

# CAPÍTULO I

## DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### 1.1. Introducción

En el proceso constructivo de las capas de una estructura de pavimento influyen distintos factores que hacen que ella tenga un óptimo comportamiento frente a los esfuerzos que va a enfrentar durante su vida útil de servicio, uno de los principales factores que influye en el funcionamiento óptimo de una mezcla asfáltica es su densificación y la relación de vacíos que pueda llegar a tener después de un proceso de compactación.

La compactación es una variable que de manera constante es parte importante de la etapa constructiva de un pavimento, sin embargo, se hace un proceso difícil de garantizar al 100%. En lugares de difícil acceso suele realizarse el proceso constructivo en ausencia de un profesional que garantice el correcto porcentaje de compactación y esto conlleva a futuras fallas del pavimento y deficiencias en su óptimo servicio a la comunidad.

El estudio de las mezclas asfálticas en caliente se realiza generalmente por procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el comportamiento del pavimento. En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Existen varios métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. El método empírico más utilizado es el Método Marshall, donde una vez determinado el porcentaje óptimo de Cemento Asfáltico, los ensayos se dirigen a determinar las propiedades mecánicas de las briquetas. Los dos aspectos principales del método Marshall son: la densidad, análisis de vacíos, la prueba de estabilidad y su fluencia.

Por ello se plantea el análisis de la densidad de la mezcla asfáltica utilizando un método de Rice, para luego realizar una comparación de sus resultados con los de la metodología Marshall, dentro de la mezcla asfáltica en caliente.

Este método de ensayo da como resultado la existencia de valores de (%) porcentajes de vacíos totales que afectan directamente a la calidad de la mezcla.

Parámetros como el contenido de vacíos totales en el diseño de mezcla y el (%) porcentaje de compactación durante la colocación del concreto asfáltico, son controlados por medio de la gravedad máxima teórica (GMM).

En esta investigación planteamos la afectación que genera una compactación por debajo de los parámetros solicitados en una mezcla asfáltica, estudiando la falla de la “densidad máxima” o porcentaje de compactación por la susceptibilidad al agua, ensayos que brindan valores de afectación de las variables estudiadas en las capas asfálticas y establece qué tan influyente puede ser un grado de compactación un poco menor a 100%, tal como se trabaja en los materiales granulares que conforman las capas que preceden a la capa asfáltica.

El análisis se llevará a cabo mediante una investigación experimental, por medio de la realización de ensayos de laboratorio a los agregados, materiales pétreos y briquetas para dar paso a su evaluación posterior.

## **1.2. Justificación**

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.

La densidad máxima de una mezcla asfáltica se utiliza en los cálculos del volumen de huecos, la absorción de ligante asfáltico por los agregados, la masa específica efectiva del agregado y el contenido efectivo del asfalto de la mezcla.

Las posibles diferencias en los valores de densidad máxima obtenidos por el método teórico y el método de Rice influyen en los parámetros volumétricos y, en consecuencia, en la elección del contenido de diseño del ligante asfáltico. Elegir un contenido por encima del ideal reducirá el volumen de huecos, provocando la inestabilidad de la

mezcla y la exudación del ligante asfáltico. Por otro lado, elegir un contenido por debajo del ideal aumentará el volumen de huecos, haciendo que el pavimento sea excesivamente permeable y acelerando su proceso de deterioro. Por lo tanto, se requiere precaución al determinar la densidad máxima de una mezcla asfáltica, de modo que el contenido de diseño del ligante asfáltico elegido elimine el riesgo de patologías, garantizando la seguridad de los usuarios de la vía.

En esta investigación se pretende realizar un análisis comparativo de la densidad máxima teórica calculada a través del método Marshall con la densidad máxima medida utilizando el método Rice, con la cual se pueda determinar las diferencias en sus resultados y la influencia sobre el diseño adecuado de la mezcla asfáltica en caliente logrando así un eficiente parámetro de control.

Este proyecto pretende principalmente dar un aporte, que permita el interés en la realización de más investigaciones en cuanto a mezclas en caliente y densas, ya que su utilización ha demostrado en experiencias un importante número de ventajas sobre las mezclas en caliente.

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

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

En la actualidad, los pavimentos flexibles se deterioran prematuramente antes de cumplir con la vida útil para la que fueron diseñados, debido especialmente al incremento de vehículos de alta capacidad de carga, y a la variación brusca de temperatura como consecuencia del cambio climático, esto exige a nuestro país implementar una política agresiva de buena ejecución durante la construcción de carreteras en nuestro país.

En nuestra región, tanto el tránsito como la magnitud del mismo, se incrementaron en los últimos tiempos de manera muy notoria, debido al crecimiento poblacional, económico e industrial. Por tal razón, nuestras vías reciben mayores cargas y también de manera más constante, por lo cual, los diseños para los cuales fueron hechos, ya no satisfacen la demanda de hoy, por lo que se van deteriorando, presentando deformaciones permanentes y también fallas longitudinales, transversales y de desprendimiento, según sea el caso.

Una de las variables que genera este deterioro y que no permite completar la vida útil de las carreteras es el no cumplimiento del grado de compactación según diseños previos, de acuerdo a la densidad máxima de una mezcla asfáltica.

La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La densidad máxima obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad máxima del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

En esta investigación se planteará la comparación de la densidad máxima medida (DMM) utilizando el Método Rice con la obtenida con el método convencional (DMT) de mezclas asfálticas en caliente, para determinar el grado de influencia sobre la densidad, según varía el grado de compactación, estableciendo así un parámetro de control en el diseño adecuado de la mezcla asfáltica.

### **1.3.2. Problema**

¿Cómo influirá la determinación de la densidad máxima teórica convencional o tradicional (Marshall) comparado con la densidad medida utilizando el método Rice, con diferentes grados de compactación, a un eficiente diseño y elaboración del pavimento asfáltico?

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo del método teórico para determinar la densidad máxima (Marshall) de mezclas asfálticas en caliente con el método Rice, con relación al grado de compactación, con el fin de establecer un parámetro eficiente de control, en la elaboración y colocación del pavimento asfáltico.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Recolectar información bibliográfica relacionada a la temática planteado.
- Realizar los ensayos de caracterización de los materiales pétreos y material asfáltico siguiendo las normativas correspondientes.
- Elaborar las briquetas de mezcla asfáltica en caliente siguiendo el método Marshall.
- Determinar la densidad máxima de la mezcla asfáltica en caliente utilizando el método teórico (Marshall).
- Determinar la densidad máxima medida de la mezcla asfáltica en caliente con el método Rice.
- Analizar la influencia del grado de compactación en la determinación de la densidad máxima de la mezcla asfáltica en caliente en ambos métodos.
- Realizar la comparación de los resultados obtenidos con la metodología Marshall y el método Rice.
- Determinar la gravedad máxima teórica, para establecer controles de calidad, en la elaboración y colocación de las mezclas de concreto asfáltico.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados de la investigación realizada.

### **1.5. Hipótesis**

Realizando el análisis comparativo de la densidad máxima teórica (Marshall) con la densidad máxima medida utilizando el método Rice, con diferentes grados de compactación, se podrá lograr un eficiente parámetro de control para una adecuada elaboración y colocación en obra del pavimento asfáltico.

La elaboración de briquetas en las mezclas asfálticas mejorará la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico.

### **1.6. Señalamiento de variables de la hipótesis**

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

La elaboración de briquetas para determinar la densidad en la mezcla asfáltica.

### 1.6.2. Variable dependiente

Estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico.

### 1.7. Población y muestras

La investigación se sustentará en la elaboración de 3 briquetas por cada pavimento asfáltico preparada en el laboratorio posteriormente siendo ensayadas, para mayor facilidad de cálculo y análisis de resultados se tomarán los testigos tomando en consideración el método de Marshall y Rice.

### 1.8. Operacionalización de variables

#### 1.8.1. Variable independiente

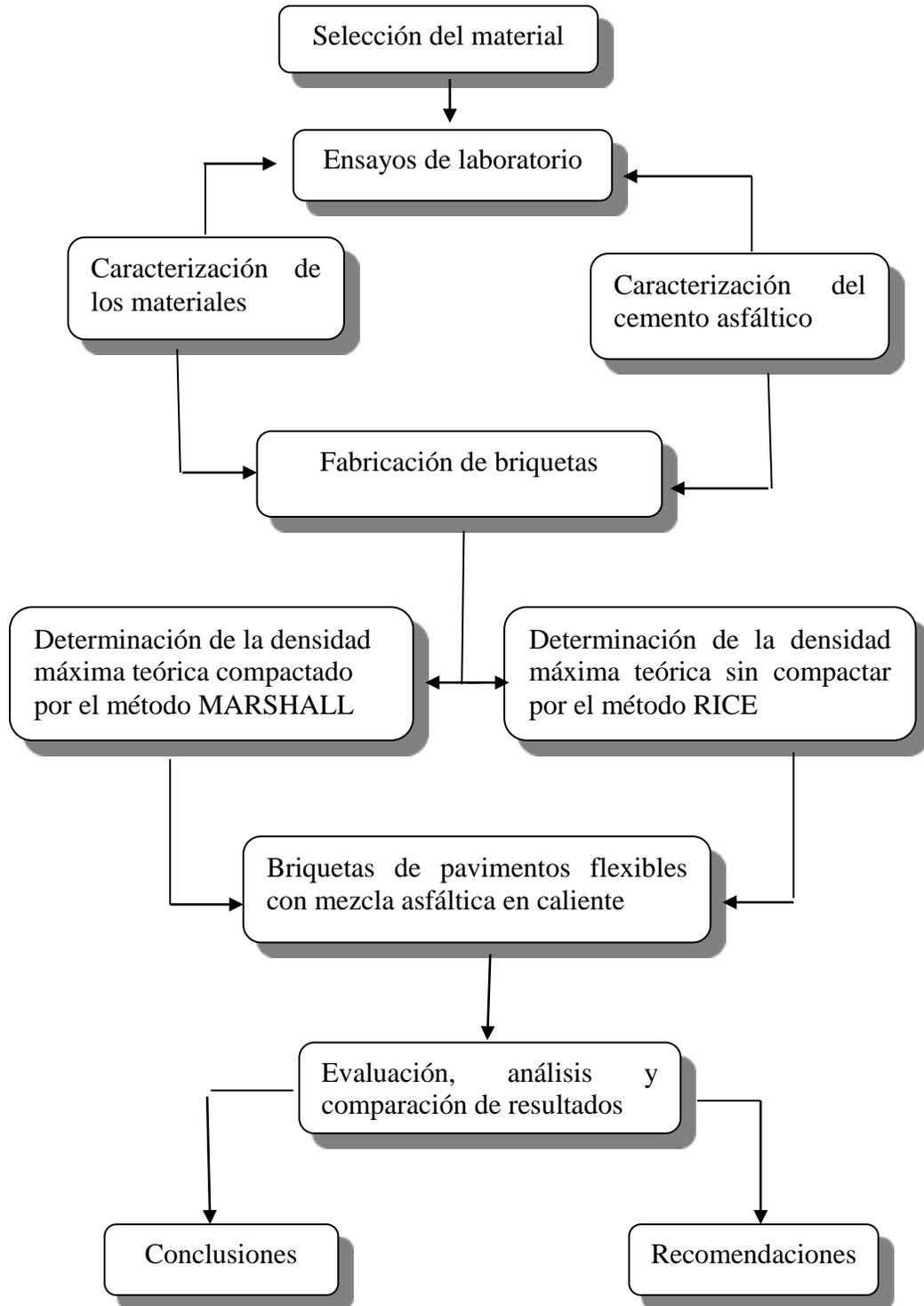
Conceptualización	Dimensiones	Indicaciones	Ítems	Técnicas e instrumentos
El pavimento asfáltico en mezclas asfálticas en caliente que se caracteriza por impermeable durable resistente a la formación de roderas	Mezcla asfáltica	Estabilidad y deformación	¿Qué dosificación garantiza buena estabilidad y deformación?	Ensayos de Laboratorio. Normas AASHTO Y ASTM.
	Mezcla asfáltica	Cantidad	¿Qué normas y porcentajes óptimos para elaborar la mezcla asfáltica?	Bibliográfico Laboratorio

### 1.8.2. Variable dependiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	ítems	Técnicas e instrumentos
La Estabilidad es la propiedad del pavimento asfáltico relacionada a la capacidad de soporta cargas producidas por el tránsito.	Ensayo Marshall y Rice	Equipos materiales	¿Qué equipos y materiales se usarán para la elaboración de las briquetas?	Ensayos de laboratorio. Normas AASHTO Y ASTM.
La deformación está indicada por la disminución del diámetro vertical de la briqueta, lo que indica la deformación producida por las cagas de tránsito.	Comparación de resultados de los distintos Pavimentos	Muestreo	¿Cuál es el porcentaje óptimo de cemento asfáltico?	Normas AASHTO Y ASTM. Experimentación
		Tabulación de resultados	¿Cuál será el porcentaje de cemento asfáltico para lograr la máxima estabilidad?	Códigos Bibliográficos Laboratorio

### 1.9. Procedimiento de aplicación

Flujograma de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva.



Se realizará la caracterización de los agregados pétreos a utilizar (grava, gravilla y arena). Los ensayos a realizar serán los siguientes.

- Granulometría de los agregados.
- Peso específico de los agregados.
- Peso unitario.
- Desgaste mediante la máquina de los ángeles.
- Caras fracturadas.
- Equivalente de arena.

Caracterización del cemento asfáltico, con los siguientes ensayos.

- Penetración.
- Ductilidad.
- Peso específico.
- Punto de ablandamiento.
- Punto de inflamación.
- Película delgada.
- Viscosidad Saybolt Furol.

La dosificación de la mezcla asfáltica se realizará siguiendo la metodología Marshall, con la cual se determinará las fracciones de cada material para una briqueta de peso 1200gr. el contenido de ligante asfáltico se obtendrá para muestras compactadas (método Marshall) y sin compactar (método Rice).

Se analizará la densidad siguiendo los dos métodos (Marshall y Rice) con 3 grados de compactación de 35, 50 y 75 golpes.

Para las evaluaciones del aporte estructural, se utilizará el ensayo de compresión encofinada, se analizará 3 grupos de muestras de pavimento flexible con adición de mezcla asfáltica a diferentes tipos de porcentaje de cemento asfáltico y vacío.

