fatiga**

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos

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

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 6. Casusas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

#### **2.2.2.2.7. Resistencia al deslizamiento**

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplano). Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una

mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgada) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 7. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropilado
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

### **2.2.3. Diseño de mezclas asfálticas**

#### **2.2.3.1. Contenido mínimo de cemento asfáltico**

##### **- Procedimiento del área superficial**

Este procedimiento es aplicable a materiales graduados que contienen cierta cantidad de finos. Primeramente, conociendo la composición granulométrica del material pétreo, se calcula el contenido de cemento asfáltico empleando el método que a continuación se indica. Este método está basado en la estimación de la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material. Para hacer dicha estimación, se hace uso de las siguientes constantes de área en metros cuadrados por kilo de material pétreo.

Material pasa malla 1-1/2"	y se retiene en 3/4"	0.27	m <sup>2</sup> /kg	mat.
Material pasa malla 3/4"	y se retiene en N° 4	0.40	m <sup>2</sup> /kg	mat.
Material pasa malla N° 4	y se retiene en N° 40	2.05	m <sup>2</sup> /kg	mat.
Material pasa malla N° 40	y se retiene en N° 200	15.38	m <sup>2</sup> /kg	mat.
Material pasa malla N° 200		53.30	m <sup>2</sup> /kg	mat.

Cada una de estas constantes se multiplica por los porcentajes de partículas entre las mallas correspondientes, dando por resultado que se obtengan determinadas superficies

por kilogramo de material. Se suman todas las superficies calculadas y el resultado se multiplica por el índice asfáltico, que varía de 0.0055 a 0.01385, de acuerdo con la rugosidad y la porosidad de los agregados.

Tabla 8. Índice asfáltico método área superficial

<b>Material pétreo</b>	<b>Índice asfáltico</b>
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0.0055
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0.0070
Gravas trituradas de alta absorción	0.0080

Fuente: Vías de comunicación, Ing. Carlos Crespo Villalaz.

Se considera una absorción como baja a la que es menos de 2%, absorción mediana a la comprendida entre 2% y 4%, absorción alta a la mayor de 4%. El porcentaje de cemento asfáltico calculado debe emplearse únicamente como guía para la determinación práctica por medio de la prueba de compresión axial no confinada. (Villalaz Crespo, 2004)

$$p = (0.41 nG + 2.05 ng + 15.38 nA + 53.30 nF)$$

Donde:

P= Porcentaje mínimo de cemento asfáltico

n= Índice asfáltico según absorción del material

G= Porcentaje de material entre la malla ¾" y la N° 4

g= Porcentaje de material entre la malla N° 4 y la N° 40

A= Porcentaje de material entre la malla N° 40 y la N° 200

F= Porcentaje de material que pasa a la N° 200

#### **- Procedimiento basado en la distribución de tamaño de las partículas**

En esta determinación se hace uso de la fórmula siguiente:

$$p = 0.020 a + 0.045 b + cd$$

Donde:

p= Porcentaje de C.A. expresado con respecto al peso del material.

a= Porcentaje de material retenido en la malla N° 10.

b= Porcentaje de material que pasa la malla N° 10 y se retiene en la N° 200.

c= Porcentaje que pasa la malla N° 200.

d= Coeficiente asfáltico que varía con las características del material

Tabla 9. Índice asfáltico método de distribución granulométrica

<b>Material</b>	<b>Coeficiente asfáltico</b>
Gravas y arenas de río o materiales redondeados de baja absorción.	0.15
Gravas trituradas de baja absorción.	0.20
Rocas trituradas de absorción media.	0.30
Rocas trituradas de alta absorción.	0.35

Fuente: Vías de comunicación, Ing. Carlos Crespo Villalaz.

### **2.2.3.2. Contenido óptimo de cemento asfáltico**

#### **2.2.3.2.1. Metodología Marshall**

##### **Fundamento teórico**

El contenido óptimo de asfalto para un material de carpeta es la cantidad de asfalto que forma una membrana alrededor de las partículas, de espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo evitando que el asfalto se oxide con rapidez. Por otro lado, no debe ser tan gruesa como para que la mezcla pierda estabilidad, es decir, deformación excesiva por flujo plástico o resistencia y no soporte las cargas de los vehículos. (Gonzales Minaya & Huaman Ordoñez, 2001)

##### **Objetivo**

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados; así como también proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente, de tal manera que sea posible establecer si cumple en lo referente al establecimiento de densidades y contenidos óptimos de vacío durante la construcción de la capa del pavimento.

El método consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas de espesor y 4 pulgadas de diámetro. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar.

Las probetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall, determinado su estabilidad (resistencia) y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura. (Gonzales Minaya & Huaman Ordoñez, 2001)

## **Metodología**

### **- Caracterización de los agregados**

Comprende la ejecución de los ensayos de laboratorio para analizar la calidad de los agregados. Los ensayos básicos son:

1. Análisis granulométrico.
2. Desgaste en la máquina de los ángeles.
3. Solidez.
4. Equivalente de arena.
5. Materia orgánica.
6. Índice de plasticidad.
7. Forma de las partículas (Índice de aplanamiento y de alargamiento).
8. Porcentaje de partículas fracturadas.
9. Agregado fino.

### **- Caracterización del cemento asfáltico**

Comprende la ejecución de los ensayos de laboratorio para analizar la calidad del cemento asfáltico. Los ensayos básicos son:

1. Peso específico.
2. Penetración.
3. Punto de inflamación.
4. Solubilidad.

5. Ductilidad.
6. Punto de ablandamiento.
7. Viscosidad Saybolt Furol.
8. Viscosidad absoluta.
9. Equivalente heptano-xileno.

#### **- Fabricación de briquetas**

Se calientan el agregado (aproximadamente 1200 gramos de agregado por briqueta) y el cemento asfáltico.

Se mezclan los agregados calientes con el asfalto en el porcentaje definido, variando el contenido del ligante (de 0.5 en 0.5%) para cada grupo de tres briquetas.

Cuando la mezcla baja su temperatura, se compacta la briqueta con golpes de un martillo. El número de golpes depende del tránsito que presente el proyecto (75 golpes para tránsito pesado, 50 para tránsito mediano y 35 para tránsito liviano).

Las dimensiones de la briqueta compactada debe ser: 4” de diámetro y 2.5” de altura. En caso de no cumplirse la altura o volumen se hace la corrección pertinente. (Bastidas Benavides, 2006)

#### **2.2.3.1.2. Densidades específicas bulk y máxima teórica**

La densidad bulk es la relación entre el peso y el volumen total de la briqueta.

La densidad máxima teórica es la relación entre el peso y el volumen neto de la briqueta.

Para el cálculo de volumen total de la briqueta existen tres (3) métodos:

1. Si la briqueta presenta homogeneidad en sus dimensiones y textura lisa, con la medición de la altura y el diámetro se determina el volumen total.
2. Si la briqueta presenta textura lisa e impermeable, se puede calcular el volumen determinando el peso en el aire y el peso en el agua.

3. Si las briquetas son heterogéneas en dimensiones y textura, es necesario parafinarlas después de determinar su peso en el aire. Las briquetas parafinadas son pesadas en el aire y en el agua, y por el método de Inmersión conocemos el volumen total.

La densidad máxima teórica se puede calcular mediante el método de rice. Consiste en utilizar 300 a 600 gramos de mezcla y someterla a inmersión en agua dentro un picnómetro y extraer los vacíos por medio de una bomba, hasta poder evaluar el volumen neto de asfalto efectivo y agregados. Otra forma es calcular los pesos y volúmenes parciales de cada elemento constitutivo de la mezcla. (Bastidas Benavides, 2006)

#### **2.2.3.1.3. La estabilidad y el flujo**

La estabilidad es la máxima fuerza que resiste la briqueta (a 60°C) antes de fallar. La estabilidad de las briquetas debe corregirse según el volumen o altura.

El flujo representa la deformación de la probeta, por lo que valores altos indican que el pavimento es demasiado plástico y tendrá mucha facilidad a deformarse bajo las cargas vehiculares. (Bastidas Benavides, 2006)

#### **2.2.3.1.4. Análisis de densidad**

Se debe tener en cuenta:

- La densidad bulk promedio.
- El peso específico promedio del agregado.
- El peso específico máximo teórico de la muestra.
- La densidad máxima medida de la mezcla asfáltica suelta.

#### **2.2.3.1.5. Composición volumétrica de la mezcla**

Se debe analizar:

- El porcentaje de asfalto, en peso, absorbido por los agregados.
- El porcentaje, en volumen, de los agregados, con respecto al volumen total de la briqueta.
- El porcentaje, en volumen, de vacíos con aire, con respecto al volumen total de la briqueta.

- El porcentaje de volumen de asfalto efectivo, con respecto al volumen total de la briqueta.
- El porcentaje de vacíos en los agregados minerales, en la mezcla compactada.
- El porcentaje, en volumen, de los vacíos llenos de asfalto.
- El porcentaje de asfalto efectivo, con respecto al peso de la mezcla.

### 2.2.3.1.6. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico

Se recomienda el siguiente procedimiento.

Graficar en función de los diferentes porcentajes de asfalto utilizados en el diseño, la variación de los siguientes parámetros:

Densidad bulk	vs	% de Cemento asfáltico
Estabilidad	vs	% de Cemento asfáltico
Flujo	vs	% de Cemento asfáltico
Vacíos en la mezcla (% Vv)	vs	% de Cemento asfáltico
Vacíos en los agregados (% VAM)	vs	% de Cemento asfáltico
Vacíos llenos de asfalto (% Vfa)	vs	% de Cemento asfáltico

Tabla 10. Criterios del instituto del asfalto (U.S.A) para el Diseño Marshall

Mezcla del método Marshall	Transito liviano		Transito mediano		Tránsito pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada cara de la briqueta	35		50		75	
Estabilidad (N) (Lb)	3336	-	5338	-	8006	-
	750	-	1200	-	1800	-
Flujo (0.01 pulgada)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos (%)	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado (%)	Ver tabla 11					
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%)	70	80	65	78	65	75

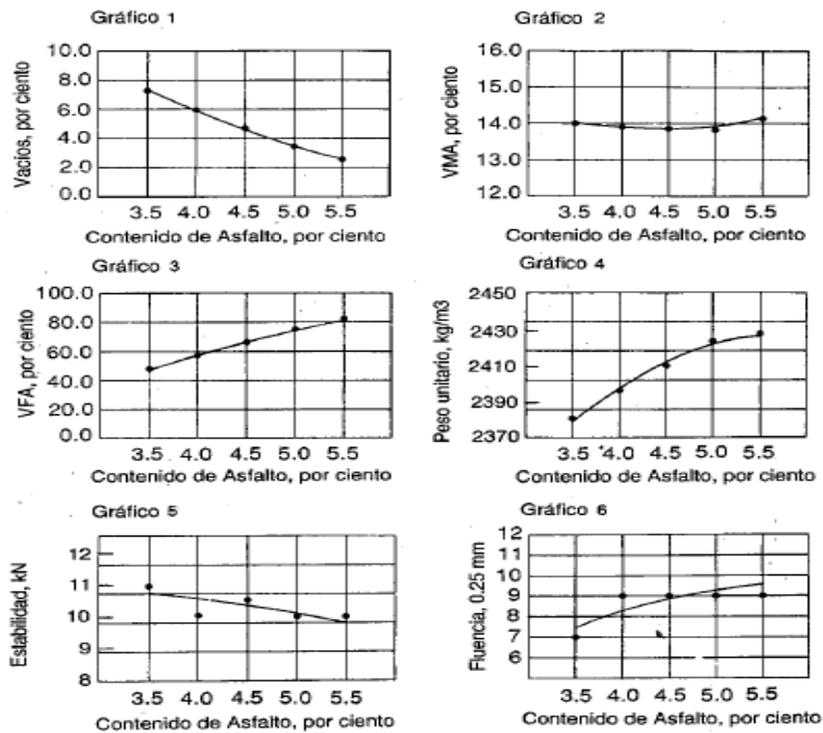
Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

Tabla 11. Porcentaje mínimo en el agregado mineral (VMA)

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo por ciento		
		Vacíos de diseño por ciento		
mm	in	3	4	5
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
9.50	3/8	14.0	15.0	16.0
12.50	1/2	13.0	14.0	15.0
19.00	3/4	12.0	13.0	14.0
25.00	1	11.0	12.0	13.0
37.50	1 1/2	10.0	11.0	12.0
50.00	2	9.5	10.5	11.5
63.00	2 1/2	9.0	10.0	11.0

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

Figura 6. Ejemplo de gráficas para los resultados Marshall



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

### **2.3. El asfalto**

Los asfaltos son aquellas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidos, semisólidos o sólidos, compuestos esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción, cuyas cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas los hacen óptimos para un gran número de aplicaciones.

Muchos de los asfaltos usados en trabajos de pavimentación provienen de la destilación del petróleo. La gran versatilidad de los materiales bituminosos hace que estos sean los más utilizados para la construcción y mantenimiento de estructuras de pavimento flexibles. (Liscano Reyes, 2003)

#### **2.3.1. Composición química**

La configuración de la estructura interna de un asfalto es determinada por la constitución química de sus moléculas.

Un asfalto es una mezcla química compleja de moléculas que son predominantemente hidrocarburos con pequeñas cantidades de componentes policíclicos de estructura análogas y grupos funcionales con contenido de azufre, nitrógeno y átomos de oxígeno.

El asfalto también contiene pequeñas cantidades de metales como vanadio, níquel, hierro, magnesio y calcio los cuales se encuentran en la forma de sales inorgánicas y óxidos o en estructuras de porfirina. Un análisis elemental de asfaltos fabricados de una variedad de crudos de petróleos crudos muestra que la mayoría de asfaltos contienen. (Acurio Menendez, 2009)

- Carbón 82-88%.
- Hidrógeno 8-11%.
- Azufre 0-6%.
- Oxígeno.
- Nitrógeno.

### **- Asfáltenos**

Son sólidos de color negro o marrón, solubles en n-heptano, y que además contienen carbón, hidrogeno, algo de nitrógeno, azufre y oxígeno. Los asfáltenos son generalmente considerados materiales aromáticos complejos de alta polaridad y con gran peso molecular.

El contenido de asfalteno tiene un gran efecto en las características reológicas de un asfalto. Aumentando el contenido de asfalteno se produce un asfalto más duro y viscoso con una baja penetración, mayor punto de reblandecimiento y consecuentemente mayor viscosidad. Los asfáltenos constituyen entre un 5 y 25% del asfalto. (Acurio Menendez, 2009)

### **- Máltenos**

#### **Resinas**

Son solubles en n-heptano. Al igual que los asfáltenos tienen una elevada proporción de hidrogeno y carbón y contiene pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son sólidos o semisólidos de color marrón oscuro, su naturaleza es polar y son altamente adhesivos. Las resinas son agentes dispersivos o peptizantes para los asfáltenos. (Acurio Menendez, 2009)

#### **Aromáticos**

Comprenden los compuestos nafteno-aromáticos de menor peso molecular en el asfalto y representa la mayor proporción de medio de dispersión de los asfáltenos peptizados. Constituyen entre el 40 y 65% del total del asfalto y son líquidos viscosos de color marrón oscuro. (Acurio Menendez, 2009)

#### **Saturados**

Consisten en hidrocarburos alifáticos de cadenas lineales abiertas y ramificadas. Son aceites viscosos no polares los cuales son de color amarillo claro o blanco. (Acurio Menendez, 2009)

### **2.3.2. Características reológicas del asfalto**

La reología es una de las propiedades más importantes de los productos asfálticos. Se refiere a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo de aplicación de una carga e incluye una propiedad muy importante: la viscosidad

La viscosidad del asfalto varía con la temperatura en mayor y menor grado (susceptibilidad térmica) y su estudio es muy importante y de interés práctico, porque en todas las aplicaciones del asfalto se debe modificar su viscosidad mediante el calentamiento.

A temperaturas altas el asfalto se considera un fluido viscoso, mientras que a temperaturas bajas de servicio se considera un material sólido con propiedades elásticas. (Liscano Reyes, 2003)

### **2.3.3. Tipos de asfalto**

Los principales tipos de ligantes bituminosos que se emplean actualmente para la elaboración de las mezclas asfálticas son los asfaltos naturales, los cementos asfálticos o asfaltos de penetración, los asfaltos líquidos o asfaltos rebajados, las emulsiones asfálticas y los crudos de petróleo. (Liscano Reyes, 2003)

#### **- Asfaltos naturales**

Procesos análogos que ocurren en la naturaleza han formado depósitos naturales de asfalto, algunos prácticamente libres de materias extrañas y otros mezclados con cantidades variables de ciertos minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en los que el asfalto se encuentra dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o rocas asfálticas. Estos asfaltos naturales se manifiestan en diversas formas, entre las que se destacan los manantiales, los lagos y las exudaciones. (Liscano Reyes, 2003)

#### **- Asfalto derivado del petróleo**

Casi todo el asfalto que se produce y utiliza hoy en día en el mundo procede de la refinación del petróleo. El asfalto derivado del petróleo se llama a veces asfalto residual (residuo de la destilación del petróleo), para distinguirlo de los asfaltos naturales. Las

implicaciones poco deseables que normalmente se atribuyen a la palabra residual han conducido a la industria del asfalto a preferir el empleo de la expresión “de destilación directa”, que sin embargo es inexacta, ya que pocas veces se producen asfaltos del petróleo por destilación simple, sin ningún tratamiento posterior. (Liscano Reyes, 2003).

Tabla 12. Especificación de asfaltos puros

Característica	Unidades	Norma de ensayo	60-70		80-100	
			Min	Max	Min	Max
Penetración	0.1 mm	INV E-706	60	70	80	100
Viscosidad dinámica a 60°C	P	INV E-716	1500		1000	
Índice de penetración	-	INV E-724	-1	1	-1	1
Perdida por calentamiento en película delgada	%	INV E-721	-	1	-	1
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	INV E-702	100	-	100	-
Penetración del residuo de película delgada	%	INV E-721	52	-	48	-
Solubilidad en triclorometileno	%	INV E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	INV E-704	-	0.2	-	0.2

Fuente: Diseño racional de pavimentos, Freddy Alberto Reyes Lizcano.

#### - Cementos asfálticos sólidos

Son asfaltos refinados o una combinación de un asfalto refinado y un aceite fluidificante (gasoleno), de una viscosidad apropiada para los trabajos de pavimentación. Se designan generalmente mediante las letras AC.

Son ideales para pavimentación, pues además de sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, poseen características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayor parte de ácidos, sales y alcoholes. (Liscano Reyes, 2003)

Tabla 13. Tipo de cemento asfáltico por emplear según el tráfico

Trafico de diseño	Penetración del cemento asfáltico
Tráfico alto (T4 y T5)	60-70
Tráfico medio (T3)	60-70 u 80-100
Tráfico bajo (T2 y T1)	60-70 u 80-100

Fuente: Diseño racional de pavimentos, Freddy Alberto Reyes Lizcano.

### **- Asfaltos líquidos**

También denominados asfaltos rebajados o cut backs, se definen según el instituto del asfalto como “material asfáltico cuya consistencia blanda o fluida hace que salga del campo en que se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300”.

Están compuestos por una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil que puede ser bencina, queroseno o aceite. (Liscano Reyes, 2003)

### **- Emulsiones asfálticas**

Es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como el asfalto (60-70%) y el agua, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente activador de superficie (0.2-1%), tensoactivo o emulsificante, básico o ácido, el cual mantiene en dispersión el sistema; la fase continua es el agua y la discontinua son los glóbulos de asfalto, cuyo tamaño oscila entre uno y diez micrones. Cuando la emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio eléctrico que la rompe, llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie de agregado; el agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto. Existen emulsificantes que permiten que esta rotura sea instantánea y otros que retardan este fenómeno. (Liscano Reyes, 2003)

### **2.3.4. Ensayos estándar para asfaltos**

Para evaluar la calidad de cualquiera de los tipos de asfalto ya mencionados y para realizar su clasificación se han ideado una serie de ensayos de laboratorio que han llegado a formar parte de la práctica rutinaria. (Fonseca Montejó , 2002)

### **- Ensayo de penetración**

Se lleva a cabo sobre los cementos asfálticos y sobre los residuos de la destilación de asfaltos líquidos o emulsiones asfálticas, y es una medida de la consistencia de los mismos. Sobre una pasta de asfalto previamente moldeada y calentada hasta una temperatura uniforme de 25°C, se coloca una aguja de acero de diámetro y dimensiones normalizados, que soporta un peso de 100 gramos y se deja libre durante 5 segundos. La distancia que la aguja logre penetrar dentro de la pasta asfáltica en estas condiciones, medida en décimas

de milímetros, se denomina penetración del asfalto. Mientras mayor sea la penetración, más blanda es la consistencia del cemento asfáltico. (Fonseca Montejo , 2002)

#### **- Ensayo de viscosidad**

El ensayo tiene por objeto, determinar el estado de fluidez del asfalto, en el rango de temperaturas que se usan durante su aplicación. Se mide, ya sea por la viscosidad cinemática o mediante la viscosidad Saybolt Furol. La viscosidad de un cemento asfáltico a las temperaturas usadas en el mezclado (normalmente 135°C) se mide con viscosímetros capilares de flujo inverso a viscosímetros Saybolt; la viscosidad absoluta del cemento asfáltico, a las temperaturas altas en servicio (normalmente 60°C), generalmente se mide con viscosímetros capilares de vidrio al vacío. (Fonseca Montejo , 2002)

#### **- Ensayo de punto de ablandamiento**

Los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo cual no puede hablarse de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se ha definido por conveniencia, un punto de ablandamiento convencional, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez. La prueba más común para determinar el punto de ablandamiento de un cemento asfáltico es la denominada de anillo y bola.

El punto de ablandamiento de anillo y bola se determina colocando en un recipiente con agua, a una determinada altura sobre el fondo, un anillo de latón de dimensiones establecidas, el cual se rellena previamente con el asfalto fundido y se deja enfriar a la temperatura ambiente durante cuatro horas. Transcurrido ese tiempo, se coloca una esfera de 9.51 mm de diámetro, y se calienta el baño de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Debido al calor, el asfalto se ablanda y la esfera desciende gradualmente envuelta en una bolsa de asfalto hasta tocar el fondo del baño. La temperatura del baño en ese instante es lo que se denomina el "punto de ablandamiento de anillo y bola" del cemento asfáltico ensayado. (Fonseca Montejo , 2002)

#### **- Ensayo de ductilidad**

Una propiedad que tienen los asfaltos es su gran capacidad de mantenerse coherentes bajo las grandes deformaciones inducidas por el tránsito. La ductilidad se mide en un equipo denominado ductilímetro. En el ensayo se mide la resistencia a la ruptura por medio del

alargamiento de una probeta de cemento asfáltico, estirada en sus extremos a velocidad constante. Normalmente el ensayo se realiza a una temperatura de 25°C y una velocidad de alargamiento de 5 cm/mino.