Se estudiarán un total de 54 muestras de mezclas asfálticas debidamente preparadas y compactadas, con las pruebas necesarias de laboratorio con el fin de determinar si cumple con los objetivos de los trabajos.

### **1.10. Alcance del trabajo**

El presente trabajo tiene un nivel de investigación descriptivo: “COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA RICE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON LAS PROPIEDADES MARSHALL”, se enmarca en una investigación de tipo experimental, a fin de establecer una solución apropiada en la obtención de resultados o valores representativos y óptimos de densidades en mezclas asfálticas a través de la metodología Marshall y la metodología Rice, para que la misma sea aplicada para establecer un parámetro de control con respecto a la elaboración y colocación en obra de las mezclas asfálticas en caliente.

Se determinará la evaluación del aporte estructural de mezcla asfálticas en caliente compactado y sin compactar en pavimentos flexibles para llegar al objetivo del trabajo, bajo la norma de la ABC del manual de ensayos de suelos y materiales asfálticos V4a y según la normativa de INVIAS 453-07.

Se desarrolla primeramente los respectivos ensayos de caracterización de los materiales pétreos y bituminosos utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica. Las briquetas serán elaboradas con cemento asfáltico de penetración 85/100 procedencia chilena de la empresa PROBISA, para agregados gruesos de 3/4´, 3/8´´ y agregado fino el banco escogido fue el que dispone la Alcaldía, ubicada en la comunidad de la Pintada que cumplan las especificaciones de la norma de la ABC e INVIAS.

Para la obtención del contenido óptimo de bitumen para mezclas asfálticas en caliente compactadas y sin compactar se aplicará el método de Marshall y Rice.

Con la obtención de datos de los diferentes ensayos de laboratorio a realizar, se tabulará los datos y resultados realizando los cálculos correspondientes para aplicar la estadística descriptiva.

A nivel descriptivo ya que al culminar la investigación se contará con datos los cuales proporcionarán una estadística del pro y los contras para la utilización de este tipo de pavimentos asfálticos.

De las mezclas asfálticas, se medirá la resistencia, originales por una carga P en el ensayo de compresión encofinada, también se medirá su estabilidad mediante el ensayo Marshall.

La comparación se dará entre los grupos de mezcla asfálticas compactadas y sin compactar para mezclas a diferentes porcentajes 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, de ligante asfáltico, de los cuales se evaluará la densidad obtenida.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

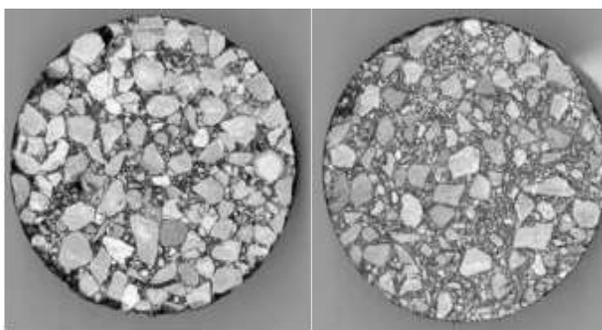
#### 2.1. Fundamentación teórica

El proyecto se sustenta en el análisis comparativo de los pavimentos asfálticos y densidades: frente a los pavimentos asfálticos tradicionales mediante la realización de probetas en el laboratorio para lo cual se debe conocer conceptos y definiciones de los distintos agregados y materiales que compondrán las mezclas experimentales hacer ensayadas.

##### 2.1.1. Pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico es un conjunto de agregados que forman una mezcla de color negro o pardo oscuro, que es utilizado generalmente en las construcciones civiles como la pavimentación de carreteras, por sus características de fácil aplicación, por su versatilidad y durabilidad, son excelentes para este tipo de trabajos. El pavimento asfáltico está constituido en un 90% de agregado grueso, fino, en un 5% aproximadamente de polvo mineral o filler y el otro 5% de cemento asfáltico.

**Figura N°2.1** Textura superficial de los pavimentos



**Fuente:** Optimización del presupuesto de conservación de firmes con mezclas SMA.

#### 2.2. Definición de pavimentos

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y constituyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados y sin compactar para darle una comodidad, seguridad, rapidez, y economía.

Los pavimentos necesitan una estructura para que los esfuerzos generados por el tránsito, se vayan disipando a través de diferentes capas, y lleguen los esfuerzos admisibles a la capa asfáltica.

### **2.2.1. Estructura de los pavimentos**

Un pavimento es un operador que funciona a base de respuestas, cuando es activado por funciones de excitación.

Físicamente el pavimento es un sistema multicapa, construido por materiales de características mecánicas conocidas, dispuestos en capas de espesor conocido.

De esta manera, el pavimento está caracterizado por las propiedades, disposición y cantidad de los materiales utilizados, así como de la calidad de la construcción.

Cuando actúan sobre el pavimento funciones tales como las cargas producidas por el tránsito, se generan respuestas inmediatas del pavimento que obedecen leyes casi identificadas como estados de esfuerzos, deformaciones unitarias y flexiones.

El tiempo transcurrido hasta alcanzar las condiciones de falla constituye el ciclo de vida del pavimento, durante el cual, las condiciones y características del pavimento se degradan con el tiempo dando lugar a una curva de comportamiento, que refleja propiamente el nivel de servicio que el pavimento proporciona al usuario, lo cual tiene a su vez importantes implicaciones de tipo económico.

El proyecto de un pavimento debe involucrar los aspectos de diseño estructural, materiales y su disposición, tránsito, clima, aspectos constructivos, y estrategias de conservación, cuya eficiencia debe juzgarse a través de su evaluación beneficio costo. Capacidad para soportar las cargas.

### **2.2.2. Características de un pavimento**

Las características que debe presentar un pavimento son:

- Capacidad para soportar las cargas.
- No crear problemas de posible deslizamiento de los usuarios.
- Regularidad superficial longitudinal y transversal.

- Debe de presentar adecuadas consideraciones respecto al drenaje.
- Bajo nivel de ruido.
- Bajo nivel de desgaste de las llantas.
- Adecuadas propiedades de reflexión luminosa.
- Apariencia agradable.

### **2.3. Tipos de pavimentos**

#### **2.3.1. Pavimentos rígidos o de concreto**

Los pavimentos rígidos se integran por una capa losa de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava, esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada sobrasarte.

La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto.

#### **2.3.2. Pavimentos flexibles o asfálticos**

En general, están constituidas por una capa delgada de mezcla asfáltica constituida sobre una capa de base y una capa sub-base las que usualmente son de material granular.

La capa de rodadura de un pavimento flexible puede construirse con un hormigón bituminoso, mezclas de arena y bitumen, o mediante tratamientos superficiales con riegos bituminosos.

Está sometido a esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico.

La capa de base se compone generalmente de áridos, que han sido tratados no con cementos portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes.

Esta capa tiene como principal función, la de soportar las cargas aplicadas y distribuir estas cargas a la sub-base o al terreno.

La capa de sub-base se compone de materiales calidad y costo que los empleados en la capa de base. Se componen de materiales estabilizados o no de terreno.

Las sub-base transmiten cargas al terreno y en algunos casos pueden actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo y para prevenir la acción destructiva de las heladas.

#### **2.3.2.1. Duración de un pavimento flexible**

La estrategia de diseño seleccionado deberá presentar un mínimo de ocho años antes de que sea obligatoria la superposición de la capa. En general la duración óptima debería estar diseñada para un periodo de 20 años. Cuando mayor sea el módulo que se añade a la capacidad de las capas de pavimento. La carga se distribuye a lo largo de un área más amplia de la subbase o suelo de apoyo.

#### **2.3.2.2. Características de un pavimento flexible**

Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran los siguientes.

- Resistencia estructural.
- Capacidad de deformación.
- Durabilidad.
- Costo.
- Requerimiento de conservación.
- Comodidad.

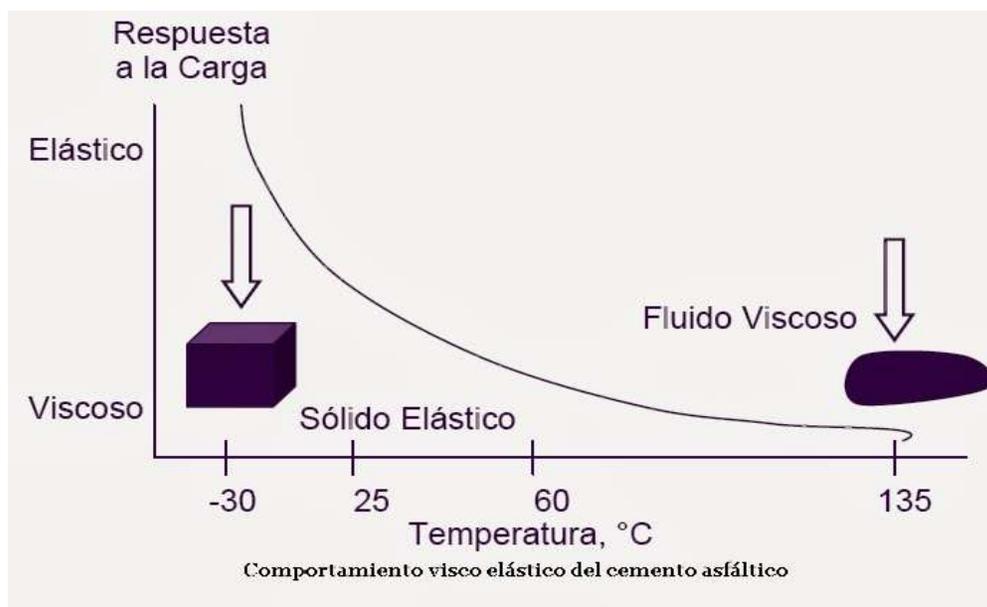
#### **2.4. Cemento asfáltico**

El cemento asfáltico es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo.

Este ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías, debido principalmente a que es un material altamente cementante, termo plástico, repelente al agua, y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, que posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al

cambio de temperaturas, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina, alta resistencia al envejecimiento.

**Figura N°2.2** Comportamiento visco elástico del cemento asfáltico



**Fuente:** <http://elcementoasfáltico.blogspot.com/2013/11/el-cemento-asfáltico>

#### 2.4.1. Características del cemento asfáltico

- Proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños.
- Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciendo poco sensible a la humedad y eficaz contra penetración del agua proveniente de las precipitaciones.

#### 2.4.2. Propiedades químicas del cemento asfáltico

**Aceites:** Hidrocarburos de alto peso molecular, mas resinas protectoras absorbidas.

**Máltenos:** Aceites resinosos de alto peso molecular

**Insolubles Orgánicos:** Hidrocarburos de alto peso moléculas con pequeñas cantidades de resinas absorbidas.

Las cantidades de elementos constitutivos del asfalto varían dependiendo del origen del crudo.

**Tabla N°2.1** Propiedades Químicas del Cemento Asfáltico (85-100)

<b>Compuesto (%)</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>
De carbono	70	90
De hidrogeno	7.30	10.10
De asufre	0.56	9.50
De ceniza	0.06	1.25
De nitrógeno	0.05	7

**Fuente:** Refinería de Esmeraldas

### **2.4.3. Propiedades físicas del asfalto**

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras según el MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES ASFALTICAS. ABC.

- Durabilidad.
- Adhesión.
- Susceptibilidad a la Temperatura.
- Envejecimiento y Endurecimiento.

#### **2.4.3.1. Durabilidad**

Durabilidad es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras

variables, que incluyen la durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto.

#### **2.4.3.2. Adhesión y cohesión**

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

#### **2.4.3.3. Susceptibilidad a la temperatura**

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

#### **2.4.3.4. Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa del mezclado.

#### **2.4.4. Aplicación y transporte**

El cemento asfáltico es comúnmente usado en la construcción de pavimentos para carreteras, autopistas, calles, aeropuertos, áreas de estacionamiento, entre otros, para ello se mezcla con agregados (mezclas en caliente), obteniéndose los denominados concretos

asfálticos para pavimentación. Es utilizado también en la industria impermeabilizante y pintura asfáltica, revestimientos de diques, canales y materia prima para las emulsiones asfálticas. El cemento asfáltico a temperatura ambiente, es semisólido y altamente viscoso, por lo que se requiere licuarlo temporalmente por calentamiento, para su manejo durante la operación de construcción, tales como, bombeo por tubería, transporte por cisternas, mezclas con agregado, etc.

El cemento asfáltico puede ser llevado temporalmente a condición fluida (líquido) durante la operación de construcción de tres maneras.

- **Derritiéndolo.** Después de las operaciones de construcción, el cemento asfáltico líquido y caliente se enfría y retoma de su condición fluida, a su condición normal semisólida.
- **Diluyendo en solventes de petróleo seleccionados.** Este proceso se llama recomposición (cutting back). Este método obtenido se denomina asfalto diluido (cuttback asphalt). Después de la reconstrucción, el solvente se evapora dejando en el lugar el cemento asfáltico. El uso del asfalto diluido ha declinado debido a la escasez de petróleo y las regulaciones gubernamentales del ambiente.
- **Emulsificándolo con agua.** Como el asfalto y el agua ordinariamente no se mezclan, se puede hacer que lleguen a esta condición mediante la agitación del asfalto con el agua en un molino coloidal y la adición de una pequeña cantidad de agente emulsificante o emulsivo. El producto resultante, denominado emulsión asfáltica, es fluido y está listo para las operaciones de construcción.

#### **2.4.5. Obtención del cemento asfáltico**

La obtención del cemento asfáltico se hace a través del petróleo crudo que es extraído de los pozos, este es separado en una refinería, principalmente esta separación se lleva a cabo por destilación o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos, de esta manera se obtiene el asfalto producto de la refinación del petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado. El cemento asfáltico es obtenido como residuo o producto del petróleo crudo.

## **2.5. Agregados pétreos**

### **2.5.1. Definición de agregados**

Agregado, es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

### **2.5.2. Importancia del agregado en una mezcla asfáltica**

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

Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado o en las propiedades de este puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla asfáltica por lo que es de suma importancia tener el control del agregado que se produce para la producción de mezclas asfálticas.

### **2.5.3. Tipos de agregados**

Hay varias maneras de obtener los agregados, de acuerdo a su procedencia y a la técnica que se empleó para su extracción es como se puede determinar qué tipo de agregado pétreo es y éstos se dividen de la siguiente manera

- **Agregado Grueso:** Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (N° 4).

- **Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (N°.4) y queda retenido en el tamiz de 75  $\mu$ m (N°. 200).
- **Polvo Mineral:** La porción de agregado fino que pasa el tamiz N°. 200.
- **Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (N°. 200).
- **Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- **Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde Tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- **Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas, expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- **Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ninguna llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.
- **Agregado Bien Graduado:** Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de una llenante mineral con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

#### 2.5.3.1. Clasificación de agregados

Los agregados usados en pavimentos asfálticos se clasifican de acuerdo a su origen y son:

##### **Agregado natural**

Están formados mediante procesos naturales de erosión y degradación, como la acción de viento y agua. La forma de las partículas de estos agregados es un producto de los agentes que actúan sobre ellos.

### **Agregados procesados**

Son gravas naturales los cuales son procesados esto quiere decir que cambian su forma original, a esta transformación se denomina trituración, esto se lo realiza para que el agregado tenga las propiedades adecuadas para ser utilizados en las mezclas asfálticas en caliente.

Los agregados son triturados por tres razones:

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

Una vez triturados los agregados estos deben pasar un sistema de zarandeado o tamizado la cual nos da como resultado los diferentes tamaños de agregados que voy a producir, y esto resulta ser mi granulometría.

Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con las especificaciones establecidas de granulometría.

### **Agregados sintéticos**

Estos agregados no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. El agregado sintético más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Esta escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

#### **2.5.3.2. Propiedades de los agregados**

Los agregados deben cumplir con las siguientes propiedades para ser considerados apropiados para la elaboración de mezclas asfálticas.

- Tamaño máximo del agregado.

- Limpieza.
- Dureza.
- Forma del agregado.
- Textura de la superficie.
- Absorción.
- Afinidad con el cemento asfáltico.

**Tamaño máximo del agregado:** Se requiere que los agregados estén dentro en margen de tamaño y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones. Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados son funciones directas de su granulometría y es fundamental para establecer su comportamiento mecánico cuando se someta a cargas directas.

**Limpieza:** En los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan al comportamiento de las mezclas asfálticas, dentro de estos se tiene vegetación, arcilla, esquistosa, terrones de arcilla, material orgánico.

**Dureza:** Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de las mezclas asfálticas y durante la vida del pavimento.

**Textura de la superficie:** Es un factor que determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla y las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento, según sus texturas estas pueden ser lisos o rugosos.

**Absorción:** La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información ya que un agregado poroso requiere mayores cantidades de asfalto que las que requiera un agregado menos poroso.

**Afinidad con el cemento asfáltico:** Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de cemento asfáltico.

## 2.6. Gradación del agregado

La gradación de agregado es muy importante para la mezcla asfáltica, además cabe recalcar que la mezcla asfáltica al poseer más del 90% de agregados estos deben poseer propiedades adecuadas las cuales confieran una mezcla asfáltica con buenas propiedades. Los agregados estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc. De tal manera que cumplan los requisitos establecidos en la tabla, que corresponde a la tabla 405 – 5.1 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes de esta especificación según corresponda se clasifican en “A”, “B”, “C”.

**Tabla N°2.2** Requisitos granulométricos

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla			
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4
1" (25.4mm)	100			
3/4" (25.4mm)	90-100	100		
1/2" (25.4mm)		90-100	100	
3/8" (25.4mm)	56-80		90-100	100
N°4 (25.4mm)	35-65	44-74	55-85	80-100
N°8 (25.4mm)	23-49	28-58	32-67	65-100
N°16 (25.4mm)				40-80
N°30 (25.4mm)				25-65
N°50 (25.4mm)	5-19	5-21	7-23	7-40
N°100(25.4mm)				3-20
N°200(25.4mm)	2-8	2-10	2-10	2-10

**Fuente:** Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP–001–F 2002

**Agregados tipo A:** En este tipo se encuentran el agregado grueso, producto del proceso de trituración. El agregado fino que puede ser de origen natural o material triturado

pudiéndose añadir relleno mineral como producto para cumplir con la granulometría requerida o la incorporación de cemento Portland.

**Agregado tipo B:** Son aquellos en los cuales por lo menos el 50% de las partículas que forman el agregado grueso debe ser material triturado. El agregado fino puede ser procedente de depósitos naturales, así como el relleno mineral.

**Agregado tipo C:** Este tipo puede ser material procedente de depósitos naturales o de trituración dependiendo de la disponibilidad de la zona y que cumplan las especificaciones sometidas al ensayo Marshall.

## **2.7. Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formados por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continúa este. Se fabrican en unos centrales fijos o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

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

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

- **Por fracciones de agregado pétreo empleado.**

**Masilla asfáltica.** Polvo mineral más ligante.

**Mortero asfáltico.** Agregado fino más macilla.

**Concreto asfáltico.** Agregado grueso más mortero.

**Macadam asfáltico.** Agregado grueso más ligante asfáltico.

- **Por la temperatura puesto en obra.**

**Mezclas asfálticas en caliente:** Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de 150 grados centígrados, según viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.

La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

**Mezclas asfálticas en frío:** El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

- **Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.**

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

**Mezclas cerradas o densas:** La proporción de vacíos no supera el 6%.

**Mezclas semi-cerradas o semi-densas:** La proporción de vacíos esta entre el 6 y 10%.

**Mezclas abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12%.

Mezclas porosas o drenantes. La proporción de vacíos es superior al 18%.

- **Por el tamaño máximo del agregado pétreo.**

**Mezclas gruesas:** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

**Mezclas finas:** También llamadas micro aglomerados, puede denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

- **Por la estructura del agregado pétreo.**

**Mezclas con esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.

**Mezcla sin esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

- **Por la granulometría.**

**Mezclas continuas:** Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

**Mezclas discontinuas:** Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

**Tabla N°2.3** Clasificación de las mezclas asfálticas

<b>Parámetro de clasificación</b>	<b>Tipo de mezclas</b>
Fracciones de agregado empleadas	Masillas
	Morteros
	Macadam
	En frio
	En caliente
Huecos en la mezcla	Cerradas ( $h < 6\%$ )
	Semicerradas ( $6\% < h < 12\%$ )
	Abiertas ( $h > 12\%$ )
	Porosas ( $h > 20\%$ )
Tamaño máximo del agregado	Gruesas (t max. > 10 mm)
	Finas (t max. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometrías	Continuas
	Discontinuas

**Fuente:** <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/3406514.pdf>.

## 2.8. Compactación de las mezclas asfálticas

Las capas asfálticas a compactar se clasifican en capas base, capas de ligante o intermedias y capas de rodadura. En las capas de rodadura de la carretera se utiliza hormigón asfáltico, asfalto mastico y asfalto poroso.

La mezcla recién aplicada debe compactarse para obtener una mayor densidad del material, o dicho de otro modo, para reducir los intersticios vacíos de la capa de asfalto. Los objetivos perseguidos son obtener el grado de compactación requerido y mantener los valores umbral referente a la proporción de espacios vacíos. Con ellos se consigue una mayor estabilidad de las capas y, por lo tanto, una mayor resistencia a las deformaciones. La resistencia al desgaste de la capa de rodadura también está influida positivamente por una buena compactación.

**Figura N°2.3** Proceso de compactación in situ



**Fuente:** V. Yepes Piqueras, La Compactación De Las Mezclas Asfálticas, 18 Feb. 2016.

Una de las tareas más delicadas e importantes de la puesta en obra del aglomerado asfáltico es su compactación, pues de ella depende en gran parte la calidad final del firme. Se trata de alcanzar una alta densidad que garantice la durabilidad prevista e impida irregularidades superficiales. La compactación debe llegar a la densificación marcada por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, normalmente entre el 95

y 98 % de la densidad Marshall de referencia, todo ello conservando la geometría superficial dada por la extendedora.

La compactación se realizará siempre que la trabajabilidad de la mezcla sea la suficiente. En las mezclas en caliente se debe comenzar a compactar con la temperatura más alta posible (superior a 120°C), siempre que se pueda soportar la carga del compactador sin arrollamientos ni agrietamientos. En frío debe existir la suficiente presencia de fluidificantes en las mezclas abiertas o de la propia agua de la emulsión en las mezclas densas.

Los factores que influyen en la compactación de un aglomerado asfáltico son, entre otros, los siguientes:

- **Tipo de firme:** Cada tipo de mezcla presentará diferente dificultad para ser compactado, por ejemplo, la fracturación, tamaño y forma de los áridos.
- **Acabado superficial:** Según la calidad del acabado requerido la compactación deberá realizarse de forma diferente.
- **Contenido de betún:** El betún actúa como lubricante entre las partículas, aunque no debería ser excesivo para evitar la inestabilidad de la mezcla.
- **Proporción y tipo de filler:** A mayor contenido de filler, mayor dificultad de compactación, puesto que actúa como estabilizante del betún.
- **Espesor de capa:** Si bien un mayor espesor de capa produce más rendimiento, el espesor suele estar marcado por el proyecto.
- **Temperatura:** La temperatura de compactación de la mezcla en caliente siempre es muy superior a la del ambiente, por lo que se enfría rápidamente, impidiendo la compactación posterior. Pero tampoco es acertado pasarse en temperatura, pues provoca la inestabilidad de la mezcla. Se pueden dar los siguientes valores a efectos prácticos:

Temperatura a la salida de la planta	135 – 180°
Temperatura a la salida de la extendedora	120 – 150°
Temperatura durante la compactación	85 – 150°

La primera compactación la realiza la propia extendedora, llegando con su vibración a conseguir un 80% de la densidad teórica Marshall. Aunque esta cifra parece elevada, es lo suficientemente baja como para tener que compactar con maquinaria específica.

Las primeras zonas a compactar son las juntas transversales, las longitudinales y el borde exterior, por este orden. En el caso de las transversales la compactación se realiza perpendicularmente al eje de la calzada. Una vez compactadas juntas y borde, la compactación de la calle se iniciará por la zona más baja progresando hacia la más alta mediante solapes de las sucesivas pasadas. En zonas de difícil acceso, hay que emplear pequeños compactadores mecánicos o incluso pisones manuales.

En cuanto al tipo de compactador necesario, éste dependerá del tipo de mezcla y su espesor. En algunos casos se exige un tramo de prueba que determine las características de los compactadores y el número de pasadas necesario. Lo habitual es el uso de compactadores de neumáticos con alta o media presión y rodillos lisos con o sin vibración.

La compactación se realiza normalmente combinando diferentes equipos. Lo más habitual es combinar un compactador de neumáticos, que cierra la mezcla por efecto de amasado, y un compactador de llanta metálica, que corrige las posibles marcas o roderas del anterior equipo. También es muy útil el uso de rodillos mixtos neumáticos-vibrantes que reúnen las ventajas de ambas máquinas.

Los **compactadores de rodillo liso sin vibración** sólo se emplean en mezclas de pequeño espesor para dar un buen acabado superficial, siempre que se hayan utilizado previamente compactadores de neumáticos. Deben ser compactadores ligeros y con baja presión lineal. Suelen ser compactadoras vibratorias tándem de 8 a 18 t que trabajan sin vibración.

Con los **compactadores de neumáticos** se debe trabajar con presiones no muy elevadas al principio para acabar la compactación con mayores presiones. Además, tendrán ruedas lisas, en número, tamaño y disposición que permitan el solape de las ruedas delanteras y trasera, con faldones de lona protectores para evitar el enfriamiento de los neumáticos. La compactación dependerá de la carga total por rueda, de la presión y

rigidez del neumático, lo cual provoca la presión de contacto. Existe un efecto de amasado y el efecto compactador en profundidad es mayor que el de rodillos metálicos.

Los **compactadores vibratorios** se usan ampliamente, excepto para capas delgadas, combinando adecuadamente las amplitudes y frecuencias. Estos compactadores trabajan a frecuencias mayores que los usados en suelos, por encima de las 2000 r.p.m., del orden de 2500 a 3000 r.p.m., pues si son inferiores su eficacia baja mucho; con masas excéntricas más pequeñas para cumplir las exigencias de terminación y compactación. Las primeras pasadas suelen realizarse a frecuencias bajas. Para capas gruesas suelen emplearse amplitudes altas y frecuencias bajas y para las capas delgadas lo contrario.

### **2.8.1. Influencia de la composición de la mezcla**

Las mezclas asfálticas tienen composiciones muy variadas en función del tráfico diario esperado y las condiciones climatológicas que vayan a actuar. Por eso, cada una presenta también unas propiedades de compactación muy distintas. La aptitud de compactación o compactabilidad de la mezcla depende de la composición de áridos y también de la calidad y viscosidad del betún y además, de la temperatura de la mezcla.

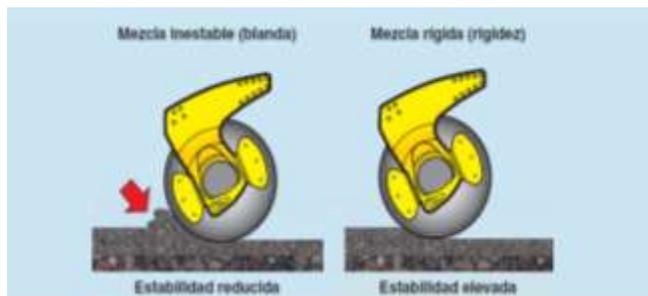
Las mezclas asfálticas para las carreteras con un elevado tráfico están concebidas para que tengan una gran resistencia a la deformación. Se distinguen por su armazón mineral voluminoso, es decir, tienen altos contenidos de gravilla triturada, áridos gruesos, una elevada proporción de granulometrías de machaqueo en el rango arenoso (arena de machaqueo) y mortero bituminoso rígido. Son difíciles de compactar y su compactación requiere mucho trabajo.

Las mezclas asfálticas para las calles con poco tránsito suelen tener, por lo general, una menor proporción de gravilla y una mayor cuota relativa de arena natural y mortero bituminoso blando.

Suelen ser fáciles de compactar, por lo que su compactación no requiere demasiado trabajo, pero, debido a una estabilidad insuficiente, pueden reaccionar de modo muy acusado cuando están calientes durante la aplicación si se utilizan máquinas compactadoras pesadas o si se aplica prematuramente la compactación por vibración.

Se pueden producir con mucha facilidad desplazamientos del material y abombamientos.