Los asfaltos que poseen alta ductilidad normalmente son más adhesivos que aquellos que tienen en menor grado esta característica, pero pueden variar su consistencia rápidamente al cambiar la temperatura (más susceptibles a la temperatura). (Fonseca Montejo , 2002)

#### **- Punto de inflamación**

El punto de inflamación corresponde a la temperatura a la que el asfalto puede ser calentado con seguridad, sin peligro a que se inflame en presencia de una llama. Esta temperatura es más baja que la necesaria para que el material entre en combustión; por lo tanto este análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas asfálticas en caliente.

El asfalto que se ha de ensayar se coloca en un recipiente especial y se calienta de manera que la temperatura aumente uniformemente. A intervalos frecuentes, se pasa por la superficie una llama pequeña y se registra la temperatura a la que surja una llamarada en cualquier punto de la misma, denominada punto de llama. Este ensayo da una indicación de la volatilidad de los materiales asfálticos y sirve para establecer temperaturas de calentamiento sin peligro de incendio. En su ejecución, se puede emplear dos aparatos que satisfacen los mismos fines y que se conocen como vaso abierto de Cleveland y copa abierta de Tag. (Fonseca Montejo , 2002)

#### **- Ensayo de gravedad específica**

Se entiende por gravedad específica de un material la relación de su peso a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. La gravedad específica de los asfaltos sólidos se determina por inmersión directa en agua y la de los semisólidos, líquidos y emulsificados se encuentra por medio del picnómetro. Además de dar indicaciones sobre la calidad y el origen del material la gravedad específica sirve para determinar las equivalencias de pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación y para algunos cálculos importantes en el diseño de mezclas bituminosas. (Fonseca Montejo , 2002)

### **- Ensayo de contenido de agua**

Salvo las emulsiones asfálticas, los materiales bituminosos deben ser libres de agua porque ésta ocasiona humaradas al calentar el material provocando a veces situaciones de peligro. Para determinar si un material asfáltico contiene agua y en qué cantidad en caso afirmativo, se mezcla un volumen determinado del material que se va a ensayar, con xylol o con gasolina de alto punto de ebullición y se calienta en un alambique que termine en una pipeta graduada. Si hay agua, ésta se acumula en la pipeta, donde puede medirse. (Fonseca Montejo , 2002)

### **- Ensayo de asentamiento**

Este ensayo detecta la tendencia de los glóbulos de asfalto de una emulsión asfáltica asentarse durante el período en que la emulsión permanece almacenada y es una alerta sobre la posible inestabilidad de las emulsiones. En una probeta graduada se colocan unos 500 milímetros de emulsión y se dejan en reposo durante 5 días, al cabo de los cuales se toma muestra del fondo, el medio y la superficie. Cada muestra se coloca en un recipiente y se calienta hasta que solo quede el residuo sólido. Los pesos relativos de los residuos sirven de medida al asentamiento de la emulsión. (Fonseca Montejo , 2002)

## **2.4. Agregados**

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante. (Asphalt institute, 1982)

### **2.4.1. Clasificación de los agregados**

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales. (Asphalt institute, 1982)

#### **- 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, el movimiento del hielo, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4 pulgada). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35 mm (1/4 pulgada) pero mayor que 0.075 mm (N° 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (N° 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y 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.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra dentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla. (Asphalt institute, 1982)

### **- 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 fragmentados de lecho de roca y piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca triturada es procesada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste 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). (Asphalt institute, 1982)

### **- Agregados sintéticos**

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

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie de 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 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 al máximo resistencia al deslizamiento. (Asphalt institute, 1982)

#### **2.4.2. Propiedades de los agregados y su evaluación**

En un pavimento densamente 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. Aun mas, 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. (Asphalt institute, 1982)

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.

#### **- Graduación y tamaño máximo de partícula**

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. (Asphalt institute, 1982)

#### **Tamaño máximo de partícula**

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

- Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas del agregado. (Asphalt institute, 1982)

## **Granulometría del agregado**

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

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

Los concretos asfálticos son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen.

Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

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

El relleno mineral y el polvo mineral están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable, y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o menos, de relleno o polvo mineral, puede causar que la mezcla aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto). Dichos cambios en la mezcla pueden ocurrir con pequeños cambios

en la cantidad o en el tipo de relleno o polvo mineral utilizado. Por consiguiente, el tipo y la cantidad de relleno y polvo mineral usados en cualquier mezcla asfáltica de pavimentación deberán ser cuidadosamente controlados.

Las especificaciones técnicas granulométricas de agregado para una obra dada pueden ser presentadas gráficamente. La figura 7 muestra un gráfico 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 esta entre líneas solidas delgadas.

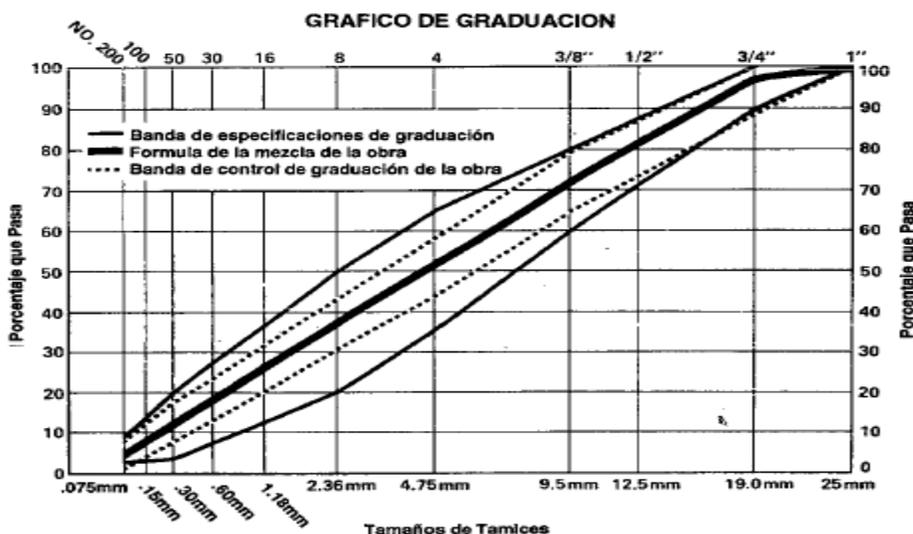
La fórmula de la mezcla de pavimentación está representada por la línea solida gruesa. La banda de control de granulometría para la obra – establecida como referencia para controlar la granulometría en la obra – está situada dentro de la región encerrada por las líneas punteadas. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 14. Composición típica del concreto asfaltico (ASTM D3515)

Tamaño de tamiz	Designación de la mezcla según el tamaño máximo nominal				
	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
Porcentaje del total que pasa en peso					
50 mm (2 “)	100	-	-	-	-
37.5 mm (1 1/2”)	90 a 100	100	-	-	-
25 mm (1”)	-	90 a 100	100	-	-
19 mm (3/4”)	56 a 80	-	90 a 100	100	-
12.5 mm (1/2”)	-	56 a 80	-	90 a 100	100
9.5 mm (3/8”)	-	-	56 a 80	-	90 a 100
4.75 mm (N° 4)	23 a 53	29 a 59	35 a 65	44 a 74	55 a 85
2.36 mm (N° 8)	15 a 41	19 a 45	23 a 49	28 a 58	32 a 67
1.18 mm (N° 16)	-	-	-	-	-
0.60 mm (N° 30)	-	-	-	-	-
0.30 mm (N° 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	7 a 23
0.15 mm (N° 100)	-	-	-	-	-
0.075 mm (N° 200)	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	2 a 10
Porcentaje de cemento asfaltico en peso total de la mezcla	3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 12

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

Figura 7. Gráfica típica de graduación granulométrica



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

### - 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, etc.) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente al comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No.200). El ensayo equivalente de arena 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). (Asphalt institute, 1982)

### - Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados

usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las capas del tránsito.

El ensayo de desgaste de los ángeles mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión. (Asphalt institute, 1982)

### **- Forma de la partícula**

La forma de la partícula afecta a 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 al 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 cubica, producidas, casi siempre, por trituración.

Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas 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. (Asphalt institute, 1982)

### **- Textura superficial**

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel 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. (Asphalt institute, 1982)

#### **- Capacidad de absorción**

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

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

Los agregados altamente porosos y absorbentes son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. (Asphalt institute, 1982)

#### **- Afinidad por 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) por que 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.

No es muy claro el por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente. En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son separadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento. (Asphalt institute, 1982)

## **2.5. La oxidación y el envejecimiento**

### **2.5.1. La oxidación**

La oxidación es el fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los constituyentes más reactivos del asfalto manifestándose principalmente como endurecimiento, pérdida de la consistencia visco elástica, fisuración y agrietamiento del asfalto. Adicionalmente, se debe decir que el envejecimiento por oxidación es particular en cada asfalto.

Debido a que el asfalto está compuesto por moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente produciéndose la oxidación, y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se vuelve más dura y frágil, y da origen al término endurecimiento por oxidación, o endurecimiento por envejecimiento.

Desde el punto de vista químico de oxidación del asfalto, el oxígeno afecta directamente al grupo de asfaltenos. A través de varias investigaciones se ha determinado que los factores con mayor influencia en cuanto a oxidación son la presión de oxígeno y la temperatura. (Muñoz Ardila & Vera Granados, 2012)

#### **2.5.1.1. La oxidación del asfalto por etapas**

La oxidación en mezclas asfálticas ocurre en diferentes magnitudes y velocidades dependiendo de las diferentes etapas a las que son sometidas las mezclas: producción, construcción y mantenimiento durante su vida útil. A continuación se describen cada una

de estas etapas resaltando los aspectos que se relacionan directamente con el fenómeno de oxidación. (Rincon Ballen, 2013)

#### **2.5.1.1.1. Etapa de producción de mezclas asfálticas**

Durante la etapa de producción el momento en el que se realiza la manipulación del asfalto en estado líquido y se produce oxidación se denomina “coquización”, lo cual puede ser un aspecto grave o de fácil solución.

El fenómeno de coquización se genera cuando dentro de los tanques en los cuales se calienta el asfalto se permite que el nivel descienda y quede por debajo de la superficie calentadora de los elementos térmicos del tanque denominados serpentines. Estos serpentines se encuentran recubiertos por asfalto, el cual, al quedar en contacto directo con el aire se oxida y lo hace de forma rápida debido a la temperatura a la que se encuentra el asfalto. Los serpentines mantienen una temperatura más elevada comparada con la del asfalto líquido que se encuentra dentro del tanque y así se forma una masa endurecida llamada coque.

Por otro lado, en la etapa de mezclado específicamente en una planta dosificadora, el asfalto es rociado en el mezclador recubriendo con una película delgada de aproximadamente 10 micrones de espesor las partículas calientes de agregado que se encuentran en el interior del mismo.

Durante este proceso de mezclado se introduce la mayor cantidad de oxígeno en los vacíos de la mezcla. La única forma en que se elimina este oxígeno es hasta el momento en que este elemento se agota completamente debido a la reacción química que se desencadena al entrar en contacto con el asfalto. (Rincon Ballen, 2013)

#### **2.5.1.1.2. Etapa de construcción**

Típicamente al realizar la colocación del pavimento asfáltico se compacta con una densidad superior que garantice una densidad relacionada con un porcentaje de vacíos entre el 3 y 7%. El objeto de la compactación es reducir los vacíos presentes en la mezcla para obtener la densidad requerida por el diseño, así como disminuir la oxidación del asfalto y evitar que la mezcla se deteriore en grandes proporciones. A pesar de que se realice la compactación adecuada cuando se coloca la mezcla, a través del tiempo éste se

va deteriorando reaccionando con el oxígeno y acumulando daños de diversa naturaleza. Puesto que la oxidación existe desde que se produce la mezcla, la misma estará asociada a los niveles de fatiga que se van generando.

También ocurre el fenómeno de oxidación cuando los operadores encargados del control de las mezclas permiten que transcurra demasiado tiempo en el cual la mezcla permanece al interior de una tolva y ésta alcanza niveles de oxidación considerables. La dificultad en este caso es que en estos casos es usual suponer al descargar la mezcla ésta puede fluir si se le ayuda abriendo agujeros con algún elemento como un tubo. La dificultad se enfoca en el hecho de que esta mezcla superficial que se descarga se encuentra coquizada y posee 15 años de edad y un grado de penetración cercano a 10. Es decir, en estas condiciones se genera otra mezcla en la misma tolva con grado de penetración de 30 a 40, la cual fluye con mayor facilidad, pero al ser empleada para la construcción de una vía definitiva, ésta última tendrá una vida útil demasiado corta debido a que tendrá un comportamiento frágil. (Rincon Ballen, 2013)

#### **2.5.1.1.3. Etapa de servicio**

El envejecimiento oxidativo durante la etapa de servicio es provocado por variables de la mezcla asfáltica tales como las proporciones volumétricas, la permeabilidad y las características de los agregados.

El fenómeno de oxidación altera las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como el aumento de la rigidez y disminución de la tenacidad conduciendo a un aumento de la fragilidad y mayor potencial para la formación de grietas durante su período de servicio.

De acuerdo con algunos estudios, las carpetas asfálticas, en un rango de tiempo entre diez y quince años, reducen su grado de penetración en un 20 a 25% del inicial (referencia que soporta esa afirmación). Cuando el pavimento llega a ese estado se torna muy frágil y requiere obras de rehabilitación. A lo largo de su etapa de servicio, el proceso de oxidación debe ser más lento puesto que el ideal es encontrar la opción que permita que sea protegido al contacto directo con el aire.

Desde el punto de vista de los diseñadores encuestados acerca del tema de la oxidación, se concluye que no existe una normativa clara que regule este fenómeno. Bajo sus conocimientos técnicos la mayoría de ellos señala que la metodología MPDEG incluye variables que permiten determinar el deterioro que sufrirá el pavimento asfáltico ante condiciones climáticas y por oxidación. (Rincon Ballen, 2013)

### **2.5.2. El envejecimiento del asfalto**

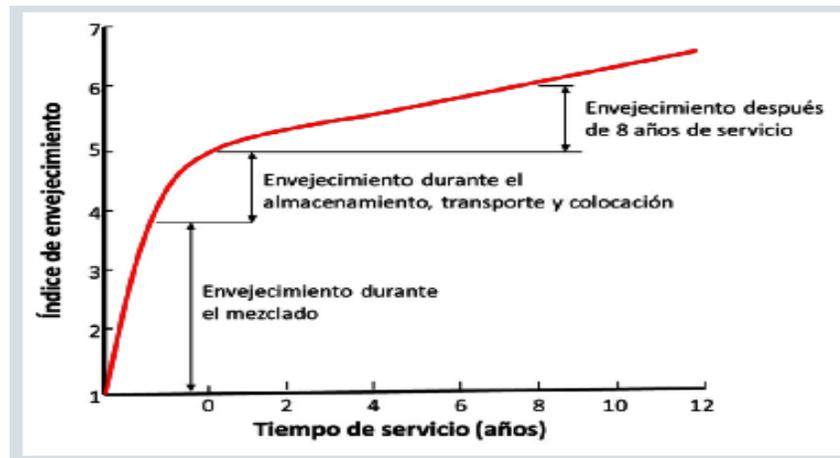
El envejecimiento es considerado como un fenómeno que altera las propiedades físico-químicas de la carpeta de rodadura, que ocasiona en el pavimento un deterioro a través del paso del tiempo y, por ende, disminuye su durabilidad esto se debe a la interacción de las mezclas con factores internos y externos que ocasionan un endurecimiento considerable e irreversible, afectando en gran escala su desempeño requerido

El envejecimiento se puede llegar a originar desde las primeras etapas de elaboración, como el mezclado en planta, presentarse en el proceso de construcción de una vía o, más comúnmente, en su periodo de servicio. Este fenómeno es impulsado por medios o mecanismos químicos que intervienen en este proceso, que finalmente alteran el orden químico, físico, mecánico y reológico de la carpeta asfáltica. (Rodriguez, Rodriguez, Ramirez, & Florez, 2016)

#### **2.5.2.1. Fases del envejecimiento**

Es aceptado a nivel mundial que, desde el punto de vista temporal, el envejecimiento ocurre en dos etapas. El envejecimiento a corto plazo y envejecimiento a largo plazo. La primera, el envejecimiento a corto plazo (Short Term Aging, STA), se caracteriza por que la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida (el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas); mientras que en la segunda etapa, correspondiente al envejecimiento a largo plazo (Long Term Aging, LTA), el proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años. El envejecimiento a largo plazo se asocia exclusivamente con la degradación producida por el medio ambiente durante la vida de servicio de las mezclas. (Montero Lopez & Miro, 2015)

Figura 8. Fases del envejecimiento



Fuente: Envejecimiento de las mezclas asfálticas, Teresa López Montero y Rodrigo Miro.

### 2.5.2.2. Envejecimiento a corto plazo

El envejecimiento a corto plazo se produce durante la fabricación, el mezclado, el transporte y la colocación de la mezcla asfáltica. Éste se inicia tan pronto como se prepara la mezcla, siendo en la etapa de fabricación donde el asfalto será más rápidamente envejecido. Éste se debe especialmente al incremento de la temperatura del betún para poder proceder a la fabricación de la mezcla.

Primero, el cemento asfáltico (160°C) es puesto en contacto con los áridos calientes (200 – 250°C) y cubrirá los áridos con una película delgada. Esto llevará a la pérdida de volátiles, la oxidación y, en un primer contacto, el cemento asfáltico será parcialmente absorbido por los áridos (endurecimiento exudativo).

Durante esta etapa, el oxígeno reacciona rápidamente con el cemento asfáltico caliente, aumentando el nivel de envejecimiento. Este aumento en el nivel de envejecimiento hace que aumente la viscosidad de la mezcla. Mientras la mezcla es transportada, puesta en obra y compactada, estos procesos continúan a un ritmo más lento. (Montero Lopez & Miro, 2015)

### 2.5.2.3. Envejecimiento a largo plazo

El envejecimiento a largo plazo se refiere al proceso de oxidación del asfalto durante su vida en servicio. Éste se produce con el tiempo como resultado de factores ambientales,

tales como la temperatura, el oxígeno disponible en la atmósfera, la radiación UV y la humedad, después de la construcción del pavimento asfáltico, y de las cargas durante su vida en servicio. Durante esta etapa, el oxígeno existente en la atmósfera está en contacto con la superficie difundándose en la estructura del pavimento. La tasa de oxidación es más baja que para el corto plazo, ya que se requiere más tiempo para que el oxígeno se difunda a través del espesor de las capas del pavimento.

Sin embargo, sigue siendo cuantificable, ya que el periodo de este proceso es más largo. En esta etapa, la velocidad de oxidación disminuye con la profundidad de la capa bituminosa y, consecuentemente, la tasa del aumento de la viscosidad también disminuye. Esto es debido a un constante suministro de oxígeno, a las altas temperaturas que ocurren en la superficie y la foto-oxidación UV. El efecto del envejecimiento a largo plazo se asocia con un incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica. (Montero Lopez & Miro, 2015)

#### **2.5.2.4. Envejecimiento físico y envejecimiento químico**

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es una convergencia de varios procesos durante su vida útil y se puede atribuir a envejecimiento químico y envejecimiento físico o endurecimiento estérico. Cualquiera que sea el tipo de envejecimiento, se produce un endurecimiento cuyos efectos aumentan el riesgo de formación de grietas. El asfalto pierde su capacidad de relajar la tensión ante cargas de tráfico repetidas y ante procesos de enfriamiento. Es por ello que los problemas de durabilidad de las mezclas se encuentran estrechamente vinculados a la capacidad del betún para resistir la oxidación y/o el endurecimiento físico.

Es necesario considerar que los mecanismos de volatilización y oxidación, son de carácter químico, mientras que el endurecimiento estérico corresponde a un reacomodamiento estructural y, por lo tanto, de carácter físico. A continuación se describen estos dos tipos de envejecimiento: físico y químico. (Montero Lopez & Miro, 2015)

##### **2.5.2.4.1. Envejecimiento físico**

El envejecimiento físico o endurecimiento estérico es el correspondiente al cambio en la orientación o reorganización molecular en la estructura del asfalto y la lenta cristalización

de ceras a temperatura ambiente, es decir, la cristalización de los alcanes lineares presentes en las fracciones de asfalto. Debido a esta reorganización molecular, el asfalto se endurece a temperatura ambiente a lo largo del tiempo, caracterizándose por ser un proceso físico mediante el cual las propiedades reológicas del asfalto cambian sin modificar su composición química. Por lo tanto, este proceso es reversible, pudiendo revertirse mediante exposición a calor o trabajo mecánico. (Montero Lopez & Miro, 2015)

#### **2.5.2.4.2. Envejecimiento químico**

El envejecimiento químico es el más importante y complejo, y corresponde a pérdida de volátiles, endurecimiento debido a la exudación, y principalmente a un proceso de oxidación. La suma de estos tres procesos químicos conduce a un endurecimiento de la mezcla bituminosa, consecuencia del envejecimiento del asfalto, el cual se vuelve más duro y quebradizo. Al contrario que el endurecimiento físico, este tipo de endurecimiento es irreversible. (Montero Lopez & Miro, 2015)

#### **2.5.2.5. Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento**

El envejecimiento en las mezclas asfálticas es un fenómeno producido por la interacción de diversas variables, de las cuales dependerá su vida en servicio. Éstas se pueden dividir en dos tipos: variables intrínsecas y extrínsecas. (Montero Lopez & Miro, 2015)

##### **2.5.2.5.1. Variables intrínsecas**

Las variables intrínsecas son aquellas relacionadas con las características internas de las mezclas asfálticas, es decir, los materiales y las características de fabricación. Referidos a los materiales se encuentran el asfalto y los áridos, mientras que el espesor de la película de asfalto, el porcentaje de huecos y la permeabilidad se clasifican como características propias de la fabricación de la mezcla. (Montero Lopez & Miro, 2015)

##### **- El asfalto**

Las características de oxidación del ligante, así como la composición química inicial, condicionan el comportamiento y durabilidad del pavimento después de su construcción.

El envejecimiento in situ que ocurre en los asfaltos de las mezclas bituminosas que conforman las carreteras se caracteriza por:

- Cambios en su composición genérica tales como la aparición de funciones oxidadas y la transformación de los componentes aromáticos en resinas seguida por la transformación en asfáltenos.

- Modificación de sus propiedades: incremento del punto de reblandecimiento y disminución del valor de penetración.

### **- Áridos**

Es escasa la evidencia científica sobre la incidencia de los áridos en el fenómeno de envejecimiento; de hecho, algunos autores consideran que los áridos son materiales inertes que no son objeto de reacciones químicas que alteren su composición al ser mezclados con otros materiales. Sin embargo, otros autores hablan de no solo hay que tener en cuenta en el proceso de envejecimiento el betún, sino que también es importante estudiar la interacción entre el ligante y los áridos. Dependiendo del tipo de árido (naturaleza mineralógica y características de superficie), el comportamiento a envejecimiento de un mismo ligante mezclado con diferentes tipos de árido puede variar debido al contenido mineral en la superficie de los áridos, las propiedades de absorción de los áridos, y la orientación de las moléculas polares del ligante en las proximidades de la interfaz ligante-superficie mineral. (Montero Lopez & Miro, 2015)

### **- Espesor de la película del asfalto**

El espesor de la película del asfalto afectará también a la tasa de envejecimiento. Un mayor espesor de la película del asfalto produce una mayor resistencia al envejecimiento, y también una mejor resistencia a la fatiga.

La película del asfalto es la que realmente va a verse afectada por el envejecimiento y, por lo tanto, es ésta la que se endurece por efecto del envejecimiento. Es por ello que un espesor de película de ligante adecuado va a asegurar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Teniendo esto en cuenta, es razonable que los ensayos de laboratorio para simular el envejecimiento en asfaltos se realicen sobre muestras de película delgada del asfalto, del orden de uno a tres milímetros de espesor.

Al tratarse de un material homogéneo, el espesor de la película del asfalto en las mezclas bituminosas no es constante, ya que los áridos finos pueden ser recubiertos por una capa

más espesa que los gruesos. Generalmente, se considera un espesor promedio de la película de betún. Ésta suele ser del orden de 15 a 20 micrones, siendo el espesor mínimo recomendado del orden de 6 a 8 micrones; sin embargo, no existe suficiente evidencia en la literatura para esa recomendación. (Montero Lopez & Miro, 2015)

#### **- Contenido de huecos**

Generalmente es asumido que la tasa de envejecimiento es función del contenido de huecos en las mezclas. Mezclas con un alto contenido de huecos envejecen más rápido, aunque la tasa de envejecimiento depende de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el flujo de aire y agua a través de los huecos permite la oxidación del asfalto. Cuanto mayor sea la percolación de aire y agua en la capa mayor será la oxidación del betún.

El tamaño y la distribución de los huecos de aire en las mezclas asfálticas dependen de las propiedades de los áridos, el diseño de la mezcla y el proceso de compactación.

La principal función de los huecos en las mezclas asfálticas es la de proporcionar unos espacios que permitan a la mezcla poder estabilizarse, es decir, que si se produce un incremento de temperatura, el ligante, que tiende a fluir, pueda ocupar los huecos existente en la mezcla. Es de anotar que el exceso de huecos genera deformaciones y permite el paso de agua y/o vapor, mientras que el defecto de huecos, un contenido muy bajo de huecos, produce deformaciones plásticas y problemas de exudación, entre otros. Por este motivo, es importante que exista un equilibrio en la cantidad de huecos y también en su distribución. Un porcentaje de huecos alto en la mezcla provoca un incremento significativo en el módulo de resiliencia y en la viscosidad. En cambio, mezclas con contenidos de huecos bajos experimentan un leve incremento en el módulo, pero sus valores son cercanos al inicial. (Montero Lopez & Miro, 2015)

#### **2.5.2.5.2. Variables extrínsecas**

Investigadores que han estudiado los efectos del envejecimiento sobre asfaltos convencionales y modificados han establecido que variables como la temperatura, la radiación ultravioleta o la presión generan procesos de oxidación que producen envejecimiento en los materiales. A continuación se describen algunas de estas variables. (Montero Lopez & Miro, 2015)

## **- Temperatura**

Para la fabricación de la mezcla el asfalto es calentado a temperaturas entre 150 y 170°C, temperatura a la cual se produce la volatilización de algunos de sus componentes. Es por ello que la temperatura es sin duda el primer agente externo al cual es sometida la mezcla asfáltica para su elaboración.

A 150°C comienza el proceso de volatilización del ligante, la cual puede incrementarse sustancialmente al aumentar la temperatura del mismo. La cantidad de volátiles puede incrementarse al doble al aumentar entre 10 y 12°C la temperatura. Esta variable es de gran importancia durante el transporte, producción y colocación de las mezclas, ya que de exceder los valores mencionados se producirá un envejecimiento prematuro de las mezclas, lo que reduce su vida de servicio. (Montero Lopez & Miro, 2015)

## **- Radiación solar**

La radiación solar es uno de los factores responsables del envejecimiento de los asfaltos, provocando la disminución en la vida útil de las mezclas asfálticas. La influencia de la radiación solar sobre la degradación del asfalto se conoce desde 1822, pero esta influencia normalmente ha sido ignorada en las simulaciones de envejecimiento en laboratorio ya que se ha encontrado que, debido al alto coeficiente de absorción de radiación del asfalto, la radiación solar afecta sólo a las capas superiores del pavimento asfáltico. Sin embargo, Durrieu, et al. Informan de que la influencia de la radiación ultravioleta sobre el envejecimiento de las capas superiores de pavimento bituminoso no puede ser ignorada ya que la degradación es rápida. Esto se ha explicado por el hecho de que la fase orgánica del betún, que es muy sensible al envejecimiento, está directamente involucrada en la evolución de las propiedades de la superficie.

El efecto del envejecimiento en las propiedades de la superficie del pavimento es relativamente desconocido. Recientes investigaciones sobre la evolución de las características de la superficie del pavimento han mostrado que el coeficiente de fricción de especímenes extraídos de partes de la carretera sin circulación de tráfico (carriles de parada de emergencia en autovías) se incrementa fuertemente en los primeros 12 meses. (Montero Lopez & Miro, 2015)

## **2.6. La fragilidad y la rigidez del asfalto**

El envejecimiento resulta en el endurecimiento (rigidización) de una mezcla, lo que altera su funcionamiento. Sin embargo, el envejecimiento también puede resultar en fragilidad (aumento de la tendencia a agrietarse y fracturarse) y la pérdida de durabilidad. (Campana, AbWahab, Cristi, & Sosnovske, 1994).

En general, estos cambios en la estructura molecular del asfalto se ven traducidos en un endurecimiento físico que convierte lentamente la mezcla en un material frágil susceptible a la aparición de grietas y otros fenómenos asociados durante su vida útil. (Rodríguez, Rodríguez, Ramirez, & Florez, 2016)

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito. (Forero Bernal, Garcia Medina, & Martinez Torres, 2015)

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil, y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas del agregado. (Asphalt institute, 1982)

Las propiedades del asfalto cambian cuando se endurece durante el proceso de mezclado y colocación en obra más el paso del tiempo una vez construida la capa (envejecimiento). Disminuye la capacidad de adherirse a las partículas de agregado, su ductilidad disminuye también por lo que tiende a hacerse más frágil. (Jaramillo Briceño, 2015)

Es conocido que el comportamiento de las mezclas asfálticas cambia con la temperatura a la cual se encuentre, para temperaturas elevadas la mezcla presenta un comportamiento más viscoso y menos elástico, produciendo una reducción en la rigidez y por lo tanto exponiéndose a la aparición de deformaciones permanentes. (Jaramillo Briceño, 2015)

El envejecimiento se considera como un daño superficial pero que a la postre contribuye en el deterioro del pavimento ya que al producirse el endurecimiento y fragilidad de la película de asfalto, se forma agrietamiento que permite el ingreso del agua al interior de la capa de pavimento. (Fernandez Gomez, Rondon Quintana, & Lazcano Reyes, 2011)

La reacción del asfalto con el oxígeno de la atmosfera es quizá el factor principal que produce el endurecimiento y lleva a la fragilidad del mismo, el endurecimiento es un resultado de la polaridad del oxígeno contenido en las fracciones del asfalto el cual aumenta la consistencia del asfalto por el incremento de las fuerzas de interacción molecular. (Fernandez Gomez, Rondon Quintana, & Lazcano Reyes, 2011)

El envejecimiento por oxidación altera las propiedades mecánicas de las carpetas asfálticas, tales como el aumento de la rigidez y la disminución de la tenacidad que conducen a un aumento de la fragilidad y mayor potencial para la formación de grietas. (Torres Gonzales, Parejas Garavito, Hinojosa Benavides, & Rojas Carrizales, 2021)

Durante la exposición del asfalto a altas temperaturas, sus propiedades físico-químicas cambian por un proceso de oxidación y envejecimiento del ligante, el cual incide de manera directa en el incremento de la rigidez y la disminución de la ductilidad. (Torres Gonzales, Parejas Garavito, Hinojosa Benavides, & Rojas Carrizales, 2021)

En general las alteraciones de orden químico como la volatilización, la oxidación y la polimerización producen un reacomodamiento en la estructura molecular del asfalto y la manifestación de respuesta a estos cambios radica en el endurecimiento de las mezclas y por consiguiente la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse. (Fernandez Gomez, Rondon Quintana, & Lazcano Reyes, 2011)

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE LA FRAGILIDAD Y RIGIDEZ DEL ASFALTO DEBIDO A LA OXIDACIÓN

#### 3.1. Selección de materiales

Los materiales utilizados para el presente trabajo de investigación, se utilizó tanto los agregados como el cemento asfáltico de la chancadora de Charajas del SEDECA-TARIJA, habiendo obtenido los siguientes materiales:

- Agregados
  1. Grava.
  2. Gravilla.
  3. Arena.
- Cemento asfáltico 85/100 (Procedencia Brasil)

Tabla 15. Coordenadas de la chancadora Charajas

Coordenadas	
Geográficas	UTM
21°46'54.88" S	7590261.58 m S
64°46'13.76" O	316950.75 m E

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Imagen satelital de la chancadora de Charajas



Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Caracterización de los agregados

Se realizó la caracterización del material seleccionado obtenido de la chancadora de Charajas, del cual se obtuvo la grava, gravilla y la arena. Para posteriormente poder realizar una evaluación de la calidad del material según la normativa de la administradora boliviana de carreteras (ABC).

#### 3.2.1. Análisis granulometría (ASTM C 136-01)

Este ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos de un material.

Donde se procedió a realizar tres veces el ensayo de la granulometría para cada agregado. Seguidamente se realizara la descripción paso a paso del ensayo tomando como ejemplo al primer ensayo del agregado grueso (grava).

El procedimiento del ensayo es el siguiente

- Determinar la cantidad de material de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 16. Relación de tamaño máximo nominal y cantidad de material para la granulometría

Máximo tamaño nominal con aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo
mm	pulgada	Kg
9.5	3/8"	1
12.5	1/2"	2
19.0	3/4"	5
25.0	1"	10
37.5	1 1/2"	15
50.0	2"	20
63.0	2 1/2"	35
75.0	3"	60
90.0	3 1/2"	100
100.0	4"	150
125.0	5"	300

Fuente: Norma ASTM C 136-01.

Siendo para nuestro caso con un tamaño máximo nominal de 3/4" una cantidad mínima de ensayo de 5 kg.

- Tamizado manual

Posteriormente al preparado del material se procedió a realizar el tamizado manual. Teniendo así los siguientes pesos retenidos.

Figura 10. Cuarteo del material y tamizado del material



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Datos granulométricos de los agregados

N° ensayo	Grava			Gravilla			Arena			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
<b>Tamices</b>	<b>Peso ret.</b>									
(pulg)	(mm)									
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	19.0	155.0	130.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/2"	12.5	2740.0	2700.0	2710.0	19.0	14.8	7.7	0.0	0.0	0.0
3/8"	9.5	1380.0	1390.0	1385.0	52.2	55.6	26.8	0.0	0.0	0.0
N°4	4.75	720.0	775.0	810.0	3675.0	3763.6	3631.4	8.0	2.0	6.5
N°8	2.36	5.0	5.0	5.0	1233.1	1126.6	1293.9	1039.5	811.0	889.0
N°10	2.0	0.0	0.0	0.0	20.7	39.4	40.3	315.5	277.5	277.0
N°16	1.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	964.5	857.5	926.0
N°30	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	984.0	1104.0	1082.0
N°40	0.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	380.5	487.0	455.0
N°50	0.30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	338.5	433.0	391.5
N°100	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	410.0	539.0	496.0
N°200	0.075	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	353.5	351.0	321.0
BASE	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	206.0	138.0	156.0
<b>SUMA</b>	-	<b>5000.0</b>								
<b>PERDIDAS</b>	-	<b>0.0</b>								

Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del % retenido acumulado y el % que pasa del total

Usando las siguientes expresiones se pudo determinar la curva granulométrica.

Retenido acumulado

$$\text{Retenido acumulado}_A = \text{Retenido}_A + \text{Retenido acumulado}_{A-1}$$

Donde:

Retenido acumulado (A)= Material que se encuentra retenido en un respectivo tamiz más el retenido acumulado del tamiz anterior.

Retenido (A)= Material que se encuentra retenido en el tamiz de análisis.

Retenido acumulado (A-1)= Material retenido acumulado en el tamiz anterior al tamiz de análisis.

$$\text{Retenido acumulado (3/4")} = 150 + 0 = 155 \text{ gr}$$

$$\text{Retenido acumulado (1/2")} = 2740 + 155 = 2895 \text{ gr}$$

$$\text{Retenido acumulado (3/8")} = 1380 + 2895 = 4275 \text{ gr}$$

$$\text{Retenido acumulado (N}^\circ\text{4)} = 720 + 4275 = 4995 \text{ gr}$$

$$\text{Retenido acumulado (N}^\circ\text{8)} = 5 + 4995 = 5000 \text{ gr}$$

Porcentaje retenido acumulado

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \frac{\text{Retenido acumulado} * 100}{\text{MT}}$$

Donde:

% Retenido acumulado= Porcentaje de material retenido acumulado en el tamiz de análisis.

Retenido acumulado= Material retenido acumulado en el tamiz de análisis.

MT= Cantidad total de material

Muestra total= 5000 gr

$$\% \text{ Retenido acumulado (3/4")} = \frac{150 * 100}{5000} = 3.10\%$$

$$\% \text{ Retenido acumulado (1/2")} = \frac{2895 * 100}{5000} = 57.90\%$$

$$\% \text{ Retenido acumulado (3/8")} = \frac{4275 * 100}{5000} = 85.50\%$$

$$\% \text{ Retenido acumulado (N°4)} = \frac{4995 * 100}{5000} = 99.90\%$$

$$\% \text{ Retenido acumulado (N°8)} = \frac{5000 * 100}{5000} = 100\%$$

Porcentaje que pasa

$$\% \text{ Que pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido acumulado}$$

Donde:

% Que pasa= Porcentaje de material que pasa por el tamiz de análisis.

% Retenido acumulado= Porcentaje del retenido acumulado en el tamiz de análisis.

$$\% \text{ Que pasa (3/4")} = 100\% - 3.10\% = 96.90\%$$

$$\% \text{ Que pasa (1/2")} = 100\% - 57.90\% = 42.10\%$$

$$\% \text{ Que pasa (3/8")} = 100\% - 85.50\% = 14.50\%$$

$$\% \text{ Que pasa (N°4)} = 100\% - 99.90\% = 0.10\%$$

$$\% \text{ Que pasa (N°8)} = 100\% - 100\% = 0\%$$

Siguiendo el mismo procedimiento para todas las granulometrías de los agregados se obtuvo los siguientes resultados.

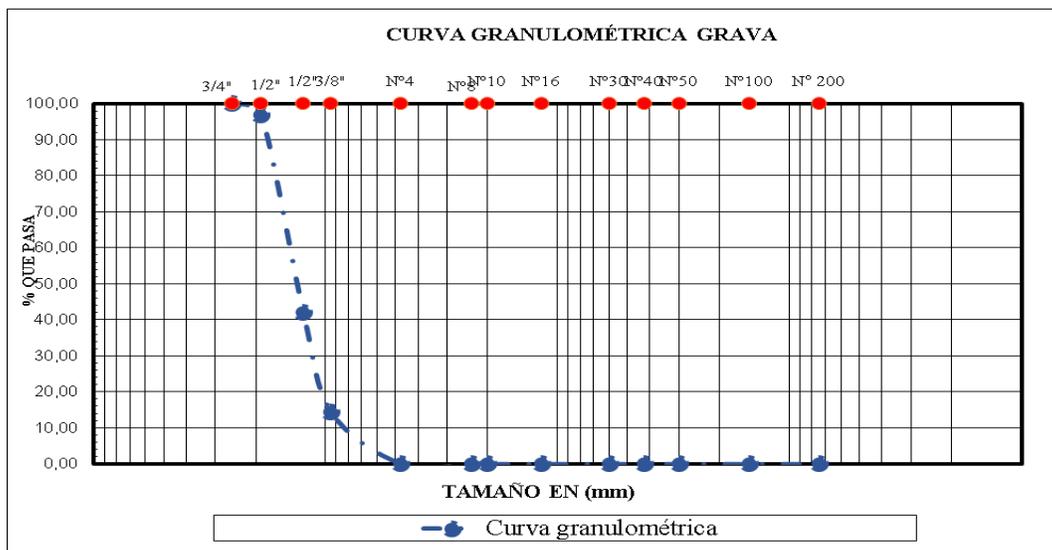
## Resultados granulométricos

Tabla 18. Primer ensayo granulométrico de la grava

Masa total=5000 gr		Masa retenida	Masa retenida acumulada	% Retenido acumulado	% que pasa del total
Tamices					
(pulgada)	(mm)				
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	155.00	155.00	3.10	96.90
1/2"	12.5	2740.00	2895.00	57.90	42.10
3/8"	9.50	1380.00	4275.00	85.50	14.50
Nº4	4.75	720.00	4995.00	99.90	0.10
Nº8	2.36	5.00	5000.00	100.00	0.00
Nº10	2.00	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº40	0.425	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Curva granulométrica del primer ensayo de grava



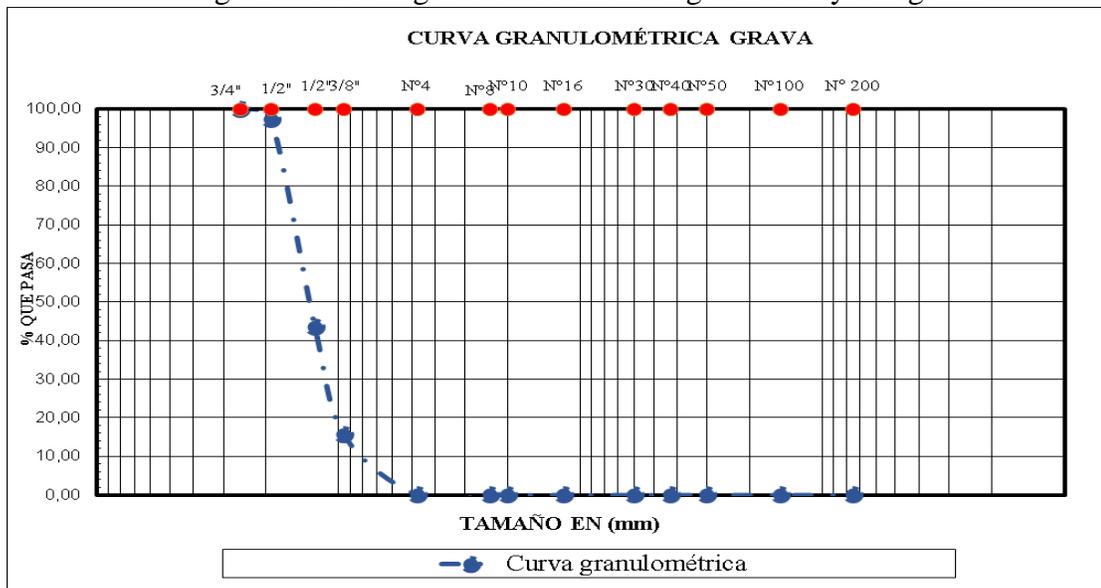
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Segundo ensayo granulométrico de la grava

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	130.00	130.00	2.60	97.40
1/2"	12.50	2700.00	2830.00	56.60	43.40
3/8"	9.50	1390.00	4220.00	84.40	15.60
Nº4	4.75	775.00	4995.00	99.90	0.10
Nº8	2.36	5.00	5000.00	100.00	0.00
Nº10	2.00	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº40	0.43	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Curva granulométrica del segundo ensayo de grava



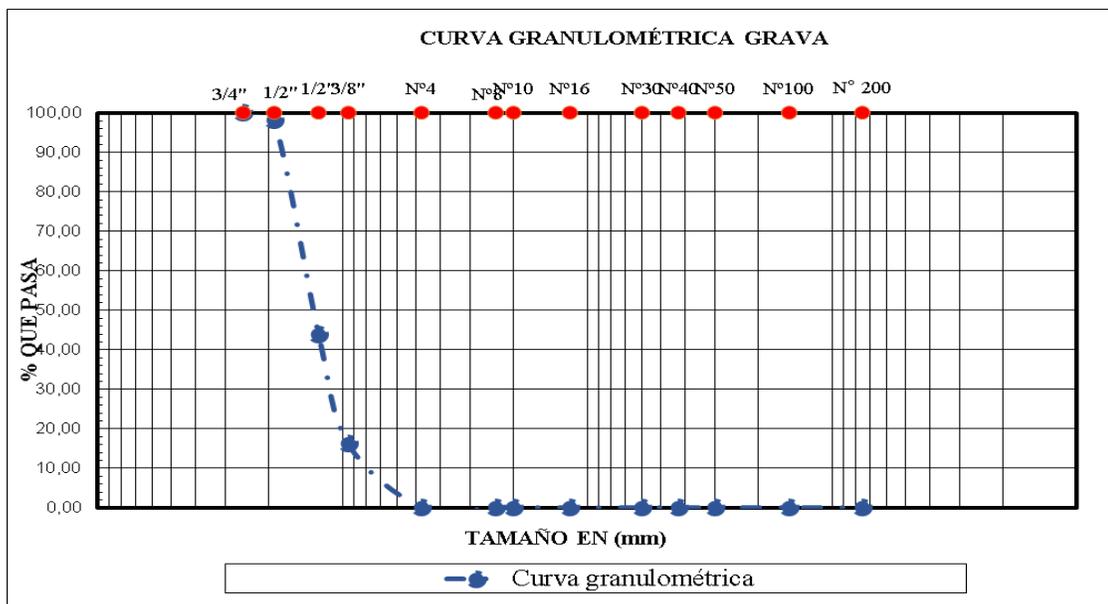
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Tercer ensayo granulométrico de la grava

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	90.00	90.00	1.80	98.20
1/2"	12.50	2710.00	2800.00	56.00	44.00
3/8"	9.50	1385.00	4185.00	83.70	16.30
Nº4	4.75	810.00	4995.00	99.90	0.10
Nº8	2.36	5.00	5000.00	100.00	0.00
Nº10	2.00	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº40	0.425	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.00			
PÉRDIDAS		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Curva granulométrica del tercer ensayo de grava