**Figura N°2.4** Comportamiento de compactación con distintas mezclas asfálticas

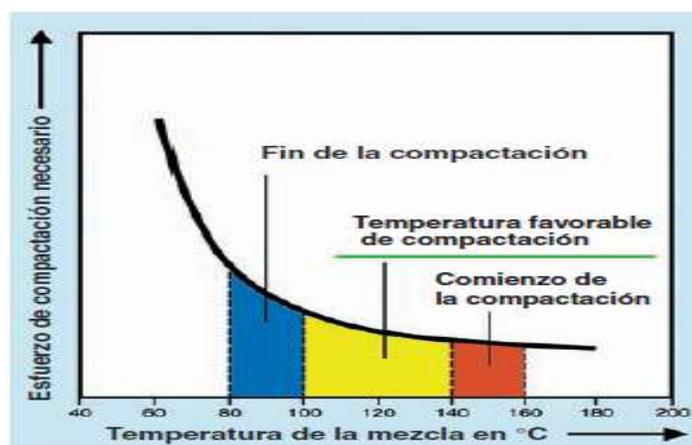


**Fuente:** Nociones fundamentales sobre compactación de mezclas asfálticas, BOMAG GmbH, Fayat Group, Alemania.

### 2.8.2. Influencia de la temperatura

La temperatura de la mezcla durante la compactación tiene una gran importancia a la hora de calcular el trabajo de compactación necesario. Cuando la mezcla tiene unas temperaturas elevadas, la baja viscosidad del asfalto contribuye al rendimiento de compactación del rodillo. El asfalto o betún actúa como un lubricante y reduce la fricción interna de la mezcla mineral. El asfalto va adquiriendo rigidez a medida que se enfría, con lo que a bajas temperaturas aumenta en gran medida el esfuerzo de compactación requerido.

**Figura N°2.5** Influencia de la temperatura de compactación con respecto al trabajo de compactación



**Fuente:** Nociones fundamentales sobre compactación de mezclas asfálticas, BOMAG GmbH, Fayat Group, Alemania

Por eso, como norma general, debe siempre comenzarse lo antes posible a compactar. El rango de temperaturas de compactación entre 100° y 140°C ha demostrado ser el más idóneo para las clases de betún más corrientes. A unas temperaturas entre 80 y 100° debería normalmente haberse concluido ya la compactación.

## **2.9. Métodos de diseño**

### **2.9.1. Método Marshall**

El concepto del método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero del departamento de carreteras del estado de Mississippi.

**Gráfico N°2.7** Máquina de Marshall.



**Fuente:** [www.topoequipos.com](http://www.topoequipos.com)

### **Objeto**

El método Marshall fue desarrollado en un principio para mezclas asfálticas en caliente y para mezclas que contengan una granulometría con tamaño máximo a 25mm debido a las exigencias que se presentan a través del pasar del tiempo el método modificado Marshall permite el diseño de mezclas asfálticas con agregados de tamaño máximo arriba de 38mm.

El método puede ser usado para diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentos, el objetivo de este método es obtener la cantidad de agregados necesarios para satisfacer las especificaciones requeridas garantizando un pavimento durable.

Las principales características de este método es la densidad – análisis de vacíos, estabilidad, deformación compactada de la probeta.

### **Determinaciones previas**

Determine la densidad real seca de cada árido que participa en la mezcla y la del filler, si lo hubiere.

Determine la densidad del cemento asfáltico a 25 ° C.

Determine la densidad máxima de la mezcla suelta, para un contenido de asfalto próximo al óptimo previsto.

Prepare las probetas.

Determine las densidades de las probetas.

Mida la Estabilidad y la Fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall.

### **Cálculos**

Cálculo de la densidad real seca ponderada de la mezcla de áridos: Cuando la mezcla está compuesta por dos o más áridos, todos con diferentes densidades reales, calcule la densidad real seca de la mezcla de áridos de acuerdo a la expresión:

$$\rho_{RS} = P_1 * \rho_{RS1} + P_2 * \rho_{RS2} + \dots + P_N * \rho_{RSn}$$

### **Donde:**

Prs = Densidad real seca de la mezcla de agregados.

P1, P2, Pn = Porcentajes en peso de los áridos 1, 2, ... n, expresados en forma decimal.

$\rho_{RS1}$ ,  $\rho_{RS2}$ ,  $\rho_{RSn}$  = Densidades reales secas de los áridos 1, 2,... n.

Cálculo de la densidad efectiva del árido. Calcule la densidad efectiva del árido mediante la expresión:

$$\rho E = \frac{100}{\frac{100 + P_b}{D_{mm}} - \frac{P_b}{\rho_b}}$$

**Donde:**

$\rho_E$  = Densidad efectiva del árido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$P_b$  = Porcentaje de asfalto referido al árido (%).

$D_{mm}$  = Densidad máxima de la mezcla suelta ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\rho_b$  = Densidad del asfalto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido. El asfalto absorbido se expresa como un porcentaje referido al árido y se calcula con la fórmula siguiente:

$$P_{ba} = \frac{1}{\rho_{RS}} - \frac{1}{\rho_E} * \rho_b * 100$$

**Donde:**

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido, referido al árido (%).

$\rho_{RS}$  = Densidad real seca del árido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\rho_E$  = Densidad efectiva del árido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\rho_b$  = Densidad del asfalto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Cálculo de la densidad máxima de la mezcla para distintos contenidos de asfalto. Al calcular el porcentaje de huecos de aire en la mezcla, es necesario conocer  $D_{mm}$  para cada porcentaje de asfalto considerado. Si bien esto se puede hacer a través del Método A0605 para cada contenido de asfalto, la precisión del ensaye es mejor cuando se aproxima al contenido de asfalto óptimo. Una vez obtenida la  $D_{mm}$  para un determinado contenido de asfalto y calculada la densidad efectiva del árido, calcule la  $D_{mm}$  de la mezcla para cualquier otro porcentaje de asfalto, de acuerdo a la fórmula.

$$D_{mm} = \frac{100 + P_b}{\frac{100}{\rho_E} - \frac{P_b}{\rho_b}}$$

**Donde:**

$D_{mm}$  = Densidad máxima de la mezcla ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$P_b$  = Porcentaje de asfalto referido al árido (%).

$\rho_E$  = Densidad efectiva del árido ( $\text{kg/m}^3$ ), de acuerdo a 8.

$\rho_b$  = Densidad del asfalto ( $\text{kg/m}^3$ )

Contenido de asfalto útil El contenido de asfalto útil ( $P_{bu}$ ) de una mezcla, corresponde al contenido de asfalto total menos el contenido de asfalto absorbido por el árido. Se calcula de acuerdo a la fórmula.

$$P_{bu} = P_b * P_{ba}$$

**Donde:**

$P_{bu}$  = Porcentaje de asfalto útil referido al árido (%).

$P_b$  = Porcentaje de asfalto referido al árido (%).

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido referido al árido (%).

#### **Cálculo de los Vacíos en el árido mineral**

El porcentaje de vacíos en el árido mineral (VAM), se calcula de acuerdo a la fórmula.

$$VAM = 100 * \left( 1 - \frac{G}{\rho_{RS}} * \frac{100}{100 + P_b} \right)$$

**Donde:**

VAM = Porcentaje de vacíos en el árido mineral (%).

$G$  = Densidad de la mezcla compactada ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\rho_{RS}$  = Densidad real seca del árido ( $\text{kg/m}^3$ ).

$P_b$  = Porcentaje de asfalto referido al árido (%).

Cálculo del porcentaje de huecos de aire en la mezcla. El porcentaje de huecos de aire en la mezcla ( $V_a$ ), se calcula de acuerdo a la fórmula.

$$V_a = 100 * \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}}$$

**Donde:**

$V_a$  = Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).

$D_{mm}$  = Densidad máxima de la mezcla ( $\text{kg/m}^3$ ), de acuerdo a 10.

$G$  = Densidad de la mezcla compactada ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Cálculo del porcentaje de huecos llenos con asfalto. El porcentaje de huecos llenos con asfalto (VLL), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$V_u = 100 * \left( 1 - \frac{V_a}{VAM} \right)$$

**Donde:**

$V_u$  = Porcentaje de huecos llenos con asfalto (%).

$V_a$  = Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).

$VAM$  = Porcentaje de vacíos en el árido mineral (%).

**Acondicionamiento de los datos**

Los valores de estabilidad obtenidos para probetas de espesores distintos a 63,5 mm deben corregirse, convirtiendo éstos a un valor equivalente a 63,5 mm, utilizando para ello los factores de corrección indicados.

Calcule el valor promedio de la densidad, fluencia y estabilidad corregida, para todas las probetas con un mismo contenido de asfalto.

Confeccione los siguientes gráficos, uniendo mediante una curva suave todos los puntos obtenidos:

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

**Determinación del contenido óptimo de cemento asfalto**

Para la determinación, se tomará en cuenta tres de las curvas representadas en los gráficos.

- El Porcentaje de Cemento asfáltico para la máxima densidad o peso específico.

- El Porcentaje de cemento asfáltico que corresponde al 4% de índice de vacíos.
- El Porcentaje de cemento asfáltico que corresponde a la máxima estabilidad.

**Tabla N°8** Criterios de diseño para mezclas Marshall.

Criterio de mezcla	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado		Muy pesado	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Numero de golpes	35		50		75		75	
Estabilidad en libras	750		1200		1800		2200	
Flujo en centésimas	8	18	8	16	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	55	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos R	70	80	65	78	65	75	65	75
Relación Filler Betún					0.8	1.2	0.8	1.2
Porcentaje de vacíos M	Ver Tabla N°39							

**Fuente:** Folleto pavimentos de la facultad de ingeniería civil de la UTA

### 2.10. Tráfico TPDA

La clasificación del tráfico está en función del tráfico promedio diario anual (TPDA) de los vehículos pesados esperada por el carril de diseño en el momento de poner en función la vía, luego de su construcción o de su rehabilitación. Los vehículos pesados no comprenden autos, camiones ni tractores sin remolque.

Livianos Menores de 50 vehículos.

Medio 50 a 200 vehículos.

Pesados 200 a 1000 vehículos.

Muy pesados Más de 1000 vehículos.

### 2.11. Método de Hubbard Field

Este método fue uno de los primeros en ser utilizados para el análisis de mezclas asfálticas en caliente, este método es aplicable en mezclas asfálticas de granulometría pequeña con material bituminoso y no es efectivo en mezclas de granulometría gruesa además que analiza el contenido de vacíos y agregado mineral.

## 2.12. Método de Hveem

Los conceptos del método Hveem de diseño de mezclas de pavimentos fueron desarrollados por Francis N. Hveem ingeniero de materiales e investigación, como la división de carreteras de California. Evalúa parámetros como la densidad, estabilidad pseudotriaxial y la resistencia de la mezcla al hinchamiento por presencia de agua. Este método presenta dos ventajas que es la compactación por amasado y el parámetro de resistencia.

### Capa de Rodadura

Determine el contenido óptimo de asfalto de la mezcla considerando las curvas de densidad, estabilidad y huecos en la mezcla. De dichas curvas se determinan los porcentajes de asfalto ( $P_b$ ) que entreguen:

- Máxima estabilidad ( $P_{b1}$ ).
- Máxima densidad ( $P_{b2}$ ).
- Contenido de asfalto para un 5% de huecos ( $P_{b3}$ ).

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores obtenidos, es decir.

$$P_b = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3}$$

Verifique que el contenido óptimo de asfalto, con una tolerancia de  $\pm 0,3$  puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla. En caso contrario, confeccione una nueva serie de muestras.

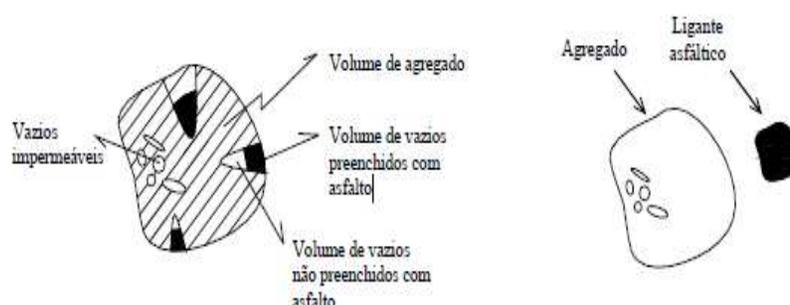
Capa de Base y Capa Intermedia (Binder) Seleccione como contenido óptimo de asfalto el porcentaje de ligante que, con una tolerancia de  $\pm 0,5$  puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla.

### 2.13. Método para determinar la densidad máxima de mezclas asfálticas sin compactar (método de rice)

#### Densidad máxima teórica

La densidad máxima teórica (DMT) es numéricamente igual a la relación entre la masa de agregado más ligante de asfalto y la suma de los volúmenes de agregado, huecos impermeables, huecos permeables no llenos de asfalto y asfalto total (Roberts et al., 1996), como se muestra en la figura N°2.7

**Figura N°2.7** (a) La DMT en mezcla asfáltica (b) volumen considerado en la determinación de la densidad real de los agregados y ligante asfáltico



**Fuente:** Artículo de investigación “Influencia de la densidad máxima teórica sobre la dosificación de las mezclas asfálticas” enero 2003. Brasil

El DMT, además de utilizarse para calcular el porcentaje de huecos de mezclas asfálticas compactadas, se utiliza para calcular la absorción de unión por los agregados, la densidad efectiva del agregado, el contenido efectivo de asfalto de la mezcla asfáltica y para proporcionar valores objetivos. Para la compactación de mezclas a través del compactador rotatorio (ASTM D 2041). Otro uso de DMT se encuentra en la determinación de la masa específica de mezclas asfálticas ya compactadas en el campo. Junto con el espesor del pavimento, la DMT es necesario para estimar la masa específica de la mezcla, sin extraer muestras, mediante el método nuclear (Schmitt et al., 1997). Actualmente, muchos estados estadounidenses especifican la masa específica de mezclas asfálticas obtenidas en el campo como porcentaje de DMT (Roberts et al., 1996).

### Densidad máxima teórica medida (método Rice)

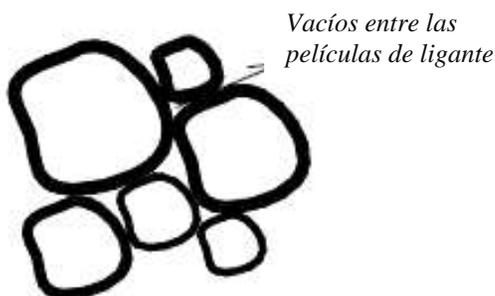
El documento o normativa referencial para este ensayo es ASTM 2041. El ensayo Rice, para la obtención de la densidad máxima teórica (Vacíos = 0) de la mezcla asfáltica, o Gmm, es nombrado así en honor a su inventor, James Rice, del estado norteamericano de California.

Este método de ensayo da como resultado la existencia de valores correctos de porcentajes de vacíos totales que afectan directamente a la calidad de la mezcla.

Parámetros como el contenido de vacíos totales en el diseño de la mezcla y el porcentaje de compactación durante la colocación de la mezcla asfáltica, son controlados por medio de la densidad máxima teórica medida (GMM).

En este procedimiento, se observa que la temperatura de ensayo gira alrededor de la temperatura ambiente, sin desestructuración de grumos formados por agregados y ligante asfáltico. La permanencia de estos grumos significa que los vacíos entre los dos materiales permanecen inalterados, con el vacío teniendo solo la función de expulsar los vacíos entre los grumos (figura N°2.8).

**Figura N°2.8** Vacíos o espacios entre las películas de ligante asfáltico o entre los grumos.



**Fuente:** Artículo de investigación “Influencia de la densidad máxima teórica sobre la dosificación de las mezclas asfálticas” enero 2003. Brasil

### Procedimiento de laboratorio

#### Objeto

Este método permite determinar la densidad máxima teórica de mezclas asfálticas sin compactar, a 25°C, así como el porcentaje de ligante absorbido por los áridos de la

mezcla, de modo de cuantificar la cantidad total o efectiva de asfalto requerida por la misma.

### **Equipo y materiales**

Los materiales y equipos necesarios para la realización del ensayo de laboratorio para la determinación de la densidad máxima teórica se describen a continuación.

**Figura N°2.9** Equipo para el ensayo de densidad Rice



**Fuente:** <https://bit.ly/2XE48xm>

### **Recipientes para vacío**

Se describen cuatro tipos de recipiente para vacío, cada uno de los cuales deberá ser capaz de mantener el vacío requerido, para lo que deberá disponer de los accesorios necesarios para la aplicación del procedimiento.

**Figura N°2.10** Equipo para el ensayo de densidad Rice



Fuente: Centro de investigaciones de ingeniería. Sección de asfaltos. USAC

El tamaño del recipiente por usar dependerá de la cantidad mínima de muestra, de acuerdo a la Norma ASTM 2041 incluida en “Tamaño de la muestra de ensayo”.

Descripción de los recipientes:

- Tipo A: matraz aforado de vidrio con capacidad aproximada de 2.000 ml.
- Tipo B: picnómetro de vidrio con capacidad aproximada de 4.000 ml.
- Tipo C: picnómetro de metal con tapa transparente y capacidad aproximada de 4.500 ml.
- Tipo D: picnómetro plástico con capacidad mínima de 10.000 ml.

### **Balanzas**

Balanza de capacidad 5.000 g y resolución 0,1 g.

Balanza de capacidad 30.000 g y resolución 1 g. 3.

Bomba de vacío capaz de producir una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg.

### **Manómetro de presión residual**

Capaz de medir una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg.

Baño de agua Capaz de controlar y mantener una temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### **Horno**

Horno de convección forzada; capaz de controlar y mantener la temperatura requerida dentro de  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

Otros Bol, espátula, piseta, vaselina sólida, termómetro y agua destilada.

### **Calibración de recipientes**

Recipientes Tipos A y B

Consiste en determinar a  $25^\circ\text{C}$  la masa exacta de agua necesaria para llenarlo.

Llene el picnómetro con agua destilada a  $25^\circ\text{C}$ .

Mantenga el recipiente en un baño de agua a  $25^\circ\text{C}$  durante 1 h.

Seque cuidadosamente el recipiente y péselo.

Designe la masa del picnómetro lleno con agua como MPa.

Recipientes tipos C y D Consiste en determinar, a una temperatura entre 22 y 27° C, la masa exacta de agua necesaria para llenarlo.

Asegure la cubierta y llene el picnómetro con agua destilada a 25° C hasta casi el tope (deje libre aproximadamente 50 mm).

Aplique vacío por 10 min, levante el picnómetro, primero de un lado y luego del otro, y déjelo caer desde aproximadamente 10 mm sobre la superficie.

Agregue agua destilada a 25° C hasta llenar completamente el picnómetro.

Elimine las burbujas que queden adheridas en las paredes interiores del recipiente

Seque prolijamente el exterior del picnómetro.

Pese el picnómetro lleno con agua y designe su masa como MPa.

Registre la temperatura del agua. Si ésta difiere del rango 22 - 27° C, repita el procedimiento de calibración.

### **Tamaño de la muestra de ensayo**

El tamaño de la muestra de ensayo deberá estar de acuerdo al tamaño máximo nominal (TMN).

**Tabla N°2.5** Tamaño de la muestra de ensayo

<b>TMN árido (mm)</b>	<b>Masa mínima de muestra (g)</b>
37.5	4000
25	2500
19	2000
12.5	1500
9.5	1000
4.75	500

**Fuente:** Manuales para el diseño de carreteras en Bolivia.

**Procedimiento**

Separe manualmente las partículas de la muestra teniendo cuidado de no fracturar el árido, de modo que las partículas de la fracción de árido fino no sean mayores que 4,75 mm. Si la mezcla no está lo suficientemente blanda para ser separada, colóquela en un horno y caliéntela sólo hasta que sea manipulable.

Enfríe la muestra hasta temperatura ambiente.

Pese la muestra y registre esta masa como Mm.

Coloque la muestra en el recipiente y agregue agua destilada hasta casi el tope de éste.

Aplique vacío por 10 min. Agitando su contenido periódicamente con un vibrador mecánico o en forma manual.

Inmediatamente después de remover el aire atrapado, continúe con uno de los siguientes procedimientos según el tipo de recipiente a utilizar:

**Recipientes tipos A y B:**

- Llene completamente el recipiente con agua destilada y colóquelo en un baño de agua a 25° C.
- Una vez alcanzada la temperatura de 25° C, deje el conjunto otros 10 min. Dentro del baño.
- Saque el recipiente del baño y séquelo exteriormente.
- Pese el recipiente lleno con agua y mezcla y registre su masa como MPam.

**Recipientes tipos C y D:**

- Llene completamente el recipiente con agua destilada a 25° C.
- Seque el exterior del recipiente.
- Pese el recipiente lleno con agua y mezcla y registre su masa como MPam.
- Registre la temperatura del agua; si no está en el rango de 22 a 27° C, repita el ensaye.

### Cálculos

Determine la densidad máxima de la mezcla sin compactar mediante la siguiente expresión, aproximando al entero.

$$D_{mm} = \frac{M_m}{M_m + M_{pa} - M_{pam}}$$

### Dónde:

$D_{mm}$  = Densidad máxima de la mezcla sin compactar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$M_m$  = Masa de la muestra a temperatura ambiente (g)

$M_{pa}$  = Masa del recipiente lleno con agua (g)

$M_{pam}$  = Masa del recipiente lleno con agua y muestra (g)

$\rho_T$  = Densidad del agua a la temperatura de ensaye ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

**Tabla N°2.6** Densidad del agua

Temperatura (°C)	$\rho_T$ ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
22	997,80
23	997,60
24	997,30
25	997,10
26	997,80
27	997,50

**Fuente:** Manuales para el diseño de carreteras en Bolivia

**CAPÍTULO III**  
**CRITERIOS DE RELEVAMIENTO**  
**DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS**

## CAPÍTULO III

### CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS

#### 3.1. Selección de materiales

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

##### 3.1.1. Materiales pétreos

La Ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales para la realización de mezclas asfálticas, pero en criterio asumido para escoger el banco de materiales fue por la disponibilidad más práctica que se tenía, ya que el banco escogido fue el que dispone la Alcaldía, ubicada en la comunidad de la Pintada, esta planta produce agregados pétreos para realización de pavimentos flexibles para las vías urbanas.

Se escogieron los siguientes materiales: agregado grueso 3/4'', agregado intermedio de 3/8'' y agregado fino.

**Figura N°3.1** Chancadora para la provisión de materiales



**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.1.2. Cemento asfáltico**

El Betún como ligante asfáltico C.A. 85-100 de procedencia Chilena de la empresa PROBISA también proporcionado por la misma institución siendo los mismos analizados en laboratorio de suelos, hormigones y asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

## **3.2. Caracterización de los agregados**

### **3.2.1. Análisis granulométrico por tamizado**

ASTM D422 & AASHTO T88

#### **Procedimiento para la preparación de muestras de suelos por cuarteos**

Mediante estos procedimientos, se pueden dividir las muestras de suelos obtenidas en el campo, para obtener porciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los diferentes ensayos que se necesite desarrollar.

**Figura N°3.2** Cuarteador metálico para separación mecánica



**Fuente:** Elaboración propia.

### **Análisis granulométrico**

Se denomina granulometría, a la distribución en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

**Figura N°3.3** Juego de tamices

**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

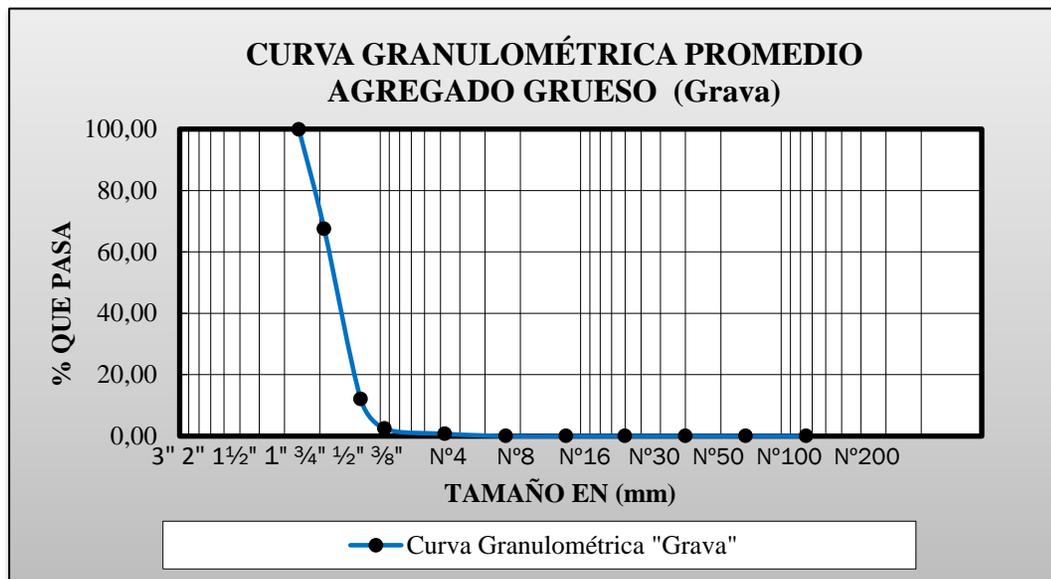
### Granulometría agregado grueso (grava)

**Tabla N°3.1** Resultado de granulometría del agregado grueso

<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>% que pasa del total</b>
1"	25.40	99.85
3/4"	19.00	67.53
1/2"	12.50	12.08
3/8"	9.50	2.43
N°4	4.75	0.73
N°8	2.36	0.00
N°16	1.18	0.00
N°30	0.60	0.00
N°50	0.30	0.00
N°100	0.15	0.00
N°200	0.075	0.00
base	-	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica N°3.1 Curva granulométrica agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

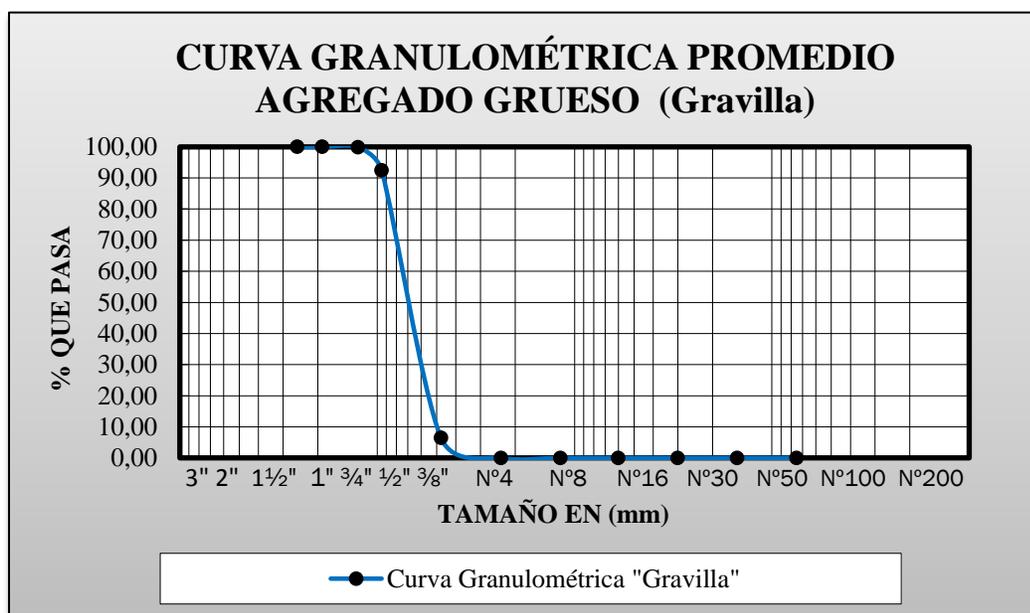
### Granulometría agregado grueso (gravilla)

Tabla N°3.2 Resultado de granulometría del agregado gravilla

Tamices	Tamaño (mm)	% que pasa del total
1"	25.40	100.00
3/4"	19.00	100.00
1/2"	12.50	99.85
3/8"	9.50	92.45
N°4	4.75	6.50
N°8	2.36	0.00
N°16	1.18	0.00
N°30	0.60	0.00
N°50	0.30	0.00
N°100	0.15	0.00
N°200	0.075	0.00
base	-	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica N°3.2 Curva granulométrica agregado gravilla



Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría agregado fino (arena)