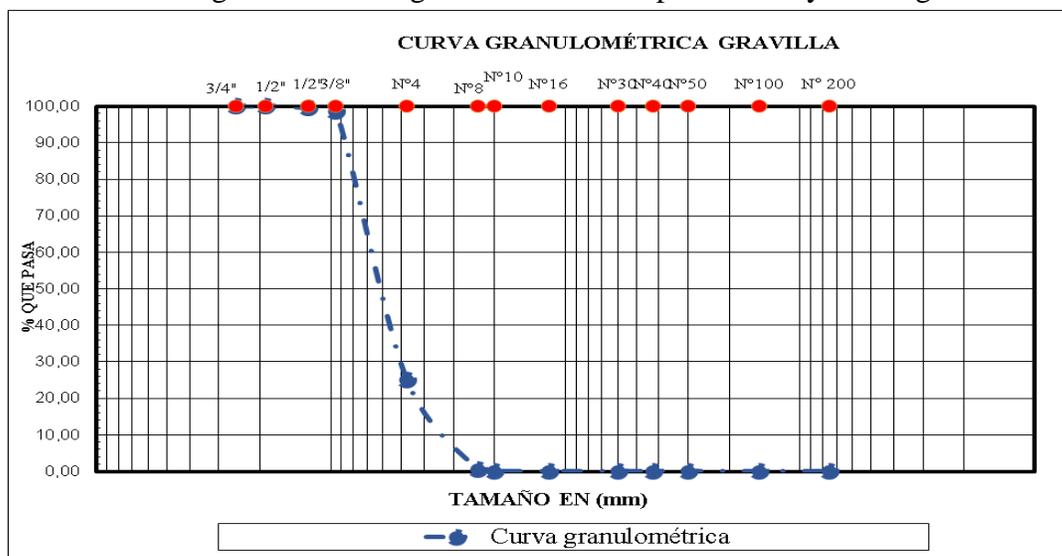
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Primer ensayo granulométrico de la gravilla

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	19.00	19.00	0.38	99.62
3/8"	9.50	52.20	71.20	1.42	98.58
Nº4	4.75	3675.00	3746.20	74.92	25.08
Nº8	2.36	1233.10	4979.30	99.59	0.41
Nº10	2.00	20.70	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº40	0.43	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Curva granulométrica del primer ensayo de la gravilla



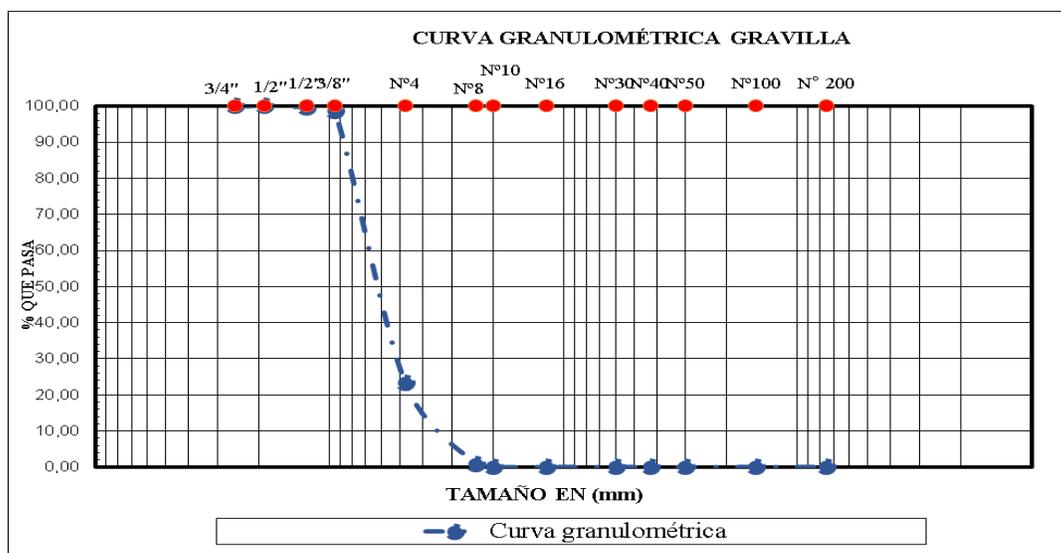
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Segundo ensayo granulométrico de la gravilla

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	14.80	14.80	0.30	99.70
3/8"	9.50	55.60	70.40	1.41	98.59
N°4	4.75	3763.60	3834.00	76.68	23.32
N°8	2.36	1126.60	4960.60	99.21	0.79
N°10	2.00	39.40	5000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°40	0.43	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Curva granulométrica del segundo ensayo de la gravilla



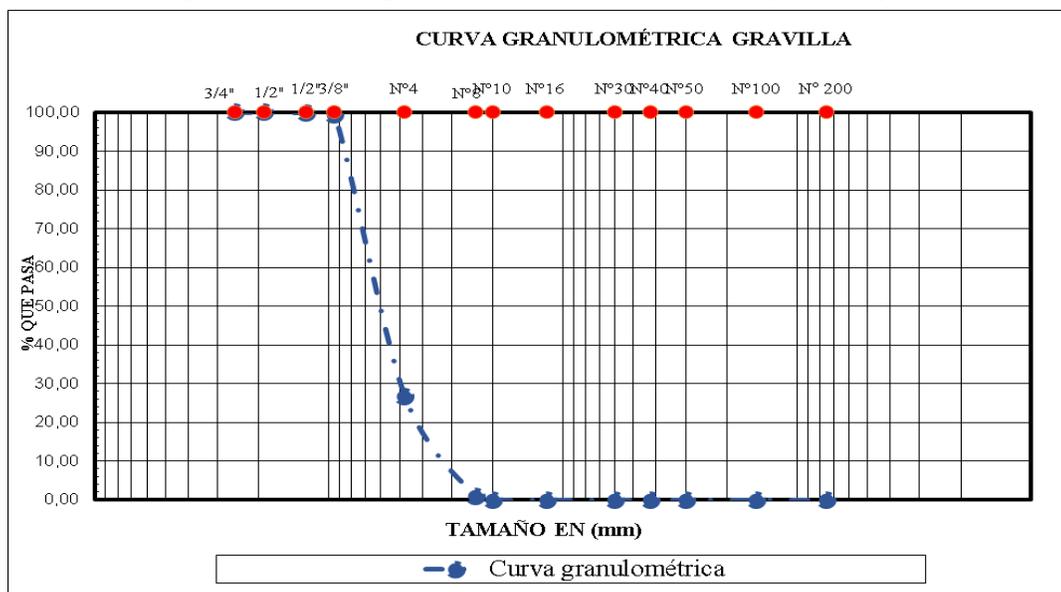
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Tercer ensayo granulométrico de la grava

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	7.70	7.70	0.15	99.85
3/8"	9.50	26.80	34.50	0.69	99.31
N°4	4.75	3631.35	3665.85	73.32	26.68
N°8	2.36	1293.90	4959.75	99.20	0.81
N°10	2.00	40.25	5000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°40	0.43	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Curva granulométrica del tercer ensayo de la grava



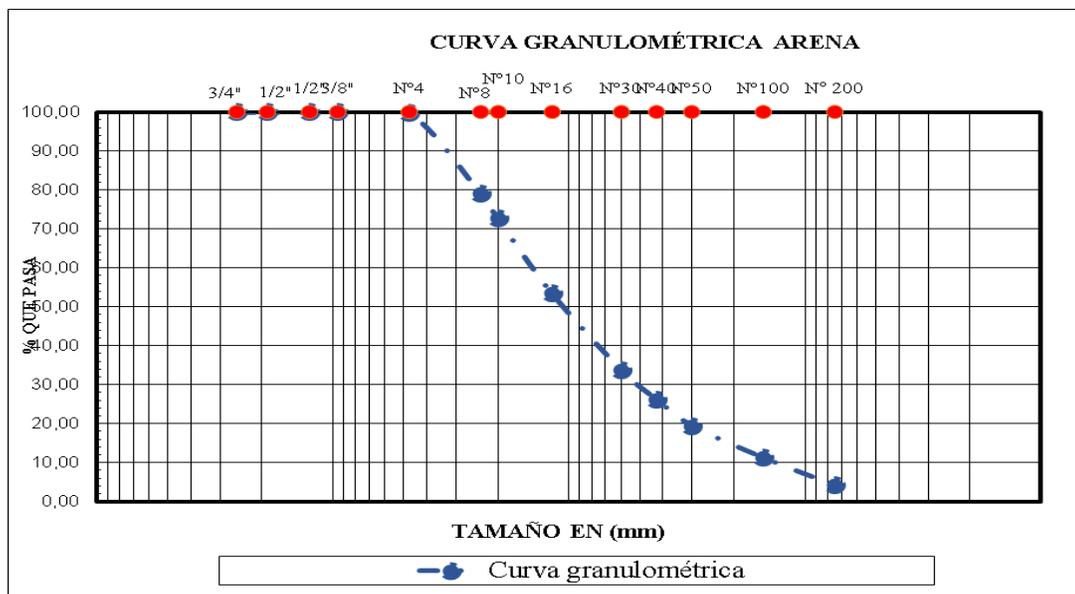
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Primer ensayo granulométrico de la arena

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	8.00	8.00	0.16	99.84
N°8	2.36	1039.50	1047.50	20.95	79.05
N°10	2.00	315.50	1363.00	27.26	72.74
N°16	1.18	964.50	2327.50	46.55	53.45
N°30	0.60	984.00	3311.50	66.23	33.77
N°40	0.43	380.50	3692.00	73.84	26.16
N°50	0.30	338.50	4030.50	80.61	19.39
N°100	0.15	410.00	4440.50	88.81	11.19
N°200	0.075	353.50	4794.00	95.88	4.12
BASE	-	206.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.00			
PÉRDIDAS		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Curva granulométrica del primer ensayo de la arena



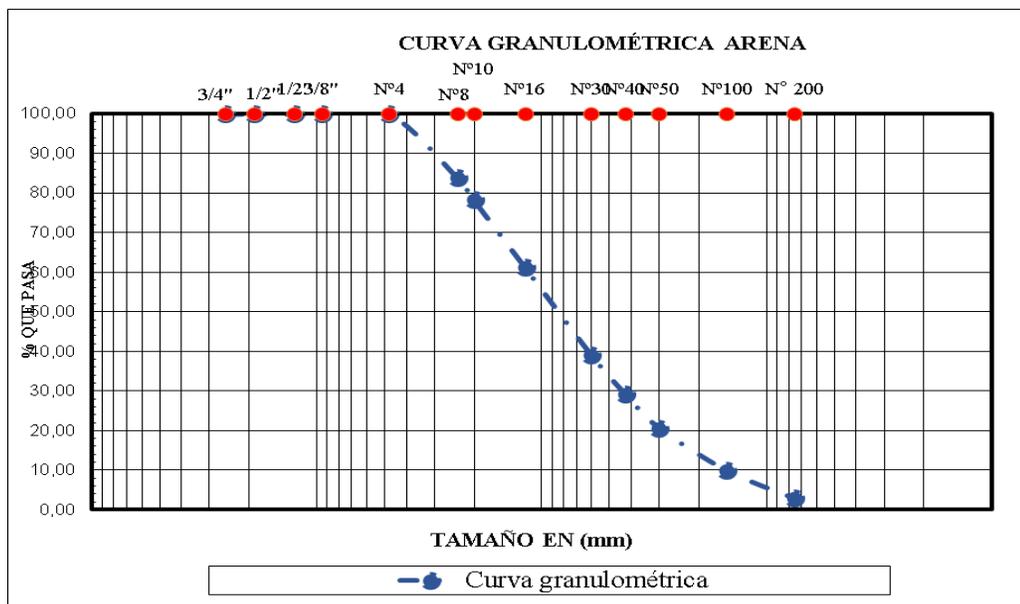
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Segundo ensayo granulométrico de la arena

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	2.00	2.00	0.04	99.96
N°8	2.36	811.00	813.00	1.26	83.74
N°10	2.00	277.50	1090.50	21.81	78.19
N°16	1.18	857.50	1948.00	38.96	61.04
N°30	0.60	1104.00	3052.00	61.04	38.96
N°40	0.43	487.00	3539.00	70.78	29.22
N°50	0.30	433.00	3972.00	79.44	20.56
N°100	0.15	539.00	4511.00	90.22	9.78
N°200	0.075	351.00	4862.00	97.24	2.76
BASE	-	138.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Curva granulométrica del segundo ensayo de la arena



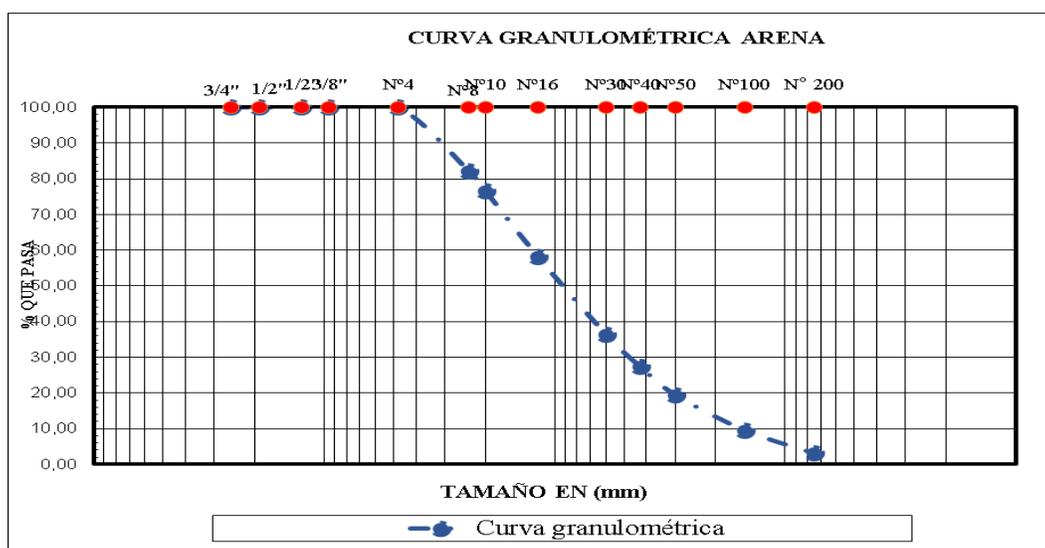
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Tercer ensayo granulométrico de la arena

Masa total=5000 gr					
Tamices		Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa del total
(pulgada)	(mm)				
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	6.50	6.50	0.13	99.87
N°8	2.36	889.00	895.50	17.91	82.09
N°10	2.00	277.00	1172.50	23.45	76.55
N°16	1.18	926.00	2098.50	41.97	58.03
N°30	0.60	1082.00	3180.50	63.61	36.39
N°40	0.43	455.00	3635.50	72.71	27.29
N°50	0.30	391.50	4027.00	80.54	19.46
N°100	0.15	496.00	4523.00	90.46	9.54
N°200	0.075	321.00	4844.00	96.88	3.12
BASE	-	156.00	5000.00	100.00	0.00
<b>SUMA</b>		5000.00			
<b>PÉRDIDAS</b>		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Curva granulométrica del tercer ensayo de la arena



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las granulometrías de los agregados se decidió trabajar con las siguientes granulometrías para la elaboración de los especímenes de estudio.

Tabla 27. Granulometrías resultantes

Tamices		Grava			Gravilla			Arena		
		Peso ret	% Peso ret.	% Que pasa	Peso ret	% Peso ret.	% Que pasa	Peso ret	% Peso ret.	% Que pasa
(pulg)	(mm)									
1"	25.40	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	90.00	1.80	98.20	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	2710.00	56.00	44.00	19.00	0.38	99.62	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	1385.00	83.70	16.30	52.20	1.42	98.57	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	810.00	99.90	0.10	3675.00	74.92	25.07	8.00	0.16	99.84
Nº8	2.36	5.00	100.00	0.00	1233.10	99.58	0.41	1039.50	20.95	79.05
Nº10	2.00	0.00	100.00	0.00	20.70	100.00	0.00	315.50	27.26	72.74
Nº16	1.18	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	964.50	46.55	53.45
Nº30	0.60	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	984.00	66.23	33.77
Nº40	0.43	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	380.50	73.84	26.16
Nº50	0.30	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	338.50	80.61	19.39
Nº100	0.15	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	410.00	88.81	11.19
Nº200	0.075	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	353.50	95.88	4.12
BASE	-	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	206.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Desgaste de los ángeles (ASTM C 131-01)

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados. Este ensayo se realizó para el agregado grueso (grava) y el agregado intermedio (gravilla), donde a continuación se describirá el procedimiento.

- Determinación de la carga abrasiva y la cantidad de muestra a utilizar.

De acuerdo a la granulometría de los agregados tenemos:

Agregado grueso (grava).

Muestra tipo B, necesitando 2500 de material que pasa el tamiz ¾" y retiene en el tamiz ½" y 2500 que pasa tamiz ½" y retiene en el tamiz 3/8".

Agregado Intermedio (gravilla).

Muestra tipo C, necesitando 2500 de material que pasa el tamiz 3/8" y retiene en el tamiz ¼" y 2500 que pasa tamiz ¼" y retiene en el tamiz Nº4.

Tabla 28. Granulometrías para el ensayo de desgaste de los ángeles

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Masa de la muestra para ensayo (gr) Granulometrías			
mm	pulg	mm	pulg	A	B	C	D
37.5	1 1/2"	25	1"	1250±25			
25	1"	19	3/4"	1250±25			
19	3/4"	12.5	1/2"	1250±25	2500±10		
12.5	1/2"	9.5	3/8"	1250±25	2500±10		
9.5	3/8"	6.3	1/4"			2500±10	
6.3	1/4"	4.75	Nº 4			2500±10	
4.75	Nº 4	2.36	Nº 8				5000±10
TOTALES				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Fuente: Norma ASTM C 131-01.

Tabla 29. Carga Abrasiva

Granulometría de ensayo	Numero de esferas	Masa total (gr)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Fuente: Norma ASTM C 131-01.

De acuerdo a la granulometría de los agregados tenemos:

Agregado Grueso (grava).

Granulometría tipo B donde se emplearan 11 esferas de masa total 4584 gr.

Agregado (gravilla).

Granulometría tipo C donde se emplearan 8 esferas de masa total 3330 gr.

- Prueba del desgaste de los ángeles.

Una vez realizado el ensayo se tamiza y se pesa el material retenido en el tamiz Nº 12 por lavado.

Figura 20. Máquina de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Masa antes del ensayo	Masa del material después del ensayo.
Grava = 5001.00 gr	Grava = 3791.00 gr
Gravilla = 5000.70 gr	Gravilla = 3800.20 gr

- Determinación del % de desgaste.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

% Desgaste= Desgaste de los ángeles en (%).

P1= Masa de la muestra antes del ensayo.

P2= Masa de la muestra posterior al ensayo.

$$\% \text{ Desgaste grava} = \frac{5001.00 - 3791.00}{5001.00} * 100 = \mathbf{24.20\%}$$

$$\% \text{ Desgaste gravilla} = \frac{5000.70 - 3800.20}{5000.70} = \mathbf{26.47\%}$$

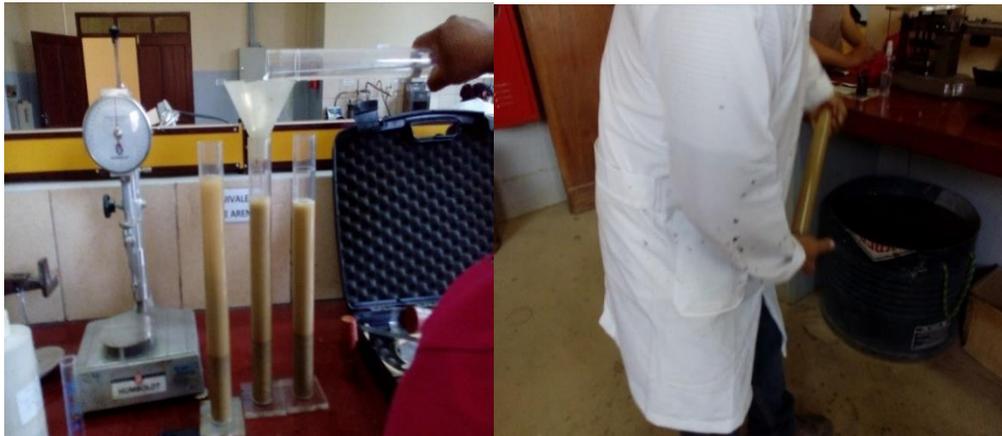
### 3.2.3. Equivalente de arena (ASTM D 2419-95)

Permite determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los agregados finos.

El procedimiento es el siguiente.

- Primero se vació la arena en las probetas y se agregó agua destilada y cloruro de calcio y con tapón se compacta la arena para que se asiente.
- Posteriormente se procede a realizar a agitar manualmente las probetas, y así dejarla reposar mínimo 2 días para tomar lecturas.

Figura 21. Probeta de equivalente de arena y su agitado



Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del % equivalente de arena

Las lecturas que se tuvieron fueron las siguientes.

Tabla 30. Resultados de ensayo de equivalente de arena

Ensayo	Altura de arena	Altura de arcilla
1	8.50 cm	11.70 cm
2	9.20 cm	11.80 cm
3	9.54 cm	11.70 cm

Fuente: Elaboración propia.

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

Donde:

Equivalente de arena (EA)=Proporción de arena de la muestra del agregado fino.

Lectura de arena= Altura de arena de la muestra del agregado fino.

Lectura de arcilla= Altura de arcilla de la muestra del agregado fino.

Ensayo 1            Equivalente de arena (EA) =  $\frac{8.50}{11.70} = 72.65\%$

Ensayo 2            Equivalente de arena (EA) =  $\frac{9.20}{11.80} = 77.97\%$

Ensayo 3            Equivalente de arena (EA) =  $\frac{9.54}{11.70} = 81.54\%$

### 3.2.4. Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D 5821-01)

Determina el porcentaje en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas. El procedimiento es el siguiente:

- Determinación de la masa mínima de la muestra

Tabla 31. Cantidad mínima de material para ensayo caras fracturadas

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra	
mm	pulgada	(Lb)	(gr)
9.5	3/8"	0.5	200
12.5	1/2"	1	500
19	3/4"	3	1500
25	1"	6.5	3000
37.5	1 1/2"	16.5	7500
50	2"	33	15000
63	2 1/2"	66	30000
75	3"	132	60000
90	3 1/2"	198	90000

Fuente: Norma ASTM D 5821-01.

Según el tamaño máximo de 3/4" la masa mínima será de 1500 gr, donde después se procederá a tamizar por los tamices 1 1/2", 1", 3/4", 1/2" y 3/8".

- Inspección visual

Se realizara una inspección visual separando las caras fracturadas, las que no son fracturadas y que son cuestionables para luego contar en cantidad y pesarlas.

Figura 22. Inspección visual por tamaños



Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del % de partículas fracturadas.

$$P = \left( \frac{F + \frac{Q}{2}}{F + Q + N} \right) * 100$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con caras fracturadas.

F = Masa o número de partículas con caras fracturadas.

Q = Masa o número de partículas cuestionables.

N = Masa o número de partículas sin caras fracturadas.

Los datos son los siguientes:

Tabla 32. Partículas fracturadas, cuestionables y no fracturadas.

Tamiz	Peso retenido (gr)	% Retenido	Masa en gramos de partículas no fracturadas (N)	Masa en gramos de partículas cuestionables (Q)	Masa en gramos de partículas fracturadas (F)
1 1/2" – 1"		0.00			
1" – 3/4"	8.30	0.55	0.00	0.00	8.30
3/4" – 1/2"	717.10	47.84	107.00	165.10	444.90
1/2" – 3/8"	495.70	36.24	52.10	75.50	368.40
3/8" – 1/4"	278.90	21.01	16.20	227.80	33.80
Total	1500.00				

Fuente: Elaboración propia.

$$P(3/4" - 1/2") = \left( \frac{444.90 + \frac{165.10}{2}}{444.90 + 165.10 + 107.00} \right) * 100 = 73.56\%$$

$$P(1/2" - 3/8") = \left( \frac{368.40 + \frac{75.50}{2}}{368.40 + 75.50 + 52.10} \right) * 100 = 81.89\%$$

$$P(3/8" - 1/4") = \left( \frac{33.80 + \frac{227.80}{2}}{33.80 + 227.80 + 16.20} \right) * 100 = 53.17\%$$

$$P_{prom} = \frac{73.56 + 81.89 + 53.17}{3} = 69.54\%$$

### 3.2.5. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (ASTM C 127-88)

Se realizó el ensayo para la grava y la gravilla, el procedimiento es el siguiente.