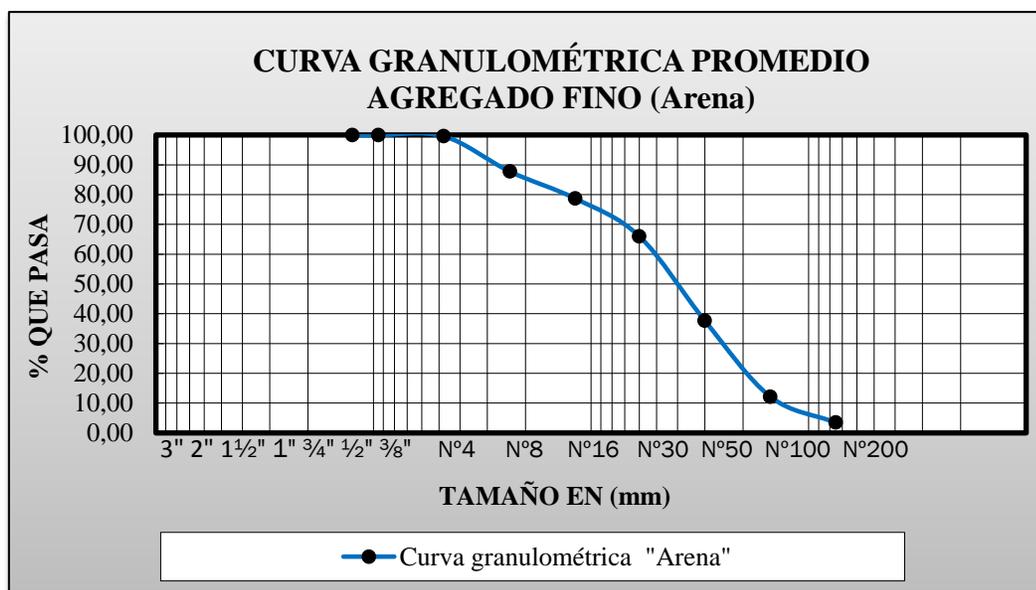
Tabla N°3.3 Curva granulométrica agregado fino

Tamices	Tamaño (mm)	% que pasa del total
1/2	12.5	100.00
3/8	9.50	100.00
N°4	4.75	99.60
N°8	2.36	87.74
N°16	1.18	78.66
N°30	0.60	66.02
N°50	0.30	37.69
N°100	0.15	12.17
N°200	0.075	3.46

base	-	0.00
------	---	------

Fuente: elaboración propia.

Gráfica N°3.3 Curva granulométrica agregado fino



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos

ASTM E127 & AASTTO T85-91

Este método tiene por objetivo de determinar la densidad real, la densidad neta, y la absorción de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

Figura N°3.4 Pesaje del material retenido en el tamiz N° 4



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.5** Muestra saturada grava gravilla



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.6** Peso de la muestra dentro del agua y uso del cesto



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

### Peso específico – agregado (grava)

**Tabla N°3.4** Resultados densidad real del agregado grueso

Peso específico a granel ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico sat. Con sup. seco ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	% de absorción
2.57	2.61	2.67	1.46

**Fuente:** Elaboración propia.

### Peso específico – agregado (gravilla)

**Tabla N°3.5** Resultados densidad real del agregado grueso

Peso específico a granel ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico sat. Con sup. seco ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Peso específico aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	% de absorción
2.55	2.60	2.69	2.05

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.3. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos

ASTM E 128 & AASTTO T 84-00

Este método tiene como objetivo determinar la densidad real y la densidad neta, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada un porcentaje en peso.

**Figuras N°3.7** Muestra sumergida en 24 horas y secado superficial con secadora



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figuras N°3.8** Verificación de la condición de la muestra saturada superficialmente seca



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figuras N°3.9** Matraz + muestra + agua



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figuras N°3.10** Peso del matraz con muestra y agua, secado del material en horno



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

### Peso específico – agregado fino (arena)

**Tabla N°3.6** Resultados densidad real del agregado fino

<b>P.E.A granel (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P.E. Saturado con sup-seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P.E. Aparente (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de absorción</b>
2.26	2.30	2.34	1.40

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.4. Método para determinar equivalente de arena

AASTTO D2419

El equivalente de arena está definido como el porcentaje de arena propiamente con respecto al equivalente de arena y de impurezas coloidales floculantes, partículas arcillosas.

Este método cuantifica el volumen total del material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominado su proporción volumétrica como equivalente de arena.

Establece un procedimiento rápido para determinar la proporción relativa de fimos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4.75 mm (N°4). Tiene como objetivo determinar la cantidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

**Figura N°3.11** Determinación del equivalente de arena



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.12** Muestra + agua + solvente, medición del equivalente de arena



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

### Equivalente de arena – agregado fino (arena)

**Tabla N°3.7** Resultados densidad real del agregado fino

Equivalente de arena (%)	Norma
87.28	> 50 %

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.5. Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en agregado grueso

ASTM D 5821-13

Este método de prueba cubre la determinación del porcentaje de una muestra de agregado grueso por masa o por conteo que consiste de partículas fracturadas que cumplan requisitos especificados.

**Figura N°3.13** Peso y muestra de las partículas fracturadas



**Fuente:** Elaboración propia.

### **Materiales gruesos**

#### **Material que pasa tamiz 3/4" y retiene 1/2"**

**Tabla N°3.8** Caras fracturadas 3/4" - 1/2"

<b>Lectura</b>	<b>Promedio</b>	<b>Especificaciones</b>
Peso de la muestra seca (gr)	500	>75
Peso retenido tamiz N°8 (gr)	4581.5	
Peso de caras no fracturadas (gr)	518.5	
Porcentaje de caras fracturadas (%)	89.15	

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **Material que pasa tamiz 1/2" y retiene 3/8"**

**Tabla N°3.9** Caras fracturadas 1/2" - 3/8"

<b>Lectura</b>	<b>Promedio</b>	<b>Especificaciones</b>
Peso de la muestra seca (gr)	500	>75
Peso retenido tamiz N°8 (gr)	4457.6	
Peso de caras no fracturadas (gr)	542.4	
Porcentaje de caras fracturadas (%)	89.15	

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.6. Determinación del peso unitario de los agregados

AASHTO T204

Este método de prueba nos permite describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados a una temperatura ambiente.

**Figura N°3.14** Peso de la muestra, apisonado de la muestra



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.15** Enrasado de las partículas grava, gravilla, arena



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

### Peso unitario del agregado grueso – grava

**Tabla N°3.10** Resultados peso unitario grava

<b>Peso unitario</b>	<b>Promedio</b>
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	1.390
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )	1.531

**Fuente:** Elaboración propia.

### Peso unitario del agregado grueso - gravilla

**Tabla N°3.11** Resultados peso unitario gravilla

<b>Peso unitario</b>	<b>Promedio</b>
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	1.390
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )	1.531

**Fuente:** Elaboración propia.

### Peso unitario del agregado fino - arena

**Tabla N°3.12** Resultados peso unitario arena

<b>Peso unitario</b>	<b>Promedio</b>
Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	1.563
Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )	1.732

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.7. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles

ASTM E 131: AASHTO T96-99

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.5 mm, mediante la máquina de Los Ángeles.

Este ensayo es para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, planos de cristalización, forma de las partículas, cuyo objetivo es determinar la dureza de los

materiales pétreos que se emplean en mezclas asfálticas, carpetas por riego, riegos de sello, material de balasto, etc.

**Figura N°3.16** Material que se obtuvo después del desgaste



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.17** Maquina y material de los ángeles



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

### Desgaste de los ángeles material grueso (grava)

Tabla N°3.13 Según el tamaño de material que se tenía

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±25	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±25	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>Peso total</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
<b>Numero de esferas</b>		12	11	8	6
<b>N° de revoluciones</b>		500	500	500	500
<b>Tiempo de rotación</b>		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°3.14 Según la gradación y peso de la muestra

Datos de laboratorio		
Gradación B		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/4"	1/2"	2500.3
1/2"	3/8"	2500.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°3.15 Resultados del desgaste de los ángeles

gradación	peso inicial	peso final	% de desgaste	especificación ASTM
B	5000.4	3589.6	28.21	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

### Desgaste de los ángeles material grueso – gravilla

**Tabla N°3.16** Según el tamaño de material que se tenía

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±25	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±25	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>Peso total</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
<b>Numero de esferas</b>		12	11	8	6
<b>N° de revoluciones</b>		500	500	500	500
<b>Tiempo de rotación</b>		15	15	15	15

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.17** Según la gradación y peso de la muestra

Datos de laboratorio		
Gradación C		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8"	1/4"	2500.4
1/4"	N°4	2500.4

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.18** Según la gradación y peso de la muestra

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000.8	3620.3	27.61	35% Max

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3. Caracterización del cemento asfáltico Probisa C.A. 85 / 100 Chilena

### 3.3.1. Ensayo de penetración

ASTM E D5 & AASTTO T49-97

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

La muestra se funde y se refresca bajo condiciones controladas. La penetración es medida con un penetrómetro por medio de una aguja normalizada se aplica a la muestra bajo condiciones especificadas.

**Figura N°3.18** Colocado del cemento asfáltico en el recipiente



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.19** Equipo y medición del punto de penetración



**Fuente:** Elaboración propia.

### Resultados

**Tabla N°3.19** Calculo del ensayo del penetrómetro

<b>Punto de penetración</b>		
<b>Promedio (0,1 mm)</b>	<b>Especificaciones</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
88	85	100

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.2. Método para determinar la densidad

ASTM E D71-94 & AASTTO T229-97

El ensayo de la densidad nos establece procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro, aforo el picnómetro, luego colocó el material bituminoso hasta la línea de aforo del picnómetro. Dejó enfriar durante no menos de 30 minutos temperatura ambiente a 25°C y compruebo que este en el nivel de aforo. Sumergirle en el baño de María manteniéndole a 25°C por el tiempo de 30 minutos para luego ser pesado.

**Figura N°3.20** Recipientes más material para determinar el peso específico

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.21** Peso de la muestra, muestra sumergida paño María



**Fuente:** Elaboración propia.

### Cálculos

**Tabla N°3.20** Cálculo de la densidad específica

<b>Densidad específica</b>		
<b>Promedio (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Especificaciones</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
1.004	1	1.05

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.3. Ensayo para determinar el punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland

ASTM E D1310 & AASTTO T79-96

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que pueda calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre.

Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

**Figura N°3.22** Equipo del punto de inflamación por el vaso de Cleveland



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.23** Medición de la temperatura cuando existen centellas de luz



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

**Tabla N°3.21** Resultados del ensayo de punto de inflamación

Inflamación		
Promedio (°C)	Especificaciones	
	Mínimo	Máximo
288	232	-

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.4. Método para determinar la película delgada en horno, 32 mm, 163°C y 5 hr

Norma ASTM D 2872 & AASHTO T240-06

Este método se usa para medir el efecto de calor y aire en una película en movimiento de materiales asfálticos semisólidos en forma rutinaria, y para los otros tipos, sólo en caso de investigación. Los efectos de este tratamiento se determinan en base a mediciones de las propiedades del asfalto antes y después del ensayo.

**Figura N°3.24** Material y taras para determinar la película delgada



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.25** Horno con capacidad de determinar temperaturas



**Fuente:** Elaboración propia.

**Resultados**

**Tabla N°3.22** Resultado del ensayo de película delgada

Película delgada		
Especificaciones		
Promedio	Mínimo	Máximo
0.8	-	1

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.3.5. Ensayo de punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola

Normas ASTM D-36 & AASHTO T53-96

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleando otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos.

**Figura N°3.26** Equipo para determinar el punto de ablandamiento

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.27** Material sumergido en baño maría para determinar temperaturas



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

**Tabla N°3.23** Resultados del ensayo del punto de ablandamiento

Ablandamiento		
Promedio (°C)	Especificaciones	
	Mínimo	Máximo
44	43	53

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.3.6. Ensayo para determinar la ductilidad

Normas ASTM D113-79 & AASHTO T51-93

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperaturas, mientras en otras como la inyección bajo losas de hormigón y en el relleno de grietas las propiedades más esenciales es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

**Figura N°3.28** Material y equipo para determinar la ductilidad



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.29** Equipo para determinar la ductilidad



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.30** Observación del punto de ductilidad



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

**Tabla N°3.24** Resultados del ensayo de ductilidad

Ductilidad		
Promedio (cm)	Especificaciones	
	Mínimo	Máximo
106	100	-

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.7. Ensayo de viscosidad Saybol-furol a 50°C

Norma ASTM D 244

Este método describe el procedimiento para la medida empírica de la viscosidad Saybolt de productos del petróleo a temperaturas especificadas entre 20 y 100°C.

**Viscosidad Saybolt Universal.** El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de mezcla que fluye a través de un orificio Universal, calibrado bajo condiciones especificadas.

**Viscosidad Saybolt Furol.** El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol, calibrado bajo condiciones especificadas. La viscosidad Furol es aproximadamente un décimo de la viscosidad Universal y se recomienda para productos del petróleo que tienen viscosidad mayor que 1000 s (Saybolt Universal) tales como combustible, aceites y otros materiales residuales. La palabra “Furol” es una contracción de fuel and road oils.

**Figura N°3.31** Material y equipo para determinar la viscosidad Saybolt furol



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.32** Material y control de la temperatura de la viscosidad saybolt furol



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

**Tabla N°3.25** Resultados del ensayo de la viscosidad saybolt furol

Viscosidad		
Promedio	Especificaciones	
(seg)	Mínimo	Máximo
203	85	-

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4. Diseño granulométrico – método Marshall

#### 3.4.1. Metodología

El método de Marshall, solo es aplicable en mezclas asfálticas en caliente para pavimentos que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de las mezclas asfálticas en caliente con graduación. Debido que la prueba de la densidad es de naturaleza empírica.

La mezcla se prepara mediante el método ASTM D3515, la selección de la curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica es de acuerdo al tamaño máximo de las partículas y la densidad del cemento asfáltico.

Luego de haber obtenido los resultados granulométricos por separado se realiza distintos tanteos con porcentajes de cada uno de los materiales hasta obtener que la curva granulométrica generada por esta mezcla se encuentre dentro de los límites de las especificaciones.

Como estos tanteos se los realiza matemáticamente adjunto el resultado obtenido para la elaboración de la mezcla propuesta para el diseño.

**Tabla N°3.26** Dosificación granulométrica método Marshall

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación			
		Grava (%) 25.00	Gravilla (%) 34.00	Arena (%) 40.00	Filler (%) 1.00
1"	25.4	1.85	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	404.07	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.5	693.05	2.59	0.00	0.00
3/8"	9.50	21.31	125.79	0.00	0.00
N°4	4.75	9.07	1461.04	8.04	0.00
N°8	2.36	0.00	110.58	237.14	0.00
N°16	1.18	0.00	0.00	181.52	0.00
N°30	0.60	0.00	0.00	252.89	0.00
N°50	0.30	0.00	0.00	566.59	0.00
N°100	0.15	0.00	0.00	510.46	0.00
N°200	0.075	0,00	0.00	174.15	0.00
BASE	-	0.00	0.00	69.21	50.00
PESO TOTAL		1250.00	1700.00	2000.00	50.00

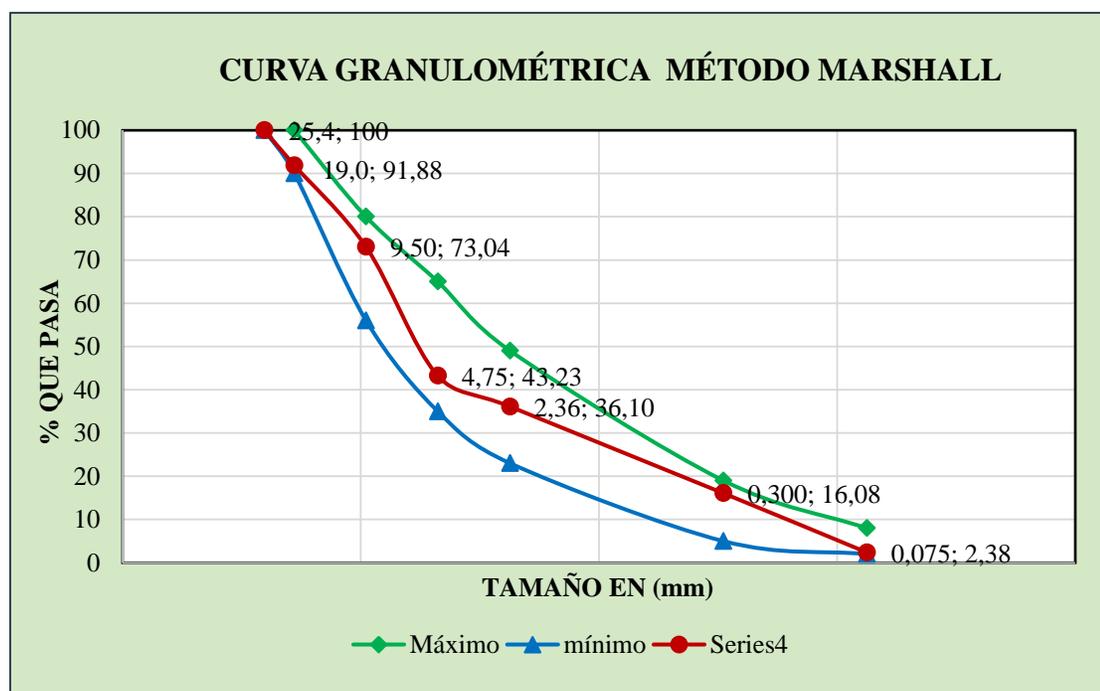
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.27** Dosificación formada granulométrica método Marshall

Tamices	Tamaño (mm)	Curva de dosificación				Especificaciones	
		Peso retenido 100	Retenido acumulado	% acumulado	% que pasa del total	ASTM D3515	
						Mínimo	Máximo
1"	25.4	1.85	1.85	0.04	99.96	100	100
3/4"	19.0	404.07	405.92	8.12	91.88	90	100
1/2"	12.5	695.64	1101.56	22.03	77.97	-	-
3/8"	9.50	246.43	1348.00	26.96	73.04	56	80
N°4	4.75	1490.38	2838.38	56.77	43.23	35	65
N°8	2.36	356.80	3195.18	63.90	36.10	23	49
N°16	1.18	181.52	3376.70	67.53	32.47	-	-
N°30	0.60	252.89	3629.59	72.59	27.41	-	-
N°50	0.30	566.59	4196.18	83.92	16.08	5	19
N°100	0.15	510.46	4706.64	94.13	5.87	-	-
N°200	0.075	174.15	4880.79	97.62	2.38	2	8
BASE	-	119.21	5000.00	100.00	0.00	-	-
<b>Peso total</b>		5000.00		2000.00	50.00		

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.4** Curva de diseño granulométrica método Marshall



**Fuente:** Elaboración propia.

### **Análisis**

Como se puede evidenciar. Nuestra curva granulométrica se encuentra dentro de la línea de control, son puntos de pasos obligados para la curva granulométrica del diseño Marshall. Por lo tanto, se trabaja con 6 porcentajes de acuerdo a la siguiente banda de cemento asfáltica para la elaboración de testigos.

### **Datos**

**Tabla N°3.28** Datos para dosificación de testigos de 4.5 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	4.5
% agregado	95.50
Peso del betumen	54
Peso del agregado	1146

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.29** Datos para dosificación de testigos de 5 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	5
% agregado	95
Peso del betumen	60
Peso del agregado	1140

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.30** Datos para dosificación de testigos de 5.5 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	5.5
% agregado	94.5
Peso del betumen	66
Peso del agregado	1134

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.31** Datos para dosificación de testigos de 6 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	6
% agregado	94
Peso del betumen	72
Peso del agregado	1128

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.32** Datos para dosificación de testigos de 6.5 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	6.5
% agregado	93.50
Peso del betumen	78
Peso del agregado	1122

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.33** Datos para dosificación de testigos de 7 % de betún

<b>Cemento asfáltico</b>	
Peso de la briqueta	1200
% de betumen	7
% agregado	93
Peso del betumen	8466
Peso del agregado	1116

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.34** Cantidad de cemento asfáltico y agregado pétreo

<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla</b>					
	<b>4.5%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>	<b>7.0%</b>
Porcentaje de Agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%	93.00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00	84.00
Peso de Grava (gr) *	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50	279.00
Peso de Gravilla (gr) *	389.64	387.60	385.56	383.52	381.48	379.44
Peso de Arena (gr) *	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Peso de Filler (gr) *	11.46	11.40	11.34	11.28	11.22	11.16
Peso total de la briqueta (gr) *	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.2. Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio

Antes de preparar la mezcla asfáltica, se debe de calentar el molde y base de compactación a una temperatura de 100 – 150 °C.

Primeramente, se pesa en fuentes las distintas fracciones de los agregados calculados para una briqueta de 1200 gr, seguidamente se calienta el cemento asfáltico a una temperatura superior de 100 °C hasta que este fluido

**Figura N°3.33** Preparación y peso de la muestra



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.34** Preparación de la muestra



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.35** homogenización de la mezcla y control de la temperatura



**Fuente:** Elaboración propia.

Mezclar los agregados con el cemento asfáltico, agitar durante el calentamiento de la mezcla para evitar sobrecalentamientos locales y evitar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

**Figura N°3.36** Preparación y colocación de material en las briquetas



**Fuente:** Elaboración propia.

Cuando la mezcla haya alcanzado los 140 °C se debe vaciar con una cuchara en el molde abierto, previamente pasado con un poco de aceite para el desmolde de briqueta, colocar un papel filtro para evitar que se pegue en la base molde para que se pueda quitar fácilmente una vez que este enfriado.

**Figura N°3.37** Equipo y compactación de briquetas



**Fuente:** Elaboración propia.

El molde tiene un diámetro de 4" la compactación se hace usando un martillo de 10 libras de peso, el martillo tiene una altura de caída libre de 18". Para el diseño de la

mezcla se aplicaron tres ensayos a los 75, 50, 35 golpes por cada cara de la briqueta, proyectadas para vías de tráfico pesado, se fabricaron 52 briquetas, Estas briquetas se van confeccionando con distintos porcentajes de asfalto que para nuestro caso es 4.5, 5%, 5.5 % y 6%, 6.5 %, 7 %. De estos porcentajes se realiza tres briquetas por cada uno las mismas que nos servirán para obtener las gráficas siguientes, vacíos, vacíos en el agregado minera y flujo, de estas gráficas conseguimos el porcentaje óptimo de asfalto.

**Figura N°3.38** Briquetas con los porcentajes de asfalto propuesto



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.3. Determinación de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall

#### Determinación de la densidad

La densidad real es la que considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Para calcular la densidad real de la mezcla se usa el método con superficie saturada seca, ya que este método se emplea para muestras con porcentajes de absorción menores a 2%.

#### Procedimiento

Dejar secar las muestras a temperatura ambiente, pesar y registrar este valor como **A** sumergir en baño de agua a  $25 \pm 1$  °C por 5 minutos, secar superficialmente, pesar y llamar este valor como **B** sumergir la muerta y pesar registrar como **C**.

**Figura N°3.39** Inmersión de briquetas en baño María



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.40** Peso briqueta sumergido



**Fuente:** Elaboración propia.

**Densidad real:**

$$Densidad = \frac{A}{B - C} \left( \frac{gr}{cm^3} \right)$$

**Donde:**

A = Masa de la probeta al aire (g)

B = Masa de la probeta al aire superficie seca (g)

C = Masa de la probeta sumergida (g)

### Ensayo de estabilidad y fluencia

Una vez que se hayan obtenido los valores para calcular la densidad medir con un vernier en cuatro puntos de la briqueta, las alturas, para sacar un promedio y usar un factor de corrección.

**Figura N°3.41** Medición de las dimensiones de las briquetas



**Fuente:** Elaboración propia.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser sumergidas en baño de agua a  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante un tiempo de 30 minutos.

**Figura N°3.42** Briqueta sumergida a  $60^{\circ}\text{C}$



**Fuente:** Elaboración propia.

Se limpia las superficies de las mordazas, se debe verificar brevemente la aplicación de la carga, que es el indicador del dial del anillo, que se encuentra en la posición correspondiente a cero.

**Figura N°3.43** Mordaza y calibración del dial de Marshall

**Fuente:** Elaboración propia.

Se coloca las briquetas en la mordaza y se aplica una carga a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto, hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C. Se anota como el valor de Estabilidad Marshall, el cual después se anotará como Kilogramo fuerza, para el sistema que se maneja en el medio. Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones flujo, en posición sobre la varilla guía, leer y anotar como valor de flujo de la briqueta, expresado en milímetros mm.

**Figura N°3.44** Equipo Marshall

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.45** Briqueta deformada

**Fuente:** Elaboración propia.

### Cálculos y resultados

$$Carga = (0.012 * Lec - 0.0812) * 102 * 2.20(lb)$$

Los factores de corrección para las diferentes alturas se encuentran en anexos

$$Carga\ corregida = \frac{briqueta_1 + briqueta_2 + briqueta_3}{3}$$

Finalmente se convierte al sistema que se maneja en el medio (SI)

$$1lb = 0.4535923kg$$

### Contenido óptimo del cemento asfáltico

Se deben realizar los cálculos del porcentaje de vacíos total de la mezcla y la relación betumen de vacíos (R.B.V.). De los cuales se obtendrá el valor de contenido de cemento asfáltico a 4% de vacíos y 35%, 50%, 75%, R.B.V.

### Cálculos y resultados

Densidad máxima teórica:

$$Densidad\ max.\ teo. = \frac{100}{\frac{\%C.A}{P.E.C.A.} + \left( \frac{100 - \%C.A.}{P.E.agreg.} \right)}$$

Porcentaje de vacíos:

$$\%vacios = \frac{Densidad\ max.\ teo. - Densidadprom.}{Densidad\ max.\ teo.} * 100$$

Porcentaje de vacíos agregado mineral (V.A.M.)

$$V.A.M. = \%vacios + \frac{Densidadprom. - C.A.}{P.E.C.A.} * 100$$

Relación betún vacíos (R.B.V.)

$$R.B.V = \frac{V.A.M. - \%vacios}{V.A.M.} * 100$$

## Resultados

### Gravedad específica de la combinación de agregados (G).

Cuando los ensayos para determinación de la gravedad específica, son realizados por separado (Grueso y Fino) el valor de la gravedad específica se debe calcular con la siguiente fórmula:

$$G = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

#### Donde:

G = Gravedad específica promedio

G1, G2,....., Gn = Valores de gravedad específica por fracción 1,2,....., n

P1, P2,....., Pn = Porcentaje en peso de la fracción 1,2,....., n

**Tabla N°3.35** Peso específico de los agregados

Peso específico de agregados		
Agregados	P.E.	%
Grava	2.67	25
Gravilla	2.69	34
Arena	2.34	41

**Fuente:** Elaboración propia.

$$G = \frac{56,77 + 42,23}{\frac{56,77}{2,68} + \frac{43,23}{2,34}} = 2,52$$

**Tabla N°3.36** Peso específico de los agregados el total

<b>Peso específico total</b>		
<b>Granulometría formada</b>	<b>P.E.</b>	<b>%</b>
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.68	56.77
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.34	43.23
<b>Peso Específico Total</b>	<b>2.52</b>	<b>100</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.37** Peso específico del ligante asfáltico

<b>Numero de golpes 35, 50, 75</b>	
<b>Asfalto</b>	<b>Cantidad promedio</b>
Cemento asfáltico	85/100
Peso específico C.A.	1.004

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Gravedad específica Bulk de la probeta compactada (G).**

Este ensayo se lo realiza para determinar la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada por medio del peso obtenido en seco en aire, S.S.S. en aire, y sumergido en agua.

$$G = \frac{G}{E + F}$$

#### **Donde:**

G = Gravedad específica Bulk de la briqueta compactada.

D = Masa briqueta seco en aire.

E = masa briqueta saturado superficie seca.

F = Masa briqueta sumergida en agua.

$$G = \frac{3962,90}{4022,90 + 2477,00} = 2,56$$

**Tabla N°3.38** Promedio de pesos específicos “Bulk”.

<b>Briqueta</b>	<b>Peso específico Bulk</b>
1,1	2,56
1,2	2,57
1,3	2,57
<b>Promedio</b>	<b>2,57</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Peso específico máximo teórico de la briqueta (H).**

Se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra para cada porcentaje de asfalto, el cual corresponde al que teóricamente se obtendrá si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y de agregado carente de vacíos con aire.

$$Densidad \text{ max. } .teo. = \frac{100}{\frac{\%C.A}{P.E.C.A.} + \left( \frac{100 - \%C.A.}{P.E.agreg.} \right)}$$

**Donde:**

% Agreg = Porcentaje de agregado seco.