- Determinación de la cantidad mínima de ensayo.

En función al tamaño máximo nominal podemos determinar la cantidad mínima de ensayo.

Tabla 33. Cantidad mínima del ensayo gravedad específica y absorción

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra	
mm	pulgada	Kg	Lb
Hasta 12.5	1/2"	2	4.4
19	3/4"	3	6.6
25	1"	4	8.8
37.5	1 1/2"	5	11
50	2"	8	17.6
63	2 1/2"	12	26.4
75	3"	18	39.6
90	3 1/2"	25	55
100	4"	40	88
112	4 1/2"	50	110
125	5"	75	165
150	6"	125	275

Fuente: Normativa ASTM C 127-88.

Según el tamaño máximo nominal de 3/4" la masa mínima es de 3kg, donde para el ensayo se utilizó 5 kg para la grava y 3 kg para la gravilla.

- Secado superficial y pesos de los agregados.

Previo ensayo se debe de remojar el material para su posterior secado superficialmente seco, para luego determinar los pesos de los agregados tanto como el peso superficialmente seco, sumergido y seco de los agregados.

Figura 23. Secado superficial y pesado sumergido



Fuente: Elaboración propia.

Donde los datos son los siguientes.

Tabla 34. Masas de gravedad específica y absorción de la grava y gravilla

Muestra N°	Masa de muestra seca "A" (gr)	Masa de muestra saturada con superficie seca "B" (gr)	Masa de muestra saturada "C" (gr)
<b>Grava</b>			
1	4947.30	5000.00	3121.00
2	4946.80	5000.00	3117.00
3	4947.90	5000.00	3118.00
<b>Gravilla</b>			
1	2966.10	3000.00	1876.00
2	2966.50	3000.00	1875.00
3	2966.20	3000.00	1876.00

Fuente: Elaboración propia.

- **Gravedad específica bulk.**- Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsb = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica bulk.

A= Masa seca de la muestra (gr).

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr).

C= Masa sumergido de la muestra (gr).

$$Gsb(\text{grava})_1 = \frac{4947.30}{5000.00 - 3121.00} = 2.63$$

$$Gsb(\text{gravilla})_1 = \frac{2966.10}{3000.00 - 1876.00} = 2.64$$

- **Gravedad específica bulk aparente**, - Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsa = \frac{A}{A - C}$$

Donde:

Gsa= Gravedad específica bulk aparente.

A= Masa seco de la muestra (gr).

C= Masa sumergido de la muestra (gr).

$$Gsa(\text{grava})1 = \frac{4947.30}{4947.30 - 3121.00} = 2.71$$

$$Gsa(\text{gravilla})1 = \frac{2966.10}{2966.10 - 1876.00} = 2.72$$

- **Gravedad específica bulk SSS** - Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión durante 15 horas (pero sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsbs = \frac{B}{B - C}$$

Donde:

Gsbs= Gravedad específica bulk saturada superficialmente seca.

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr).

C= Masa sumergida de la muestra (gr).

$$Gsb(\text{grava})1 = \frac{5000.00}{5000.00 - 3121.00} = 2.66$$

$$Gsb(\text{gravilla})1 = \frac{3000.00}{3000.00 - 1876.00} = 2.67$$

- **Absorción.**- Es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado.

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

Donde:

% Absorción= Porcentaje de absorción de la muestra.

A= Masa seca de la muestra (gr).

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr).

$$\% \text{ Absorción(grava)}_1 = \left( \frac{5000.00 - 4947.30}{4947.30} \right) * 100 = 1.07$$

$$\% \text{ Absorción(gravilla)}_1 = \left( \frac{3000 - 2966.10}{2966.10} \right) * 100 = 1.14$$

Los resultados son los siguientes:

Tabla 35. Gravedad específica y absorción de la grava y gravilla

Muestra N°	Gravedad específica bulk (Gsb)	Gravedad específica bulk aparente (Gsa)	Gravedad específica bulk SSS (Gsbs)	% Absorción
<b>Grava</b>				
1	2.63	2.66	2.71	1.07
2	2.63	2.66	2.70	1.08
3	2.63	2.66	2.70	1.05
<b>Promedio</b>	<b>2.63</b>	<b>2.66</b>	<b>2.71</b>	<b>1.06</b>
<b>Gravilla</b>				
1	2.63	2.66	2.72	1.14
2	2.64	2.67	2.72	1.13
3	2.64	2.67	2.72	1.14
<b>Promedio</b>	<b>2.64</b>	<b>2.67</b>	<b>2.72</b>	<b>1.14</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.6. Gravedad específica y absorción de los agregados finos (ASTM C 128-97)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk y aparente 23 /23°C (73.4/73.4°F), así como la absorción de agregados finos.

- Secado SSS de la arena y peso seco en horno.

Previo ensayo se debe remojar la arena para su posterior secado hasta que la arena posterior ensayo en el cono sufra un desmoronamiento superficial.

Figura 24. Secado superficial de la arena y su desmoronamiento



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente la muestra se vació a un matraz y se llenó con agua para determinar sus pesos e introducir al horno para el peso en seco.

Donde se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 36. Masas de gravedad específica y absorción de la arena

<b>Arena</b>			
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Masa muestra seca al horno "A" (gr)	481.10	481.10	482.00
Masa matraz + agua "B" (gr)	677.60	736.80	721.60
Masa muestra + matraz + agua "C" (gr)	977.20	1018.20	1013.70
Masa muestra Sat. Seca "S" (gr)	500.00	500.00	500.00
Masa matraz (gr)	177.60	236.80	221.60

Fuente: Elaboración propia.

### Gravedades específicas y absorción del ensayo 1.

- Gravedad específica bulk.

$$Gsb = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica bulk.

A= Masa seca de la muestra (gr).

B= Masa de matraz con agua (gr).

C= Masa de matraz con muestra y agua (gr).

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

$$Gsb = \frac{481.10}{677.60 + 500.00 - 977.20} = 2.40$$

- Gravedad específica SSS.

$$Gsb \text{ SSS} = \frac{S}{B + S - C}$$

Donde:

Gsb SSS= Gravedad específica saturada superficialmente seca.

B= Masa de matraz con agua (gr).

C= Masa de matraz con muestra y agua (gr).

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

$$Gsb \text{ SSS} = \frac{500.00}{677.60 + 500.00 - 977.20} = 2.50$$

- Gravedad específica aparente.

$$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$$

Donde:

Gsa= Gravedad específica aparente.

A= Masa seca de la muestra (gr).

B= Masa de matraz con agua (gr).

C= Masa de matraz con muestra y agua (gr).

$$Gsa = \frac{481.10}{677.60 + 481.10 - 977.20} = 2.65$$

- % Absorción.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

% Absorción= Porcentaje de absorción de la muestra.

A= Masa seca de la muestra (gr).

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500.00 - 481.10}{481.10} * 100 = 3.93 \%$$

- Resultados

Tabla 37. Gravedades específicas y absorción de la arena

<b>Arena</b>				
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Gravedad específica (Gsb)	2.40	2.20	2.32	<b>2.31</b>
Gravedad específica S.S.S (Gsb SSS)	2.50	2.29	2.41	<b>2.40</b>
Gravedad específica aparente (Gsa)	2.65	2.41	2.54	<b>2.53</b>
Absorción en %	3.93	3.93	3.73	<b>3.86</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.7. Peso unitario de los agregados (ASTM C 29M-97)

Este ensayo se realizó para el agregado grueso, intermedio y fino

Donde el procedimiento es el siguiente.

- Determinación del peso suelto y compactado.

En unos recipientes a medida se de 21 cm de diámetro y 28 cm de altura para la grava y la gravilla y de 15 cm de diámetro y 17 cm de altura para la arena.

Se introduce el material de manera suelta hasta el ras para posteriormente pesarlo y luego se introduce compactando en varias capas con un pisón y pesarlo.

Figura 25. Pesado del molde con material



Fuente: Elaboración propia.

- Peso unitario suelto.

$$P. U. S = \frac{P. M. S \text{ (gr)}}{V. \text{molde (cm}^3)}$$

Donde:

P.U.S= Peso unitario suelto (gr/cm<sup>3</sup>).

P.M.S= Masa de muestra suelta (gr).

V.molde= Volumen del molde (cm<sup>3</sup>).

- Resultados

Tabla 38. Peso unitario suelto de los agregados.

<b>Grava</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso Recipiente (gr)</b>	<b>Volumen del recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recipiente + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	5840.00	9883.70	19535.00	13695.00	1.39
2	5840.00	9883.70	19510.00	13670.00	1.38
3	5840.00	9883.70	19530.00	13690.00	1.39
<b>Promedio</b>					<b>1.39</b>
<b>Gravilla</b>					
1	5725.00	9883.70	19495.00	13770.00	1.39
2	5725.00	9883.70	19580.00	13855.00	1.40
3	5725.00	9883.70	19500.00	13775.00	1.39
<b>Promedio</b>					<b>1.40</b>
<b>Arena</b>					
1	2600.00	3004.15	7425.00	4825.00	1.61
2	2600.00	3004.15	7425.00	4825.00	1.61
3	2600.00	3004.15	7430.00	4830.00	1.61
<b>Promedio</b>					<b>1.61</b>

Fuente: Elaboración propia.

- Peso unitario compactado.

$$P. U. C = \frac{P. M. C (gr)}{V. molde (cm3)}$$

Donde:

P.U.C= Peso unitario compactado (gr/cm3).

P.M.C= Masa de la muestra compactada (gr).

V.molde= Volumen del molde (cm3).

Resultados.

Tabla 39. Peso unitario compactado de los agregados

<b>Grava</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso Recipiente (gr)</b>	<b>Volumen del recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recipiente + muestra compactado (gr)</b>	<b>Peso muestra compactado (gr)</b>	<b>Peso unitario compactado (gr/cm3)</b>
1	5840.00	9883.70	20210.00	14370.00	1.45
2	5840.00	9883.70	20185.00	14345.00	1.45
3	5840.00	9883.70	20285.00	14445.00	1.46
<b>Promedio</b>					<b>1.46</b>
<b>Gravilla</b>					
1	5725.00	9883.70	20255.00	14530.00	1.47
2	5725.00	9883.70	20295.00	14570.00	1.47
3	5725.00	9883.70	20300.00	14575.00	1.48
<b>Promedio</b>					<b>1.47</b>
<b>Arena</b>					
1	2600.00	3004.15	7810.00	5210.00	1.73
2	2600.00	3004.15	7810.00	5210.00	1.73
3	2600.00	3004.15	7820.00	5220.00	1.74
<b>Promedio</b>					<b>1.74</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.8. Índice de alargamiento y aplanamiento (ASTM C 143)

Este ensayo se realizó para el agregado grueso (grava), donde el procedimiento es el siguiente.

- Determinar la cantidad mínima de ensayo.

De acuerdo al tamaño máximo nominal podemos determinar el contenido mínimo de muestra para el ensayo.

Tabla 40. Muestra mínima para el ensayo de índice de alargamiento y aplanamiento

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima
mm	Pulgada	Kg
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"	35

Fuente: Norma ASTM C 143.

Para un valor de tamaño máximo de 3/4" tenemos una muestra mínima de 5 kg, donde se tamizará en los tamices 3/4", 1/2", 3/8" y 1/4".

- Índice de alargamiento.

Posterior al tamizado se realiza el ensayo utilizando un calibrador de barras por donde se hará pasar el material y pesar el que pasa y lo que no pasa.

Figura 26. Evaluación del alargamiento del material



Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{m_i}{R_i}$$

Donde:

% Alargamiento= Porcentaje de partículas alargadas de una muestra.

$m_i$ = Masa de las partículas que pasan (gr).

$R_i$ = Masa retenida de la muestra (gr).

Resultados.

Tabla 41. Índice de alargamiento del agregado grueso

Tamiz	Masa retenido en gramos (Ri)	% Retenido	Masa en gramos de partículas que pasan (mi)	Índice de alargamiento % (I al)	Índice de alargamiento global % (IA)
1 1/2" – 1"		0.00			<b>61.78</b>
1" – 3/4"	68.50	1.37	40.25	58.76	
3/4" – 1/2"	2366.00	47.35	1832.50	77.45	
1/2" – 3/8"	1527.00	31.49	823.00	53.90	
3/8" – 1/4"	1038.50	21.40	393.25	37.87	
Total	5000.00		3089.00		

Fuente: Elaboración propia.

- Índice de aplanamiento.

Posterior al tamizado se realiza el ensayo utilizando un calibrador de aplanamiento por donde se hará pasar el material y pesar el que pasa y lo que no pasa.

Figura 27. Evaluación del aplanamiento del material



Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ Aplanamiento} = \frac{mi}{Ri}$$

Donde:

% Aplanamiento=Porcentaje de partículas aplanadas de una muestra.

mi= Masa de las partículas que pasan el calibrador (gr).

Ri= Masa retenida de la muestra (gr).

Resultados.

Tabla 42. Índice de aplanamiento del agregado grueso

Tamiz	Masa retenido en gramos (Ri)	% Retenido	Masa en gramos de partículas que pasan (mi)	Índice de aplanamiento % (I ai)	Índice de aplanamiento global % (IA)
1 1/2" – 1"		0.00			<b>39.80</b>
1" – 3/4"	68.50	1.37	40.25	58.76	
3/4" – 1/2"	2366.00	47.35	1158.75	48.98	
1/2" – 3/8"	1527.00	31.49	594.50	38.93	
3/8" – 1/4"	1038.50	21.40	196.50	18.92	
Total	5000.00		1990.00		

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.9. Resumen y evaluación de la caracterización de los agregados

Los resultados de los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 43. Resumen de caracterización de los agregados.

Ensayo	Normativa	Resultado
Desgaste de los ángeles (500 revoluciones)		
Grava	ASTM C 131-01	24.20 %
Gravilla		26.47 %
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	77.39 %
Porcentaje de caras fracturadas	ASTM D 5821-01	69.54 %
Gravedad específica del agregado grueso		
Grava		
Gravedad específica seco		2.63
Gravedad específica aparente		2.71
Porcentaje de absorción	ASTM C 127-88	1.06
Gravilla		
Gravedad específica seco		2.64
Gravedad específica aparente		2.72
Porcentaje de absorción		1.14
Gravedad específica del agregado fino		
Gravedad específica seco		2.31

Gravedad específica aparente	ASTM C 128-97	2.53
Porcentaje de absorción		3.86
Peso unitario de los agregados		
Grava		
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )		1.39
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )		1.46
Gravilla	ASTM C 29M-97	
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )		1.40
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )		1.47
Arena		
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )		1.66
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )		1.79
Índice de alargamiento y aplanamiento		
Porcentaje de alargamiento	ASTM C 143	61.78
Porcentaje de aplanamiento		39.80

Fuente: Elaboración propia.

Previo a la elaboración se debe comprobar que todos los materiales cumplan con las normas de calidad donde en este caso se utilizara la ABC y la INVIAS.

Tabla 44. Evaluación de la calidad de los agregados

Ensayo	Normativa	Resultado	Especificación
Desgaste de los ángeles (500 rev.)			
Grava	ASTM C 131-01	24.20 %	Max 35%
Gravilla		26.47 %	
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	77.39 %	Min 50%
Porcentaje de caras fracturadas	ASTM D 5821-01	69.54 %	Min 60 %
Relación partículas alargadas y planas 5:1	ASTM C 143	7.76 %	Max 10%

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Caracterización del cemento asfáltico

Se realizó la caracterización del cemento asfáltico PEN 85/100, obtenido de la chancadora de Charajas de procedencia brasileña, para así poder evaluar la calidad del cemento asfáltico según las normativas correspondientes y ver si es apto para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

#### 3.3.1. Ensayo de penetración (ASTM D 5-97)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

- Primero se llenó con asfalto platitos a los cuales se realizó baño maría a 25° C por 30 min.
- Posteriormente se procedió a realizar el ensayo con el equipo de penetración manual donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 45. Penetración del cemento asfáltico

	Penetración 1	Penetración 2	Penetración 3
Primer ensayo	90	95	86
Segundo ensayo	100	95	94
Tercer ensayo	89	96	94

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Medición de la penetración del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2. Peso específico (ASTM D 70-03)

- Se inició llenando los frascos volumétricos con agua destilada para realizarle el baño maría a 25°C para luego pesarlo llamándolo peso A.
- Luego se llenó los frascos con asfalto y se realizó el baño maría a 25°C para pesarlo llamándolo peso B.
- Y por último se llenó los frascos con asfalto y agua destilada para luego realizar el baño maría y pesarlo llamándolo peso C.

Figura 29. Medición del peso específico del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

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

Donde:

G<sub>sb</sub>= Peso específico del cemento asfáltico

A= Masa del frasco volumétrico (gr).

B= Masa del frasco volumétrico con agua (gr).

C= Masa del frasco volumétrico con cemento asfáltico (gr).

D= Masa del frasco volumétrico con cemento asfáltico y agua (gr).

Resultados.

Tabla 46. Peso específico del cemento asfáltico

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Masa del frasco (A)	33.90	33.80	36.70
Masa del frasco + agua (B)	84.40	84.60	88.60
Masa del frasco + cemento ( C )	51.80	51.00	53.80
Masa del frasco + cemento + agua (D)	84.85	84.82	88.90
Peso específico	<b>1.026</b>	<b>1.013</b>	<b>1.018</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3. Punto de ignición y de llama (ASTM D 92-02b)

Esta norma se deberá emplear para medir y describir las propiedades de materiales, productos o sistemas, en respuesta al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas y no se deberá considerar ni emplear para la descripción o para la apreciación de materiales, productos o sistemas, que presenten riesgo de incendio bajo condiciones reales.

- Se inició llenando la copa Cleveland con asfalto y colocarlo en la placa de calentamiento y hacer sujetar un termómetro y medir la temperatura.

- Se hizo pasar un fosforo por la muestra hasta que se observara chispas y las llamas de ignición.

Figura 30. Equipo de punto de ignición y llama y su medición



Fuente: Elaboración propia.

Donde se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 47. Punto de ignición y de llama del cemento asfáltico

	<b>Punto de ignición</b>	<b>Punto de llama</b>
Primer ensayo	240 °C	280 °C
Segundo ensayo	233 °C	278 °C
Tercer ensayo	238 °C	278 °C

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.4. Ensayo de ablandamiento (ASTM D 36-95)

- Se inició llenando con asfalto los anillos para luego enazarlos y someterlos al ensayo
- Se baja la temperatura de del frasco volumétrico a 5 °C y se empieza el ensayo haciendo hervir el frasco con los anillo y las esferas y agua destilada.
- Se tomó lecturas de las temperaturas a las que las esferas caen de los anillos.

Resultados.

Tabla 48. Punto de ablandamiento del cemento asfáltico

	<b>T° C</b>
Primer ensayo	45
Segundo ensayo	47
Tercer ensayo	45

Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Medición del ablandamiento del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.5. Ensayo de ductilidad (ASTM D 113)

- Se inició llenando los moldes de ductilidad con asfalto para posteriormente enrasarlos
- Una vez enrazado se sometió a la ductilidad a una temperatura de 25°C.

Figura 32. Medición de la ductilidad del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados.

Tabla 49. Ductilidad del cemento asfáltico

	<b>Rotura</b>
Primer ensayo	106 cm
Segundo ensayo	107 cm
Tercer ensayo	110 cm

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.6. Ensayo de viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 88)

El ensayo de viscosidad de Saybolt Furol fue realizado para determinar la fluidez del cemento asfáltico a la temperatura de 135°C para su aplicación en las mezclas asfálticas, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Se inició calentando el material para poder pasar el material al equipo donde ya se encuentra calibrado.

- Una vez que se compruebe que se encuentre en la temperatura especificada se procede a hacer pasar el asfalto por un filtro a una probeta determinando el tiempo que tarda en llenar los 60 ml de asfalto.

Figura 33. Ensayo de viscosidad



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50. Viscosidad Saybolt Furol

Muestra	Volumen (ml)	sSF
1	60	132
2	60	142
3	60	139

Referencia: Elaboración propia.

### 3.3.7. Ensayo de película delgada (ASTM D 1754)

El ensayo de película delgada fue realizado para determinar la pérdida de peso por oxidación del asfalto en un horno RTFO, donde el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Se inició calentando la muestra de asfalto para pasarlo a un recipiente metálico plano y luego pesarlo.
- Posteriormente se procedió a introducir en el horno RTFO por 5 horas para posteriormente volver a pesar.

Figura 34. Ensayo de película delgada



Fuente: Elaboración propia.

Donde los resultados son los siguientes:

$$\text{Pérdida de masa} = \text{Peso 1} - \text{Peso 2}$$

Donde:

Pérdida de masa= Pérdida de peso que ha sufrido la muestra de asfalto (gr).

P1= Masa del cemento asfáltico previo al ensayo (gr).

P2= Masa del cemento asfáltico posterior al ensayo (gr).

Tabla 51. Pérdida de masa del cemento asfáltico.

Nº muestra	P1 (gr)	P2 (gr)	Pérdida de masa (gr)	% Perdida
1	180.10	178.57	1.53	0.85
2	186.30	184.98	1.32	0.71
3	191.98	190.31	1.67	0.87

Fuente: Elaboración propia.

Con el residuo del ensayo de película delgada se realizó uno de los ensayos más importantes para el asfalto que está relacionado con el presente trabajo de investigación el cual es el ensayo de penetración donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 52. Penetración del cemento asfáltico oxidado en el horno RTFO

Nº muestra	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
1	30	40	45
2	35	39	30
3	38	38	34

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de la penetración podemos observar claramente como el cemento asfáltico ha sufrido un endurecimiento causado por la oxidación, haciéndolo inapropiado para su uso en las mezclas asfálticas.

### 3.3.8. Evaluación de la caracterización del cemento asfáltico

Tabla 53. Caracterización y evaluación de la calidad del cemento asfáltico según especificaciones técnicas de calidad de Betunel

Ensayo	Unidad	Muestra			Resultado	Especificación	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
<b>Penetración a 25°C (ASTM D 5-97)</b>							
Lectura 1	0.1 mm	90	95	86			
Lectura 2	0.1 mm	100	95	94			
Lectura 3	0.1 mm	89	96	94			
Promedio	0.1 mm	93	95	91	93	85	100
<b>Peso específico a 25°C (ASTM D 70-03)</b>							
Masa de Picnómetro	grs.	33.9	33.8	36.7			
Masa de Picnómetro + Agua	grs.	84.4	84.6	88.6			
Masa de Picnómetro + Muestra	grs.	51.8	51.0	53.8			
Masa de Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	84.9	84.8	88.9			
Peso Especifico	grs/cm <sup>3</sup>	1.03	1.01	1.02	1.02	1	1.05
<b>Punto de ignición y de llama (ASTM D 92-02b)</b>							
Punto de Ignición	° C	240	233	238	237		
Punto de llama	° C	280	278	278	279	232	-
<b>Punto de ablandamiento (ASTM D 36-95)</b>							
Lectura	° C	45	47	45	46	43	53
<b>Viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 88)</b>							
Lectura	sSF	132	149	139	140	85	
<b>Ductilidad a 25°C (ASTM D 113)</b>							
Lectura	cm	106	107	110	108	100	-
<b>Pérdida de masa (ASTM D 1754)</b>							
Lectura	%	0.85	0.71	0.87	0.81	-	1

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Gradación granulométrica (ASTM D3515)

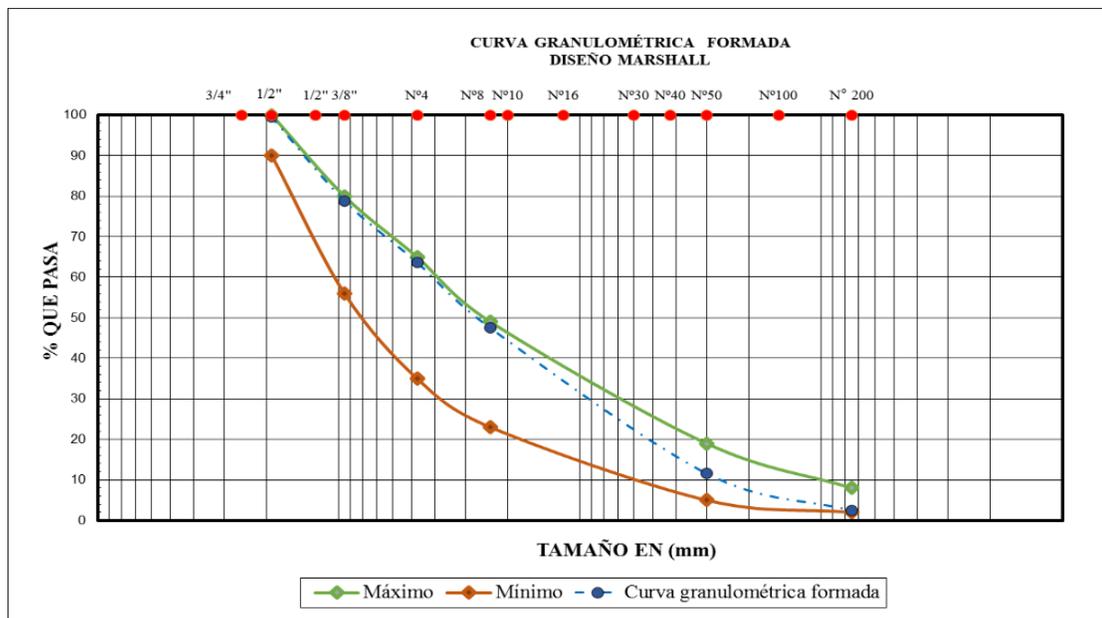
Una vez obtenido las granulometrías de los agregados se procedió a realizar la mezcla de estas para así tener una granulometría que cumpla con los requerimientos para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente según la norma ASTM D3515.

Tabla 54. Graduación granulométrica según ASTM D3515

Tamices		Agregados			Total		Especificaciones	
(Pulgada)	(mm)	Grava 25%	Gravilla 15%	Arena 60%	Peso ret. 100%	% que pasa del total	Min	Max
3/4"	19.00	22.50	0.00	0.00	22.50	99.55	90	100
1/2"	12.50	677.50	2.85	0.00	680.35	85.94	-	-
3/8"	9.50	346.25	7.83	0.00	354.08	78.86	56	80
Nº 4	4.75	202.50	551.25	4.80	758.55	63.69	35	65
Nº 8	2.36	1.25	184.97	623.70	809.92	47.49	23	49
Nº 10	2.00	0.00	3.11	189.30	192.41	43.64	-	-
Nº 16	1.18	0.00	0.00	578.70	578.70	32.07	-	-
Nº 30	0.60	0.00	0.00	590.40	590.40	20.26	-	-
Nº 40	0.43	0.00	0.00	228.30	228.30	15.70	-	-
Nº 50	0.30	0.00	0.00	203.10	203.10	11.63	5	19
Nº 100	0.15	0.00	0.00	246.00	246.00	6.71	-	-
Nº 200	0.075	0.00	0.00	212.10	212.10	2.47	2	8
Base	-	0.00	0.00	123.60	123.60	0.00	-	-
Suma		1250.00	750.00	3000.00	5000.00			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Curva granulométrica de la graduación



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Contenido mínimo de cemento asfáltico

Una vez obtenido la granulometría formada se procedió a determinar el contenido mínimo de cemento asfáltico necesario que requiere la granulometría formada. Para esto se hizo uso de dos procedimientos, los cuales son los siguientes.

- Procedimiento de la distribución granulométrica.
- Procedimiento del área superficial.

#### - Procedimiento de la distribución granulométrica

$$P = 0.020 * a + 0.045 * b + c * d$$

Donde

P= Porcentaje mínimo de cemento asfáltico.

a= Porcentaje de material retenido en la malla N° 10.

b= Porcentaje que pasa malla N°10 y se retiene en malla N°200.

c= Porcentaje que pasa malla N°200.

d= Coeficiente asfáltico.

#### Coeficiente asfáltico

Material pétreo	Coeficiente asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0.15
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0.20
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0.30
Gravas trituradas de alta absorción	0.35

a= 56.36 Porcentaje de material retenido en la malla N° 10.

b= 41.17 Porcentaje que pasa malla N° 10 y retiene en N° 200.

c= 2.47 Porcentaje que pasa la malla N° 200.

d= 0.35 Coeficiente asfáltico.

$$P= 3.85 \%$$

**- Procedimiento del área superficial**

$$P = (0.27 * a + 0.41 * b + 2.05 * c + 15.38 * d + 53.30 * e) * I_a$$

Donde:

P= Porcentaje mínimo de cemento asfáltico.

a= Porcentaje de material que pasa tamiz 1 1/2" y se retiene en 3/4".

b= Porcentaje de material que pasa tamiz 3/4" y se retiene en N°4.

c= Porcentaje de material que pasa tamiz N°4 y se retiene en N°40.

d= Porcentaje de material que pasa tamiz N°40 y se retiene en N°200.

e= Porcentaje de material que pasa tamiz N°200.

Ia= Índice asfáltico.

Índice asfáltico

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0.0055
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0.0070
Gravas trituradas de alta absorción	0.0080

- a= 0.450                      Material que pasa 1 1/2" y retiene en 3/4".
- b= 35.860                     Material que pasa 3/4" y retiene en N° 4.
- c= 48.000                     Material que pasa N° 4 y retiene en N° 40.
- d= 13.224                     Material que pasa N° 40 y retiene en N° 200.
- e= 2.472                        Material que pasa N° 200
- Ia= 0.008                      Índice asfáltico

P= 3.59 %

Teniendo como un contenido mínimo inicial para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de 3.85%, adoptando para fines prácticos  $C_{min}=3.90\%$ .

### 3.6. Contenido óptimo de cemento asfáltico método Marshall

#### 3.6.1. Determinación de la cantidad de material

Uno de los primeros pasos para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico es determinar la cantidad de material que será necesario para la elaboración de las briquetas para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico.

Los porcentajes de cemento asfáltico para la elaboración de las briquetas serán los siguientes:

C. min - 1%	→ 2.90%
<b>C. min</b>	→ <b>3.90%</b>
C. min + 0.5%	→ 4.40%
C. min + 1%	→ 4.90%
C. min + 1.5%	→ 5.40%
C. min + 2%	→ 5.90%

Para cada porcentaje de cemento asfáltico se procedió determinar la cantidad en peso tanto de cemento asfáltico como de los agregados.

Partiendo del dato inicial del peso de la biqueta de 1200 gr, podemos calcular las respectivas cantidades.

Procedimiento de cálculo para el porcentaje de cemento asfáltico de 2.9%.

Porcentaje de los materiales.

Grava=	25%
Gravilla=	15%
Arena=	60%
Cemento asfáltico=	2.90%

Peso de la biqueta=	1200 gr	% Agregados=	97.10 %
---------------------	---------	--------------	---------

Si	1200 gr	→ 100%	Si	1200 gr	→ 100%
	P.cemento	→ 2.90%		P.agregados	→ 97.10%

P.aemento= 34.80 gr

P.agregados= 1165.20 gr

Si 1165 gr → 100%  
P.grava → 25.00%

Si 1165 gr → 100%  
P.gravilla → 15.00%

P.grava= 291.30 gr

P.gravilla= 174.80 gr

Si 1165 gr → 100%  
P.arena → 60.0%

P.arena= 699.12 gr

Resumen

Material	Peso (gr)
Grava	291.30 gr
Gravilla	174.80 gr
Arena	699.12 gr
C.asfáltico	34.80 gr

Tabla 55. Cantidad de material para las briquetas

	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico					
	2.90%	3.90%	4.40%	4.90%	5.40%	5.90%
Porcentaje de agregados (%)	97.10%	96.10%	95.60%	95.10%	94.60%	94.10%
Masa del cemento asfáltico (gr)	34.80	46.80	52.80	58.80	64.80	70.80
Masa de la grava (gr)	291.30	288.30	286.80	285.30	283.80	282.30
Masa de la gravilla (gr)	174.80	172.98	172.08	171.18	170.28	169.38
Masa de la arena (gr)	699.12	691.92	688.32	684.72	681.12	677.52
Masa total de la biqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2. Metodología Marshall

Una vez realizado las briquetas se procedió a determinar todos los parámetros necesarios para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico mediante Marshall.

Basándose en el manual de laboratorio ensayos para pavimentos de la universidad nacional de ingeniería de Lima, Perú.

Siguiendo con el procedimiento se obtuvieron los siguientes parámetros presentadas en la siguiente tabla.

Tabla 56. Datos iniciales para Marshall

Nº espécimen	% C.A	Altura (cm)	Masa seca (gr)	Masa SSS (gr)	Masa sumergida (gr)	Lectura dial	Flujo (pulg)
1	2.9	6.3	1167.4	1168.8	636.0	741.0	8.0
2		6.3	1167.9	1168.2	633.0	772.0	7.0
3		6.3	1168.2	1169.0	649.0	685.0	7.0
1	3.9	6.3	1168.0	1169.5	647.0	838.0	8.0
2		6.3	1161.1	1162.6	649.0	836.0	7.0
3		6.3	1154.5	1157.5	633.0	832.0	8.0
1	4.4	6.3	1173.0	1175.5	652.0	942.0	8.0
2		6.3	1168.7	1173.0	649.0	965.0	8.0
3		6.3	1167.6	1171.3	650.0	952.0	10.0
1	4.9	6.3	1168.7	1170.2	648.0	1062.0	10.0
2		6.3	1178.3	1179.6	648.0	1070.0	11.0
3		6.3	1173.4	1174.2	656.0	1065.0	10.0
1	5.4	6.3	1160.9	1163.0	646.0	1084.0	12.0
2		6.3	1176.0	1178.7	655.0	1078.0	11.0
3		6.2	1173.4	1176.4	651.0	1089.0	13.0
1	5.9	6.2	1171.0	1175.3	651.0	937.0	15.0
2		6.3	1155.3	1156.9	637.0	949.0	16.0
3		6.3	1178.3	1179.9	652.0	945.0	16.0

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se procedió a determinar el porcentaje de cemento asfáltico óptimo, se utilizó como guía de cálculo el manual de ensayos para pavimentos.

Donde el procedimiento de cálculo es el siguiente:

Se desarrollará el procedimiento de cálculo para el espécimen 1 de 2.9% de cemento asfáltico.

**Datos iniciales.**

**Porcentaje de los agregados.**

Grava =25%

Gravilla =15%

Arena =60%

**Gravedad específica bulk de los materiales.**

Gravedad específica bulk de la grava =2.63 gr/cm<sup>3</sup>

Gravedad específica bulk de la gravilla =2.64 g/cm<sup>3</sup>

Gravedad específica bulk de la arena =2.31 g/cm<sup>3</sup>

Gravedad específica bulk del cemento asfáltico =1.019 g/cm<sup>3</sup>

**Gravedad específica aparente de los agregados.**

Gravedad específica aparente de la grava =2.71 g/cm<sup>3</sup>

Gravedad específica aparente de la gravilla =2.72 g/cm<sup>3</sup>

Gravedad específica aparente de la arena =2.53 g/cm<sup>3</sup>

**- Determinación de la gravedad específica bulk y aparente combinada de los agregados.**

Gravedad específica bulk combinada de los agregados.

$$G_{sbc} = \frac{\%Grava + \%Gravilla + \%Arena}{\frac{\%Grava}{G_{sb\ grava}} + \frac{\%Gravilla}{G_{sb\ gravilla}} + \frac{\%Arena}{G_{sb\ arena}}}$$

Donde:

G<sub>sbc</sub>= Gravedad específica bulk combinada de los agregados.

%Grava= Porcentaje de grava que se utilizara en la elaboración de la briqueta.

%Gravilla= Porcentaje de gravilla que se utilizará en la elaboración de la briqueta.

% Arena= Porcentaje de arena que se utilizara en la elaboración de la briqueta.

Gsb grava= Gravedad específica bulk de la grava.

Gsb gravilla= Gravedad específica bulk de la gravilla.

Gsb arena= Gravedad específica bulk de la arena.

$$G_{sbc} = \frac{25 + 15 + 60}{\frac{25}{2.63} + \frac{15}{2.64} + \frac{60}{2.31}} = 2.43 \text{ g/cm}^3$$

Gravedad específica aparente combinada de los agregados.

$$G_{sac} = \frac{\%Grava + \%Gravilla + \%Arena}{\frac{\%Grava}{G_{sa \text{ grava}}} + \frac{\%Gravilla}{G_{sa \text{ gravilla}}} + \frac{\%Arena}{G_{sa \text{ arena}}}}$$

Donde:

G<sub>sac</sub>= Gravedad específica aparente combinada de los agregados.

% Grava= Porcentaje de grava que se utilizará en la elaboración de la briqueta.

% Gravilla= Porcentaje de gravilla que se utilizará en la elaboración de la briqueta.

% Arena= Porcentaje de arena que se utilizará en la elaboración de la briqueta.

G<sub>sa grava</sub>= Gravedad específica aparente de la grava.

G<sub>sa gravilla</sub>= Gravedad específica aparente de la gravilla.

G<sub>sa arena</sub>= Gravedad específica aparente de la arena.

$$G_{sac} = \frac{25 + 15 + 60}{\frac{25}{2.71} + \frac{15}{2.72} + \frac{60}{2.53}} = 2.60 \text{ g/cm}^3$$

**- Determinación de la gravedad específica bulk del espécimen.**

$$G_{mb} = \frac{W \text{ seco (gr)}}{W \text{ SSS (gr)} - W_{\text{sumergido}}(\text{gr})}$$

Donde:

Gmb= Gravedad específica bulk de la briqueta.

W seco= Masa seca de la briqueta (gr).

W SSS= Masa saturada superficialmente seca de la briqueta (gr).

W sumergido= Masa sumergida de la briqueta (gr).

Para el espécimen 1 de 2.9% de C.A.

W seco=1167.40 gr

W SSS=1168.80 gr

W sumergido=636 gr

$$Gmb = \frac{1167.40}{1168.80 - 636} = 2.19$$

#### - Determinación de la gravedad específica máxima teórica (Gmm)

La determinación de la gravedad específica máxima teórica se la puede obtener de diferentes maneras ya sea por el ensayo de gravedad específica máxima teórica rice o haciendo uso de fórmulas. Siendo determinado para el presente trabajo por medio de fórmulas. Describiendo a continuación el procedimiento de cálculo.

$$Gmm = \frac{\%Grava + \%Gravilla + \%Arena}{\frac{\%C. A}{G. asfalto} + \frac{\%Grava. Mezcla}{G. prom grava} + \frac{\%Gravilla. Mezcla}{G. prom gravilla} + \frac{\%Arena. Mezcla}{G. prom arena}}$$

Donde:

Gmm= Gravedad específica máxima teórica.

%Grava= Porcentaje de grava que se utilizara en la elaboración de la briqueta sin tomar en cuenta el cemento asfáltico.

%Gravilla= Porcentaje de gravilla que se utilizara en la elaboración de la briqueta sin tomar en cuenta el cemento asfáltico.

% Arena= Porcentaje de arena que se utilizara en la elaboraci3n de la briqueta sin tomar en cuenta el cemento asfáltico.

% Grava. Mezcla= Porcentaje de grava que se utilizara en la elaboraci3n de la briqueta tomando en cuenta el cemento asfáltico.

% Gravilla. Mezcla= Porcentaje de gravilla que se utilizara en la elaboraci3n de la briqueta tomando en cuenta el cemento asfáltico.

% Arena. Mezcla= Porcentaje de arena que se utilizara en la elaboraci3n de la briqueta tomando en cuenta el cemento asfáltico.

% C.A= Porcentaje de cemento asfáltico.

G.asfalto= Peso específcico del cemento asfáltico.

G.prom grava= Gravedad promedio de la grava.

G.prom gravilla= Gravedad promedio de la gravilla.

G.prom arena= Gravedad promedio de la arena.

% C.A=2.9%

Peso específcico=1.019 gr/cm<sup>3</sup>

% Agregados=100-% C.A=100-2.90=97.10%

% Grava. mezcla=25%\*97.10/100%=24.28%

% Gravilla mezcla=15%\*97.10/100%=14.57%

% Arena mezcla=60%\*97.10/100%=58.26%

$$G_{prom} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2}$$

Donde:

G<sub>prom</sub>= Gravedad específcica promedio.

G<sub>sb</sub>= Gravedad específcica bulk.

Gsa= Gravedad específica aparente.

$$G.\text{prom grava}=(2.63+2.71)/2=2.67$$

$$G.\text{prom gravilla}=(2.64+2.72)/2=2.68$$

$$G.\text{prom arena}=(2.31+2.53)/2=2.42$$

$$G_{mm} = \frac{25\% + 15\% + 60\%}{\frac{2.90\%}{1.019} + \frac{24.275\%}{2.67} + \frac{14.565\%}{2.68} + \frac{58.26\%}{2.42}} = 2.41$$

**- Determinación del porcentaje de vacíos total en la mezcla (VTM).**

$$VTM = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100$$

Donde:

VTM= Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

Gmb= Gravedad específica bulk de la briqueta.

Gmm= Gravedad específica máxima teórica.

$$VTM = \left(1 - \frac{2.19}{2.41}\right) * 100 = 9.16\%$$

**- Determinación de la densidad del espécimen.**

$$\gamma = G_{mb} * \gamma_w$$

Donde:

Gmb= Gravedad específica bulk de la briqueta.

$\gamma_w$ = Densidad del agua (gr/cm<sup>3</sup>).

$$\gamma_w \text{ agua} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma = 2.19 * 1 = 2.19 \text{ gr/cm}^3$$

**- Determinación de vacíos en el agregado mineral (VMA).**

$$\text{VMA} = \left( 1 - \frac{\text{Gmb} * (1 - \text{Pb})}{\text{Gsb}} \right) * 100$$

Donde:

VMA= Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Gmb= Gravedad específica bulk de la briqueta.

Pb= Porcentaje de cemento asfáltico.

Gsb= Gravedad específica bulk combinada de los agregados.

Pb=%C.A=2.9%

$$\text{VMA} = \left( 1 - \frac{2.19 * (1 - 2.90\%)}{2.43} \right) * 100 = 12.35\%$$

**- Determinación del porcentaje de vacíos llenos de asfalto.**

$$\text{VFA} = \left( \frac{\text{VMA} - \text{VTM}}{\text{VMA}} \right) * 100$$

Donde:

VFA= Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

VMA= Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

VTM= Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

$$\text{VFA} = \left( \frac{12.35\% - 9.16\%}{12.35\%} \right) * 100 = 25.80\%$$

**- Determinación de la estabilidad.**

Los valores de las estabilidades de Marshall son obtenidas mediante la ecuación del anillo calibrado del equipo Marshall que están en función a los valores leído en el dial del anillo.

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * \text{Lectura dial} - 0.0812) * 220$$

Donde:

Estabilidad= Valores de estabilidad sin corregir (lb).

Lectura dial= Lecturas del aparato Marshall.

Estabilidad para el espécimen 1 de % C.A de 2.9%.

Lectura dial=438

$$\text{Estabilidad sin corregir} = (0.012 * 438 - 0.0812) * 220 = 1138.50 \text{ Lb}$$

#### **- Correccion de la estabilidad**

La estabilidad leída debe ser corregida dependiendo de la altura de la briqueta ya que el ensayo Marshall, está definido para una altura de briqueta de 6.35 cm (2.5") y dependiendo de la variación de la altura debe ser corregida.

$$\text{Estabilidad. C} = \text{Estabilidad. S. C} * \text{FC}$$

Donde:

Estabilidad. C= Estabilidad corregida (lb).

Estabilidad S.C= Estabilidad sin corregir (lb).

FC= Factor de corrección.

Tabla 57. Factores de corrección de la estabilidad

Volumen de muestra (cm <sup>3</sup> )	Altura de muestra (cm)	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56
214-225	2.70	5.00
226-237	2.86	4.55
238-250	3.02	4.17
251-264	3.18	3.85
265-276	3.34	3.57
277-289	3.49	3.33
290-301	3.65	3.03
302-316	3.81	2.78
317-328	3.97	2.50
329-340	4.13	2.27
341-353	4.29	2.08
354-367	4.45	1.92
368-379	4.61	1.79
380-392	4.76	1.67
393-405	4.92	1.56
406-420	5.08	1.47
421-431	5.24	1.39
432-443	5.40	1.32
444-456	5.56	1.25
457-470	5.72	1.19
471-482	5.87	1.14
483-495	6.03	1.09
496-508	6.19	1.04
509-522	6.35	1.00
523-535	6.51	0.96
536-546	6.67	0.93
547-559	6.83	0.89
560-573	6.99	0.86
574-585	7.14	0.83
586-598	7.30	0.81
599-610	7.46	0.78
611-625	7.62	0.76

Fuente: Manual de ensayos de pavimentos, Ing. Silene Minaya Gonzales y Ing. Abel Ordoñez Huaman.

Corrección de la estabilidad del primer espécimen para un % de cemento asfáltico de 2.9%.

Estabilidad sin corregir=1138.50 Lb

Factor de corrección=1.01

$$\text{Estabilidad corregida} = 1138.50 * 1.01 = 1149.80 \text{ Lb}$$

### - Criterios para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Existen varios criterios para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y que en algunos casos son requeridos para el diseño según varias normativas. Para la elaboración del presente trabajo se tomó los criterios del instituto del asfalto (U.S.A).

Tabla 58. Criterios adoptados para la determinación del porcentaje óptimo de C.A

Descripción	Criterio
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	75
Estabilidad (Lb)	1800
Flujo (0.01 pulgadas)	11
Porcentaje de vacíos total (VTM)	4%
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70%
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	12.5%
Densidad máxima	-

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

Figura 36. Elaboración y rotura de briquetas



Fuente: Elaboración propia.

### - Resultados Marshall

Los resultados del ensayo Marshall se muestra a continuación en la tabla 60. Siendo estos los valores promedios, para ver la planilla ver Anexo 13.

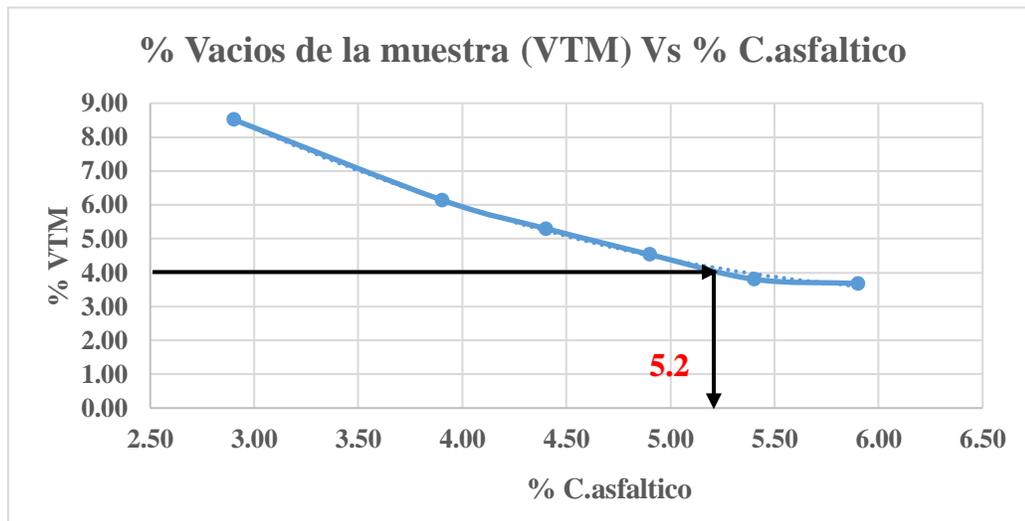
Tabla 59. Resultados Marshall

Descripción	Porcentajes de cemento asfáltico					
	2.90%	3.90%	4.40%	4.90%	5.40%	5.90%
Estabilidad (Lb)	1118.10	1387.86	1690.33	1988.69	1988.42	1657.52
Flujo (0.01 Pulgadas)	7.33	7.67	8.67	10.33	12.00	15.67
Densidad (gr/cm3)	2.21	2.23	2.24	2.24	2.24	2.23
Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica (VTM)	8.52	6.15	5.30	4.54	3.80	3.68
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	11.73	11.61	11.89	11.94	12.64	13.12
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	27.65	47.43	55.42	62.31	69.93	71.97

Fuente: Elaboración propia.

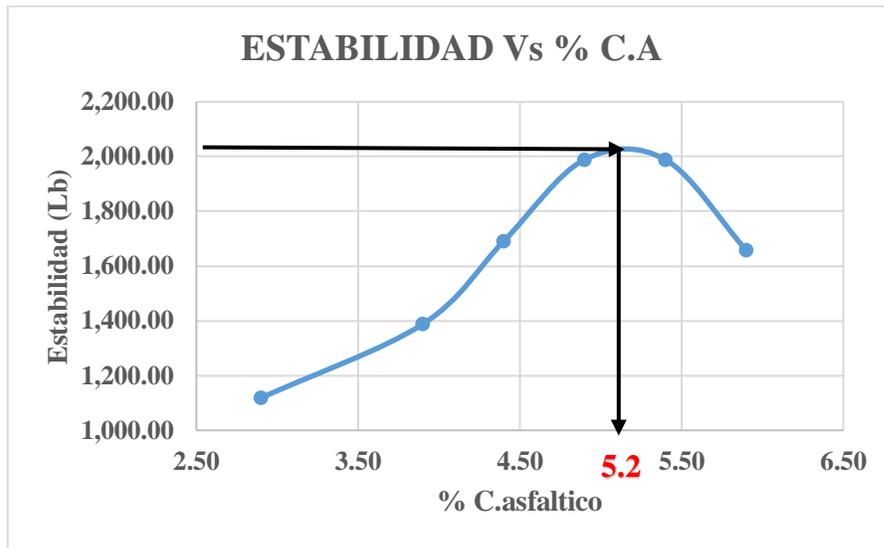
- Gráficas Marshall

Figura 37. Porcentaje de vacíos en la muestra asfáltica vs Porcentaje de cemento asfáltico



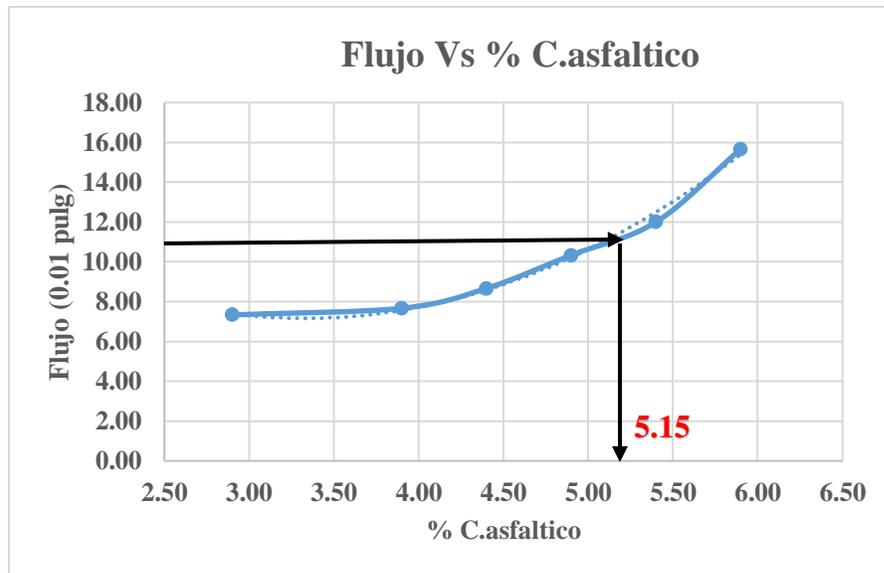
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Estabilidad vs Porcentaje de cemento asfáltico



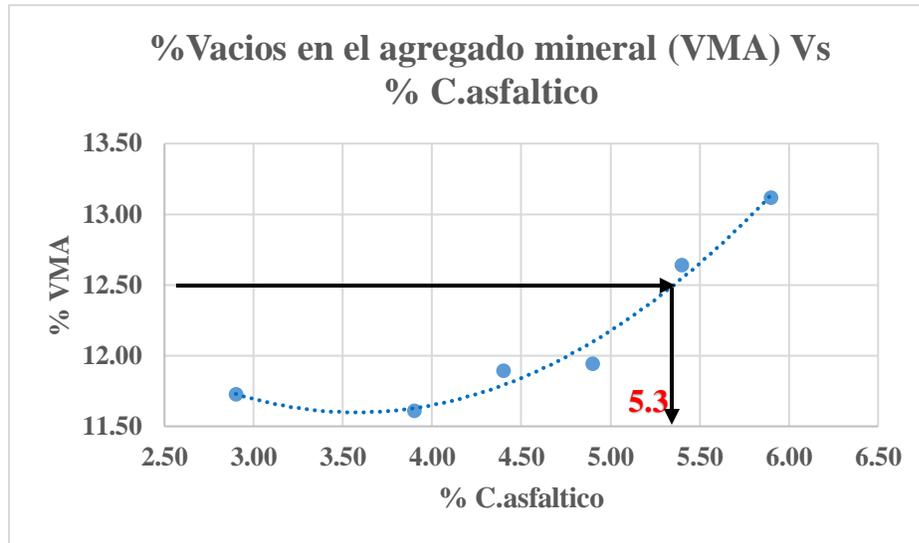
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Flujo vs Porcentaje de cemento asfáltico



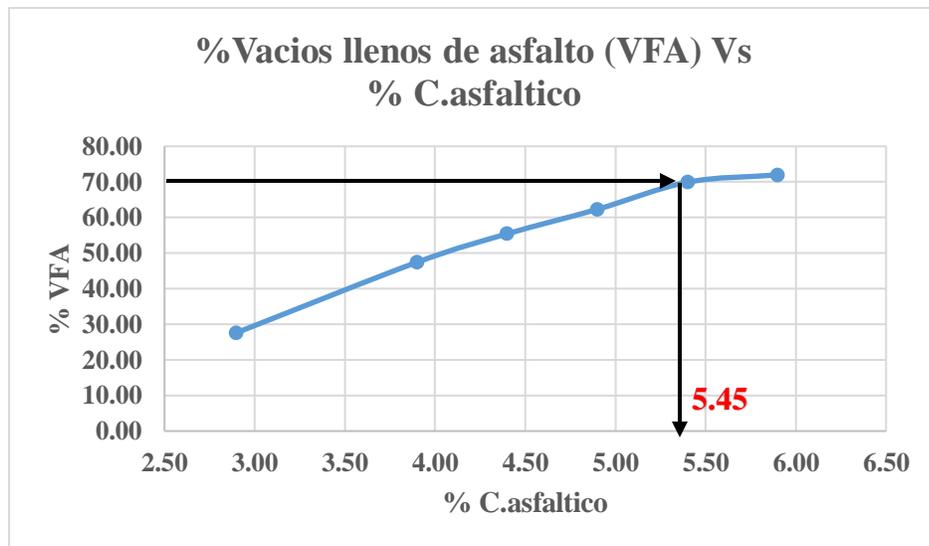
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral vs Porcentaje de cemento asfáltico



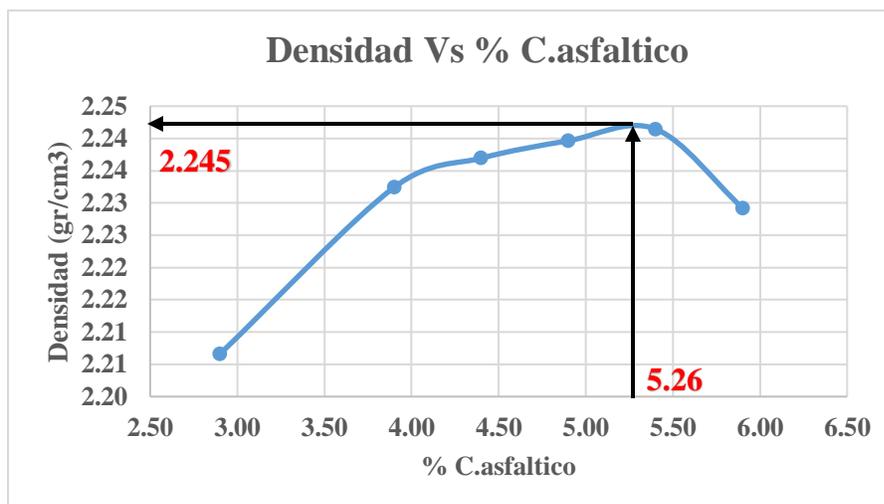
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto vs Porcentaje de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Densidad de la muestra vs Porcentaje de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el contenido óptimo de cemento asfáltico se procedió a elaborar las briquetas con las que se estudiara la fragilidad y la rigidez.

Teniendo un porcentaje de cemento asfáltico óptimo de asfalto de 5.26% el material necesario para la realización de las briquetas de estudio es el siguiente.

El cual fue determinado de igual manera que lo explicado anteriormente.

Tabla 60. Material requerido para la elaboración de las briquetas

Material	% Material	Masa (gr)
<b>Cemento asfáltico</b>	5.26	63.12
<b>Grava</b>	25.00	284.22
<b>Gravilla</b>	15.00	170.53
<b>Arena</b>	60.00	682.13
<b>Peso total de la briketa</b>		<b>1200.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7. Oxidación de las briquetas

Para la realización del envejecimiento del asfalto se pretende hacer uso de briquetas donde a dichas briquetas se las afectara con calor a tres diferentes temperaturas mediante un horno, para así poder evaluar cómo es que la fragilidad y rigidez reaccionan ante la oxidación del asfalto en las briquetas.

Donde una vez envejecidas los especímenes se procederá a la rotura para tener lecturas de la estabilidad y el flujo de Marshall, relacionando la estabilidad con la rigidez y la fragilidad con el flujo de Marshall.

Para la realización de la investigación se hizo uso de 45 briquetas en total donde se envejeció a 50,60 y 70 grados centígrados..

Los resultados de la oxidación de las briquetas son las siguientes.

Tabla 61. Resultados de la oxidación de las briquetas

<b>Envejecimiento a 50° C</b>						
<b>N° espécimen</b>	<b>Lectura dial</b>	<b>Estabilidad sin corregir (Lb)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Factor de corrección</b>	<b>Estabilidad corregida (Lb)</b>	<b>Flujo (0.01 pulg)</b>
1	837.00	2191.82	6.13	1.06	2323.32	14.00
2	735.00	1922.54	6.10	1.07	2057.11	17.00
3	719.00	1880.30	6.28	1.02	1917.90	15.00
4	773.00	2022.86	6.09	1.07	2164.46	16.00
5	944.00	2474.30	6.16	1.05	2598.01	15.00
6	756.00	1977.98	6.10	1.07	2116.43	15.00
7	837.00	2191.82	6.13	1.06	2323.32	15.00
8	777.00	2033.42	6.18	1.04	2114.75	16.00
9	953.00	2498.06	6.10	1.07	2672.92	16.00
10	668.00	1745.66	6.08	1.07	1867.85	15.00
11	779.00	2038.70	6.01	1.10	2242.57	16.00
12	581.00	1515.98	5.93	1.12	1697.89	15.00
13	724.00	1893.50	6.30	1.01	1912.43	15.00
14	722.00	1888.22	6.05	1.08	2039.27	16.00
15	772.00	2020.22	6.26	1.02	2060.62	15.00
<b>Envejecimiento a 60° C</b>						
1	877.00	2297.42	6.15	1.05	2412.29	20.00
2	753.00	1970.06	6.05	1.08	2127.66	19.00
3	854.00	2236.70	6.05	1.08	2415.63	20.00

4	799.00	2091.50	6.15	1.05	2196.07	18.00
5	890.00	2331.74	6.23	1.03	2401.69	20.00
6	784.00	2051.90	6.13	1.06	2175.01	20.00
7	738.00	1930.46	6.13	1.06	2046.28	19.00
8	791.00	2070.38	6.24	1.03	2132.49	20.00
9	816.00	2136.38	6.18	1.04	2221.83	20.00
10	908.00	2379.26	6.20	1.04	2474.43	20.00
11	700.00	1830.14	6.10	1.07	1958.25	21.00
12	873.00	2286.86	6.14	1.06	2424.07	22.00
13	941.00	2466.38	6.26	1.02	2515.70	20.00
14	816.00	2136.38	6.2	1.04	2221.83	22.00
15	781.00	2043.98	6.18	1.04	2125.74	19.00
<b>Envejecimiento a 70° C</b>						
1	988.00	2590.46	6.15	1.05	2719.98	22.00
2	962.00	2521.82	6.13	1.06	2673.12	23.00
3	927.00	2429.42	6.23	1.03	2502.30	23.00
4	1031.00	2703.98	6.18	1.04	2812.14	22.00
5	1042.00	2733.02	6.26	1.02	2787.68	25.00
6	990.00	2595.74	6.29	1.01	2621.69	22.00
7	962.00	2521.82	6.3	1.01	2547.03	24.00
8	1051.00	2756.78	6.13	1.06	2922.18	24.00
9	873.00	2286.86	6.14	1.06	2424.07	20.00
10	906.00	2373.98	6.01	1.10	2611.37	20.00
11	1001.00	2624.78	6.2	1.04	2729.77	22.00
12	1031.00	2703.98	6.24	1.03	2785.10	23.00
13	981.00	2571.98	6.16	1.05	2700.57	23.00
14	949.00	2487.50	6.19	1.04	2587.00	22.00
15	1009.00	2645.90	6.23	1.03	2725.27	24.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8. Estadística de los resultados de los especímenes oxidados

La estadística es una de las partes más importantes en el desarrollo de un trabajo de investigación ya que esta nos proporciona valores representativos de un conjunto de datos y nos permite observar las variaciones de los resultados obtenidos de la investigación.

En el presente trabajo de investigación se hizo un tratamiento de estadística descriptiva de los resultados, tomando en cuenta que todos los especímenes presentan las mismas características de estudio, es decir que todos los especímenes fueron elaborados del mismo material y fueron alterados a la misma temperatura.

### **3.8.1. Estadística descriptiva de los resultados**

Tomando en cuenta que los grupos de datos obtenidos se las analizaron en las mismas condiciones se decidió trabajar con la estadística descriptiva.

El procedimiento es el siguiente:

#### **Medidas de tendencia extrema**

- Valor mínimo.- Es el menor valor de una serie de datos.

- Valor mayor.- Es el mayor valor de una serie de datos.

#### **Medidas de tendencia central**

- Media.- Es una medida de tendencia central, que resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números y que en determinadas condiciones puede representar por si solo a una serie de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

Donde:

$\bar{X}$  = Valor medio de una serie de datos.

$X_i$  = Valores de una serie de datos.

$N$  = Cantidad de valores de una serie de datos.

- Mediana.- es aquella que representa el valor de la variable de posición central en una serie de datos ordenados.

#### **Medidas de dispersión**

- Amplitud.- Es el rango en el cual se encuentran la serie de datos, siendo la diferencia entre el mayor y el menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = \text{Mayor. V} - \text{Menor. V}$$

Donde:

Mayor.V = Mayor valor de una serie de datos.

Menor.V= Menor valor de una serie de datos.

- Desviación estándar o típica.- es una medida que ofrece información sobre la dispersión media de una variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde:

$\sigma$ = Desviación estándar.

$X_i$ = Valores de una serie de datos.

$\bar{X}$ = Valor medio de una serie de datos.

N= Cantidad de valores de una serie de datos.

Tabla 62. Estadística de los datos de oxidación

Medida	Temperatura 50°C		Temperatura 60°C		Temperatura 70°C	
	Estabilidad (Lb)	Flujo (0.01 pulg)	Estabilidad (Lb)	Flujo (0.01 pulg)	Estabilidad (Lb)	Flujo (0.01 pulg)
<b>Medidas de tendencia extrema</b>						
<b>Valor mínimo</b>	1697.89	15.00	1950.25	18.00	2424.07	20.00
<b>Valor mayor</b>	2672.92	17.00	2534.43	22.00	2922.18	25.00
<b>Medidas de tendencia central</b>						
<b>Media</b>	2140.59	15.80	2272.23	20.00	2676.62	22.60
<b>Mediana</b>	2114.75	16.00	2221.83	20.00	2700.57	23.00
<b>Medidas de dispersión</b>						
<b>Amplitud</b>	975.03	2.00	584.18	4.00	498.12	5.00
<b>Desviación estándar</b>	262.85	0.86	191.52	1.07	130.03	1.40

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado la estadística descriptiva necesaria que se tomó en cuenta para tratar el conjunto de datos siguiendo varias referencias bibliográficas. Se procedió a realizar un

análisis de la estadística realizada para así tener los valores más representativos del conjunto de datos.

### **Análisis estadístico de los resultados**

Se empezó analizando las medidas extremas y la amplitud para y viendo la variación de las medidas de tendencia central para poder entender cómo se encuentran los datos y tomar una decisión de como analizarlos para obtener los valores más representativos.

Siendo las medidas de tendencia central los valores que son más representativos para un conjunto de datos que en nuestro caso tiene una cierta variación debido a que existen valores extremos se procedió a realizar un análisis de frecuencia en la cual se observara cuál de las medidas de tendencia central es las más representativa y la con mayor probabilidad de que se obtenga en las comprobaciones.

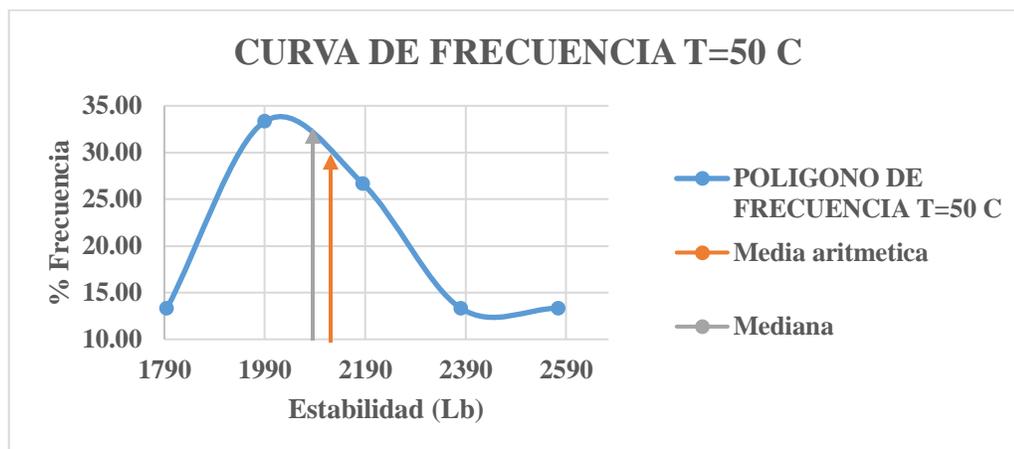
### **Análisis de frecuencia de la estabilidad**

Tabla 63. Frecuencia de la estabilidad oxidada a 50°C

<b>Intervalo</b>		<b>Marca de clase</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>% Frecuencia</b>
<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>			
1697.89	1892.90	1795.40	2.00	13.33
1892.90	2087.91	1990.41	5.00	33.33
2087.91	2282.92	2185.42	4.00	26.67
2282.92	2477.93	2380.43	2.00	13.33
2477.93	2672.94	2575.44	2.00	13.33
		<b>Total</b>	15.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 43. Curva de frecuencia de la estabilidad oxidada a 50°C



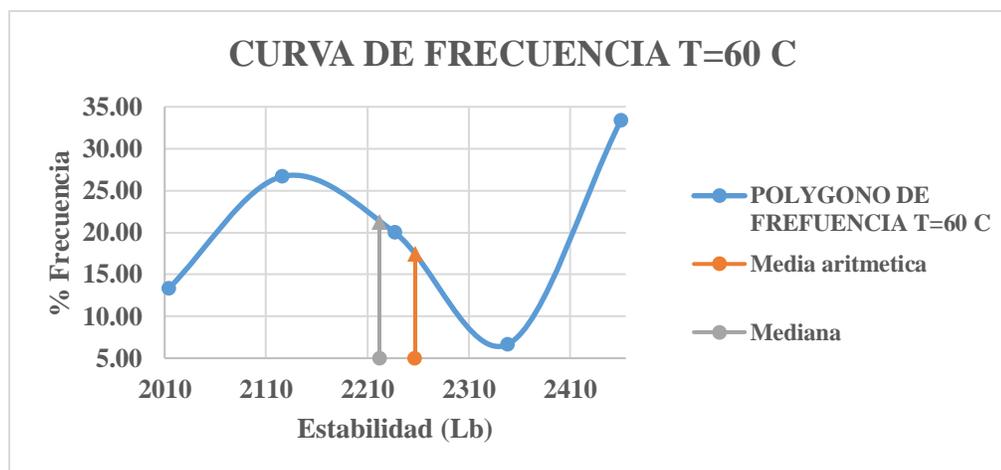
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64. Frecuencia de la estabilidad oxidada a 60°C

Intervalo		Marca de clase	Frecuencia	% Frecuencia
Inferior	Superior			
1958.25	2069.75	2014.00	2.00	13.33
2069.75	2181.25	2125.50	4.00	26.67
2181.25	2292.75	2237.00	3.00	20.00
2292.75	2404.25	2348.50	1.00	6.67
2404.25	2515.75	2460.00	5.00	33.33
<b>Total</b>			<b>15.00</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Curva de frecuencia de la estabilidad oxidada a 60°C



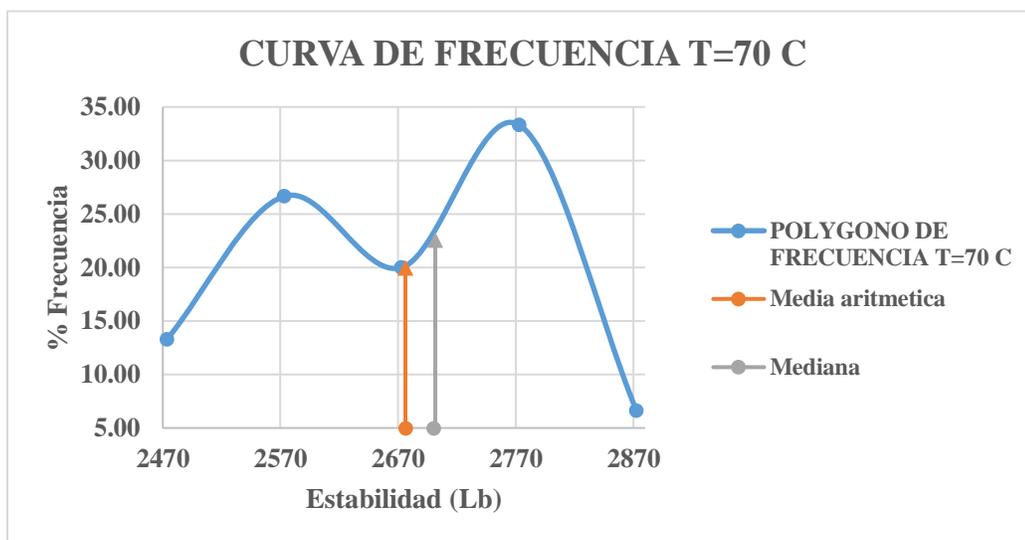
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65. Frecuencia de la estabilidad oxidada a 70°C

Intervalo		Marca de clase	Frecuencia	% Frecuencia
Inferior	Superior			
2424.07	2523.70	2473.88	2.00	13.33
2523.70	2623.33	2573.51	4.00	26.67
2623.33	2722.96	2673.14	3.00	20.00
2722.96	2822.59	2772.77	5.00	33.33
2822.59	2922.22	2872.40	1.00	6.67
<b>Total</b>			15.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Curva de frecuencia de la estabilidad oxidada a 70°C



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la curva de frecuencia de la estabilidad oxidada 50, 60 y 70 °C, en todos los casos la mediana es la medida central que tiene una mayor frecuencia y por lo tanto sería la más representativa de las medidas centrales, por lo cual será el valor con el que se trabajará y se procederá a realizar una depuración de datos para así tener valores más representativos y confiables.

En el caso del flujo la media con la mediana tiene poca dispersión por lo que en ese caso se trabajara con la media ya que no tiene valores extremos muy notables ni tiene una amplitud excesiva.

## Depuración de datos

Se realizara una depuración de datos con la finalidad de eliminar aquellos datos que se alejan de la tendencia del grupo de datos, el procedimiento que se realizo es el siguiente:

### - Depuración de datos de la estabilidad

Una vez realizado el análisis con el cual se pretenderá evaluar la medida de tendencia central más representativa se procedió a depurar datos tomando en cuenta la medida central definida anteriormente. El criterio con el cual se realizara será el siguiente:

$$\text{Rango superior} = \text{mediana} + \text{desviacion estandar}$$

$$\text{Rango inferior} = \text{mediana} - \text{desviacion estandar}$$

Todos los valores que se encuentren fuera de los rangos serán eliminados y se trabajara solo con los datos que se encuentren dentro del rango.

### - Depuración de datos del flujo

Para el caso del flujo al tener valores con menor dispersión se trabajara con la media siendo sus rangos los siguientes:

$$\text{Rango superior} = \text{media aritmetica} + \text{desviacion estandar}$$

$$\text{Rango inferior} = \text{media aritmetica} - \text{desviacion estanda}$$

Tabla 66. Rangos de depuración de datos

Temperatura (° C)	Estabilidad (Lb)		Flujo (0.01 pulg)	
	Rango superior	Rango inferior	Rango superior	Rango inferior
50	2377.60	1851.90	16.69	14.77
60	2413.35	2030.31	21.07	18.93
70	2830.60	2570.55	24.00	21.20

Fuente: Elaboración propia.

Con los rangos determinados se procedió a depurar los datos de estabilidad y flujo para así tener valores más representativos.

Tabla 67. Depuración de datos y resultados finales estadísticos

N°	Temperatura 50° C		Temperatura 60° C		Temperatura 70° C	
	Estabilidad corregida (Lb)	Flujo (0.01 pulg)	Estabilidad corregida (Lb)	Flujo (0.01 pulg)	Estabilidad corregida (Lb)	Flujo (0.01 pulg)
1	2323.32	14.00	2412.29	20.00	2719.98	22.00
2	2057.11	17.00	2127.66	19.00	2673.12	23.00
3	1917.90	15.00	2465.63	20.00	2502.30	23.00
4	2164.46	16.00	2196.07	18.00	2812.14	22.00
5	2598.01	17.00	2524.25	20.00	2787.68	25.00
6	2116.43	15.00	2175.01	20.00	2621.69	22.00
7	2323.32	15.00	2046.28	19.00	2547.03	24.00
8	2114.75	17.00	2132.49	20.00	2922.18	24.00
9	2672.92	16.00	2221.83	20.00	2424.07	20.00
10	1867.85	15.00	2534.43	20.00	2611.37	20.00
11	2242.57	17.00	1950.25	21.00	2729.77	22.00
12	1697.89	15.00	2424.07	22.00	2785.10	23.00
13	1912.43	16.00	2525.70	20.00	2700.57	23.00
14	2039.27	16.00	2221.83	22.00	2587.00	22.00
15	2060.62	15.00	2125.74	19.00	2725.27	24.00
<b>N</b>	12.00	10.00	9.00	12.00	11.00	12.00
<b>Valor mínimo</b>	1867.85	15.00	2046.28	19.00	2587.00	22.00
<b>Valor mayor</b>	2323.32	16.00	2412.29	21.00	2812.14	24.00
<b>Amplitud</b>	455.47	1.00	366.00	2.00	225.14	2.00
<b>Media</b>	<b>2095.00</b>	<b>15.40</b>	<b>2184.36</b>	<b>19.83</b>	<b>2704.88</b>	<b>22.83</b>
<b>Mediana</b>	<b>2087.69</b>	<b>15.00</b>	<b>2175.01</b>	<b>20.00</b>	<b>2719.98</b>	<b>23.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado la depuración de los datos se procede analizar los resultados finales tomando en cuenta como medida de tendencia central a la media aritmética.

### 3.9. Análisis de resultados

Una vez realizado el análisis estadístico correspondiente de las lecturas de estabilidad y flujo Marshall de las briquetas oxidadas por temperatura, procedemos a realizar el análisis e interpretación de los resultados finales.

Tabla 68. Resultados de estabilidad y flujo Marshall

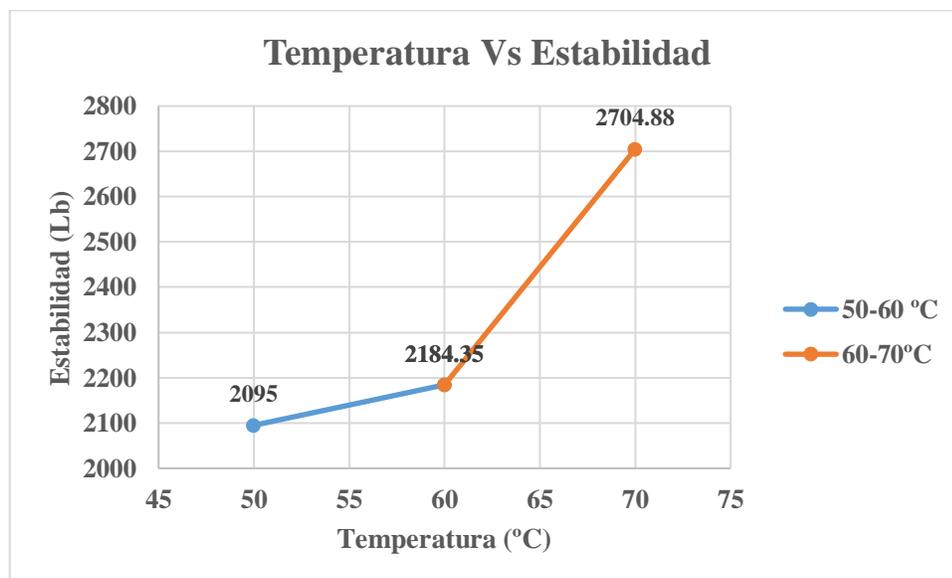
Temperatura (° C)	Estabilidad (Lb)	Flujo (0.01 pulg)	Relación estabilidad/flujo
50.00	2095.00	15.40	136.04
60.00	2184.35	19.83	110.14
70.00	2704.88	22.83	118.46

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.9.1. La rigidez

Considerando que la rigidez tiene un comportamiento directamente proporcional al comportamiento de la estabilidad, ya que a medida que aumente la estabilidad también aumentara la rigidez del asfalto en las mezclas asfálticas en caliente haciendo que pueda resistir más carga, partiendo de esta consideración podemos realizar el siguiente análisis.

Figura 46. Temperatura vs Estabilidad



Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica de temperatura vs estabilidad podemos notar como a medida que aumenta la temperatura la estabilidad aumenta por lo tanto la rigidez aumentará proporcionalmente a la estabilidad, también se puede observar que el incremento que ha se producido de la estabilidad en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados es mucho mayor al incremento que se ha producido en el rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados, pasando de tener un incremento de 89.35 lb o 4.26% para el rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados a 520.53 lb o (23.83%) para el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados.

Variación de la estabilidad de 50 a 60 grados centígrados.

$$\Delta \text{Estabilidad (Lb)} = 2184.35 - 2095 = \mathbf{89.35 \text{ Lb}}$$

$$\Delta \text{ Estabilidad (\%)} = \frac{(2184.35 - 2095.00) * 100}{2095.00} = \mathbf{4.26\%}$$

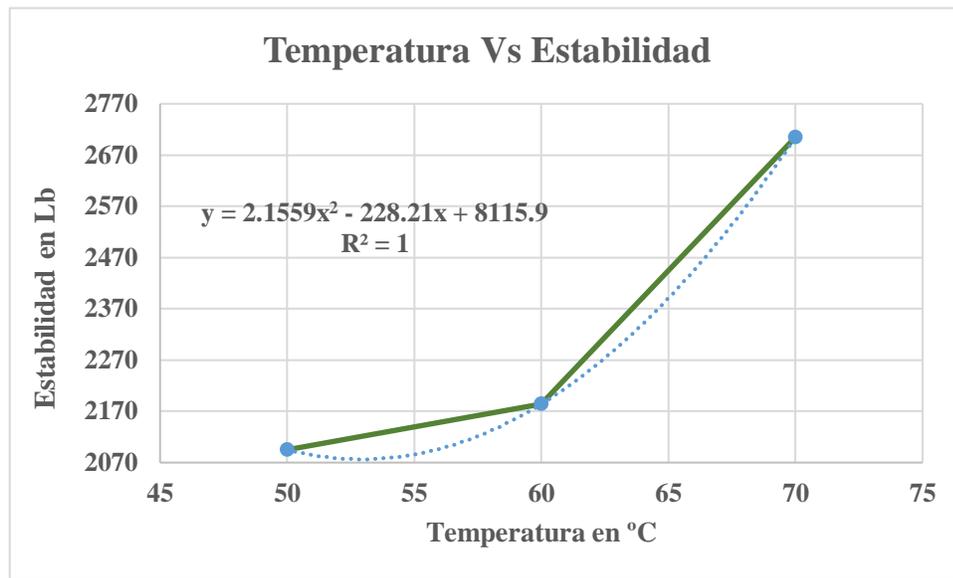
Variación de la estabilidad de 60 a 70 grados centígrados.

$$\Delta \text{Estabilidad (Lb)} = 2704.88 - 2184.35 = \mathbf{520.53 \text{ Lb}}$$

$$\Delta \text{ Estabilidad (\%)} = \frac{(2704.88 - 2184.35) * 100}{2184.35} = \mathbf{23.83\%}$$

La variación que se produjo en la estabilidad en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados fue de 5.83 veces mayor al incremento de estabilidad que se produjo en el rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados, teniendo así un comportamiento exponencial viéndose claramente este incremento tan brusco en la estabilidad en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados, por lo tanto el incremento de la rigidez también será exponencial.

Figura 47. Comportamiento exponencial de la estabilidad

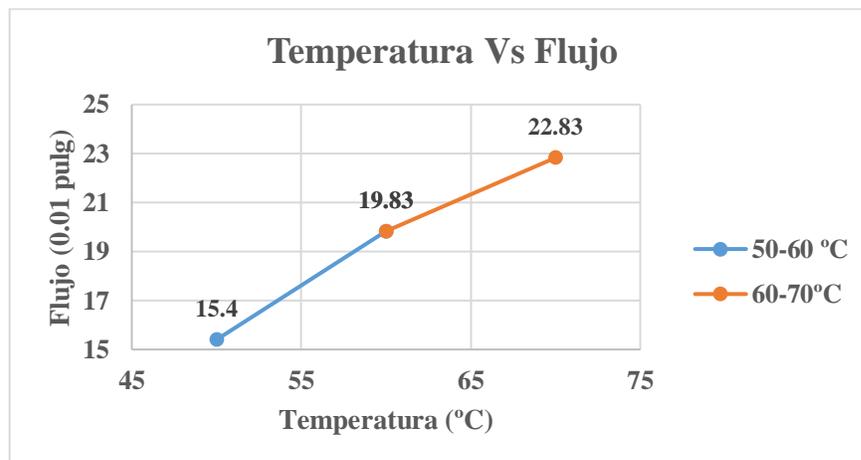


Fuente: Elaboración propia.

### 3.9.2. La fragilidad

Considerando que la fragilidad tiene un comportamiento inversamente proporcional al comportamiento del flujo, debido a que si la capacidad de deformación de las briquetas conocido también como flujo de Marshall aumenta, por lo tanto la incapacidad de deformación ira reduciendo siendo esta la característica principal de la fragilidad.

Figura 48. Temperatura vs Flujo



Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica temperatura vs flujo, se puede observar que a medida que va aumentando la temperatura, también va aumentando el flujo por lo tanto a simple vista podemos notar que irá reduciendo la fragilidad, pero también podemos notar que el incremento del flujo en los rangos de temperatura de 50 a 60 y de 60 a 70 grados centígrados va disminuyendo pasando de un incremento de 4.43 (0.01 pulg) a 3 (0.01 pulg), ocasionando que la fragilidad vaya aumentando debido a que va perdiendo su capacidad de deformación.

Variación del flujo de 50 a 60 grados centígrados.

$$\Delta \text{Flujo (0.01 pulg)} = 19.83 - 15.40 = \mathbf{4.43 (0.01 pulg)}$$

$$\Delta \text{Flujo (\%)} = \frac{(19.83 - 15.40) * 100}{15.40} = \mathbf{23.77\%}$$

Variación del flujo de 60 a 70 grados centígrados.

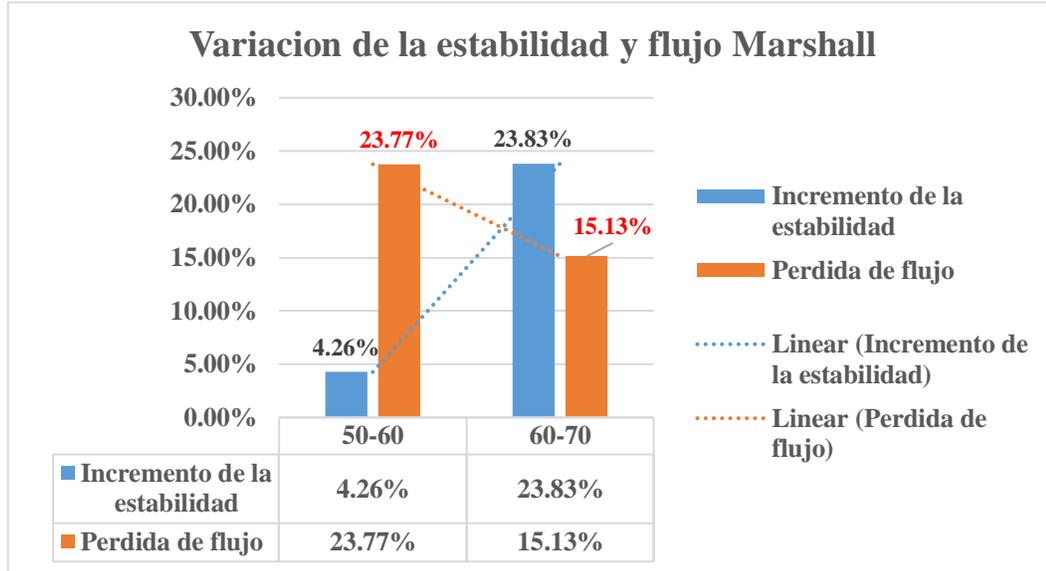
$$\Delta \text{Flujo (0.01 pulg)} = 22.83 - 19.83 = \mathbf{3.00 (0.01 pulg)}$$

$$\Delta \text{Flujo (\%)} = \frac{(22.83 - 19.83) * 100}{19.83} = \mathbf{15.13\%}$$

La pérdida del flujo que se produce en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados es de 1.43 (0.01 pulg) o de 32.28% del incremento del flujo que se produjo en el rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados, haciendo notar que la fragilidad aumenta debido a la pérdida de capacidad de deformación.

También podemos notar que la pérdida de capacidad de deformación (flujo), o también conocido como fragilidad tiene un comportamiento lineal ya que se puede observar que la pérdida de deformación que se produce en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados con relación a la deformación en el rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados se produce progresivamente.

Figura 49. Variación de la rigidez y la fragilidad



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar claramente de la gráfica de variación de estabilidad y flujo de Marshall, como aumenta la estabilidad con el aumento de la temperatura ocasionando que las briquetas de mezcla asfálticas se han cada vez más rígido, también podemos observar cómo va disminuyendo la capacidad de deformación (flujo), ocasionando que la fragilidad vaya aumentando.

## CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Luego del proceso estadístico de datos y el análisis de los resultados finales obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Al observar el comportamiento de la estabilidad y el flujo de Marshall se pudo observar que son de comportamiento diferente, ya que el comportamiento de la estabilidad se adecua más a un incremento exponencial, incrementándose de golpe de 89.35 lb a 520.53 lb, mientras que el flujo se adecua más a un incremento lineal pasando de tener un incremento en el flujo de 4.43 (0.01 pulg) a 3 (0.01 pulg).
- Se concluyó con el presente análisis de resultados que si relacionamos los resultados de las briquetas de mezcla asfáltica en caliente oxidadas a 50, 60 y 70 grados centígrados elaboradas con un cemento asfáltico PEN 85/100, con un pavimento elaborado con el mismo cemento asfáltico y siendo expuesto a temperaturas similares, entonces el pavimento se ira volviendo cada vez más rígido e irá perdiendo cada vez más su capacidad de deformación volviéndose frágil, conforme aumente la temperatura, ocasionando que se presente grietas o fisuras en el pavimento.
- Se pudo observar que en el rango de temperatura de 60 a 70 grados centígrados es aquel en el que se produjeron los mayores cambios en la estabilidad y el flujo de Marshall, produciéndose un incremento exponencial de la estabilidad de 5.83 veces la estabilidad del rango de temperatura de 50 a 60 grados centígrados, también se empezó a notar como se va perdiendo la capacidad de deformación en las briquetas haciendo que aumente la fragilidad.
- Al observar los resultados de la presente investigación podemos responder al problema planteado para el estudio de la investigación respondiendo que efectivamente el asfalto ante la presencia de altas temperaturas sufre un endurecimiento volviéndose más rígido y con el paso del tiempo tendrá una tendencia a fisurarse.

- La realización de una buena y completa caracterización de los materiales que se emplearan para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente es un buen indicativo de la calidad que puede tener nuestra mezcla asfáltica.
- La aplicación de la estadística descriptiva fue de gran ayuda para poder entender y tratar mejor los resultados obtenidos, ya que al haber tenido valores muy dispersos con la estadística se pudo encontrar los valores más representativos de nuestro grupo de resultados.

#### **4.2. Recomendaciones**

Luego del proceso estadístico de datos y el análisis de los resultados finales obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Entender y realizar una adecuada investigación sobre la fragilidad y la rigidez y la oxidación antes de realizar cualquier trabajo respecto al tema para evitar confusiones con los conceptos de envejecimiento.
- Realizar un estudio previo a la elaboración de cualquier proyecto, teniendo en cuenta los conceptos que debe tener claro, las normas técnicas con las cuales se verificara la calidad del proceso del trabajo y el procedimiento que deberá seguir para realizar y cumplir con los objetivos planteados.
- Antes de iniciar con la elaboración de las briquetas es indispensable haber terminado toda la caracterización de los materiales tanto de los agregados como del cemento asfáltico, caso contrario se corre el riesgo de elaborar mezclas asfálticas de baja calidad.
- Se debe tener en cuenta que al elaborar las briquetas con el martillo manual se debe tener cuidado en tener totalmente recto el martillo caso contrario las briquetas quedaran desniveladas lo que puede ocasionar lecturas erróneas de estabilidad y flujo Marshall.
- Es importante tener un buen control de la temperatura a la hora del envejecimiento teniendo cuidado con la variación de la temperatura si es que no se cuenta con un horno con temperatura constante, donde se deberá adoptar un rango de error para el envejecimiento.

- Se debe prestar atención para determinar la lectura en el equipo Marshall a la hora de romper las briquetas de mezcla asfáltica ya que si el equipo no es automático se puede ocasionar errores en las lecturas de la estabilidad y flujo de Marshall.
- Procurar de cerciorarse de que los instrumentos y equipos cumplan con los requisitos de las normativas para la elaboración de los ensayos de laboratorio.
- Utilizar equipo de protección y tener cuidado en el calentamiento del cemento asfáltico para su caracterización.