Gagr = Gravedad específica del agregado.

% CA = Porcentaje de asfalto.

Gasf = Gravedad específica del asfalto.

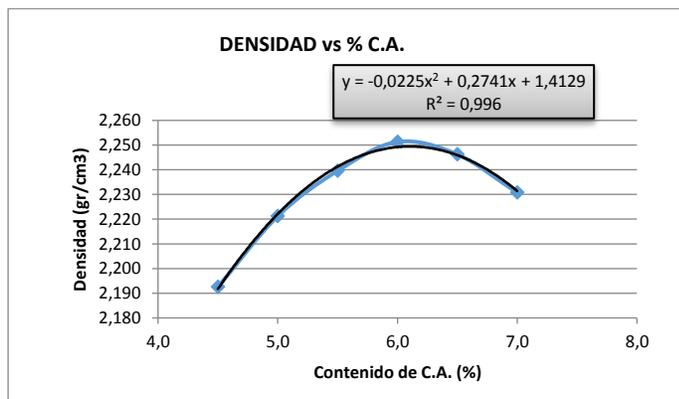
$$G = \frac{100}{\frac{4,5}{1,004} + \frac{100 - 4,5}{2,52}} = 2,36$$

**Tabla N°3.39** Tabla de resultados obtenidos de la práctica por el método Marshall a 35 golpes

N° de probeta	% de Asfalto		altura de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta cm <sup>3</sup>	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.88	1177.2	1183.7	648	535.7	2.20	2.19	2.35	6.88	16.71	58.81	650	1732.1	0.88	1525.46	1504	13	12.33
2			6.90	1190.7	1199.9	655	544.9	2.19						630	1678.2	0.88	1471.65		11	
3			6.97	1186.8	1199.7	659	540.7	2.19						658	1753.6	0.86	1514.80		13	
4	5.00	5.26	6.77	1186.8	1197.3	662	535.3	2.22	2.22	2.34	4.93	15.99	69.17	650	1732.1	0.91	1567.55	1576.4	14	13.00
5			6.86	1193.1	1199.8	661	538.8	2.21						665	1772.5	0.88	1567.59		12	
6			6.82	1190.0	1196.1	663	533.1	2.23						670	1786	0.89	1593.96		13	
7	5.50	5.82	6.68	1186.6	1191.6	664	527.6	2.25	2.24	2.32	3.40	15.67	78.32	680	1812.9	0.93	1681.45	1631.6	14	14.33
8			6.75	1189.1	1195.8	663	532.8	2.23						675	1799.4	0.91	1637.47		14	
9			6.79	1193.0	1199.1	666	533.1	2.24						657	1750.9	0.90	1575.85		15	
10	6.00	6.38	6.72	1186.9	1191.1	662	529.1	2.24	2.25	2.30	2.13	15.59	86.32	694	1850.6	0.92	1697.91	1678	15	16.00
11			6.62	1190.2	1192.4	664	528.4	2.25						665	1772.5	0.94	1665.08		17	
12			6.67	1192.5	1194.1	666	528.1	2.26						674	1796.7	0.93	1670.96		16	
13	6.50	6.95	6.49	1191.5	1192.1	655	537.1	2.22	2.25	2.28	1.59	16.13	90.16	682	1818.3	0.97	1754.63	1700.3	20	18.67
14			6.67	1186.1	1189.1	655	534.1	2.22						672	1791.3	0.93	1665.95		17	
15			6.71	1183.5	1186.7	672	514.7	2.30						685	1826.3	0.92	1680.24		19	
16	7.00	7.53	6.50	1183.7	1184.9	665	519.9	2.28	2.23	2.26	1.50	17.05	91.23	624	1662.1	0.96	1599.76	1697.4	21	20.67
17			6.43	1192.8	1194.1	654	540.1	2.21						693	1847.9	0.98	1810.93		21	
18			6.54	1191.3	1192.8	653	539.8	2.21						661	1761.7	0.95	1681.39		20	
Especificaciones			mínimo						3	13	75					1800		8		
			máximo						5	-	82					-		16		

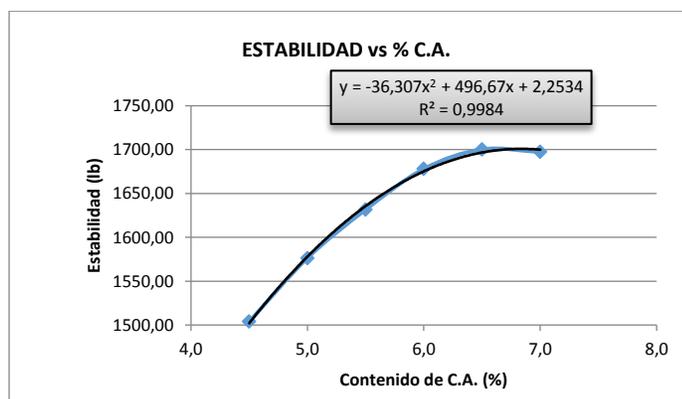
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.5** Gráfica densidad vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



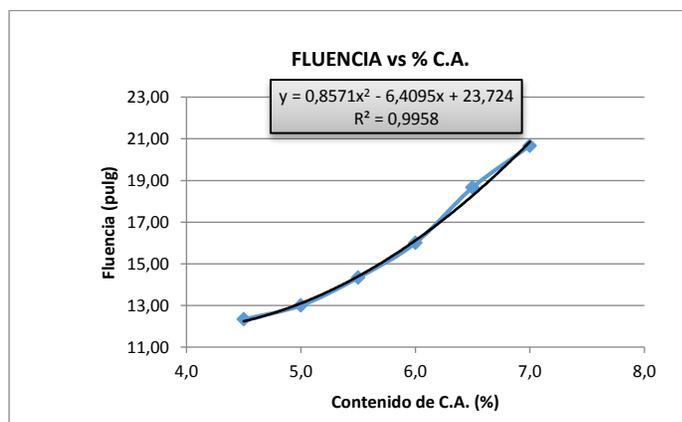
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.6** Gráfica de estabilidad vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



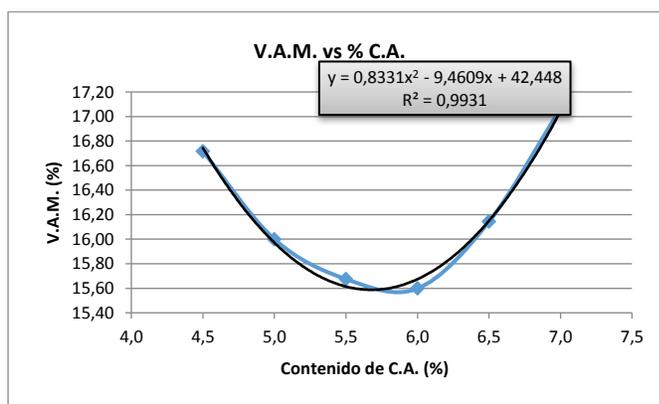
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.7** Gráfica fluencia vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



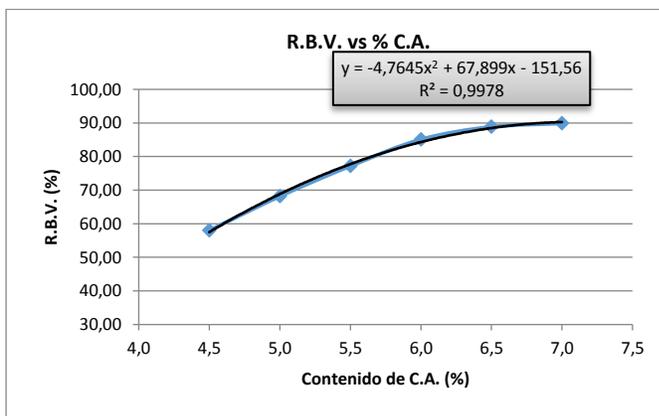
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.8** Gráfica V.A.M. vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



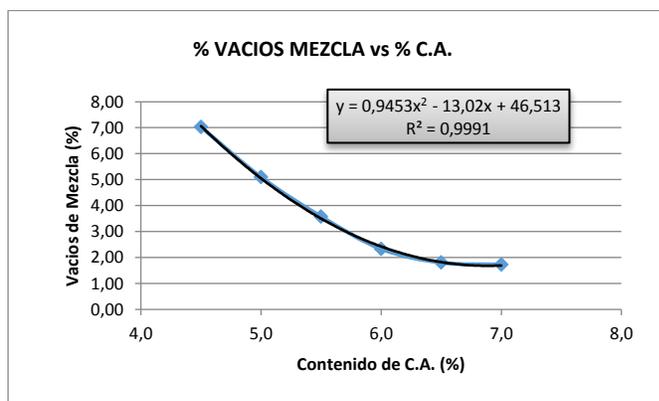
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.9** Gráfica de R.B.V. vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.10** Gráfica de % de vacíos en la mezcla vs porcentaje de C.A. (35 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.40** Resumen de los resultados del ensayo Marshall a 35 golpes

Contenido de cemento asfáltico	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Densidad máxima teórica	Fluencia promedio (pulgadas)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. vacíos agregado mineral (%)	R.B.V. relación betumen vacíos (%)
4.5	2.19	1503.969	2.35	12.33	6.88	16.71	58.81
5.0	2.22	1576.368	2.34	13.00	4.93	15.99	69.17
5.5	2.24	1631.591	2.32	14.33	3.40	15.67	78.32
6.0	2.25	1677.981	2.30	16.00	2.13	15.59	86.32
6.5	2.25	1700.271	2.28	18.67	1.59	16.13	90.16
7.0	2.23	1697.358	2.26	20.67	1.50	17.05	91.23

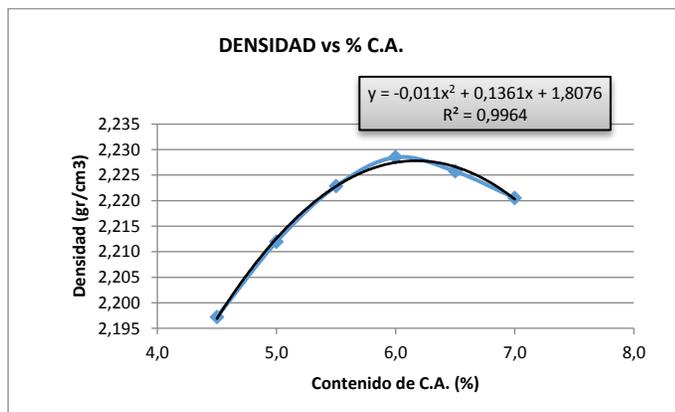
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.41** Tabla de resultados obtenidos de la práctica por el método Marshall a 50 golpes

N° de probeta	% de Asfalto		altura de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia			
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.82	1196.5	1199.2	655	544.2	2.20	2.20	2.35	6.68	16.53	59.57	550	1462.8	0.89	1305.57	1267.3	14	13.33	
2			6.78	1194.5	1199.3	657	542.3	2.20						515	1368.6	0.90	1235.14		13		
3			6.74	1190.9	1199.7	656	543.7	2.19						520	1382	0.91	1261.11		13		
4	5.00	5.26	6.74	1188.1	1195.5	658	537.5	2.21	2.21	2.34	5.33	16.34	67.41	750	2001.4	0.91	1826.26	1669.3	14	14.00	
5			6.78	1188.5	1195.4	658	537.4	2.21						675	1799.4	0.90	1623.98		15		
6			6.77	1187.3	1195.3	659	536.3	2.21						646	1721.3	0.91	1557.80		13		
7	5.50	5.82	6.70	1183.5	1188.1	660	528.1	2.24	2.22	2.32	4.12	16.30	74.73	776	2071.4	0.92	1910.86	1978.2	15	15.33	
8			6.73	1190.8	1195.2	656	539.2	2.21						875	2338	0.92	2139.25		15		
9			6.77	1179.4	1184.5	653	531.5	2.22						780	2082.2	0.91	1884.36		16		
10	6.00	6.38	6.72	1189.2	1193.2	657	536.2	2.22	2.23	2.30	3.12	16.44	81.01	890	2378.4	0.92	2182.16	2082.5	17	17.00	
11			6.70	1188.2	1191.1	660	531.1	2.24						865	2311.1	0.92	2131.94		17		
12			6.58	1189.7	1192.4	659	533.4	2.23						765	2041.8	0.95	1933.35		17		
13	6.50	6.95	6.58	1196.7	1198.5	655	543.5	2.20	2.23	2.28	2.48	16.89	85.30	715	1907.1	0.95	1805.86	1931	19	20.00	
14			6.48	1176.2	1178.1	666	512.1	2.30						765	2041.8	0.97	1975.41		20		
15			6.51	1188.4	1199.5	654	545.5	2.18						785	2095.6	0.96	2011.80		21		
16	7.00	7.53	6.45	1194.4	1196.8	654	542.8	2.20	2.22	2.26	1.95	17.43	88.83	590	1570.5	0.98	1531.27	1539.7	22	23.67	
17			6.52	1186.4	1188.2	655	533.2	2.23						595	1584	0.96	1517.63		25		
18			6.60	1180.4	1183.9	656	527.9	2.24						625	1664.8	0.94	1570.22		24		
Especificaciones			mínimo						3	13	75					1800		8			
			máximo						5	-	82					-		16			

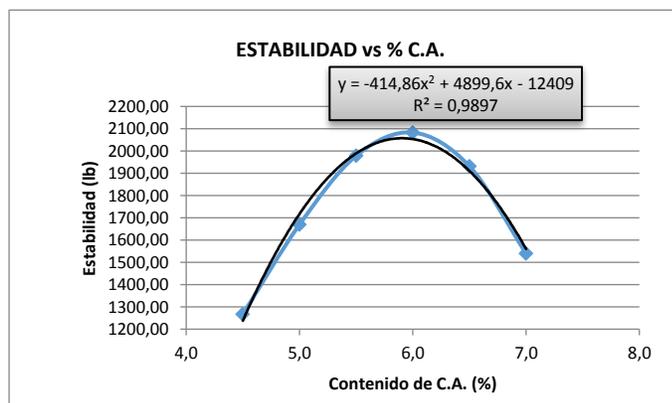
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.11** Gráfica de densidad vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



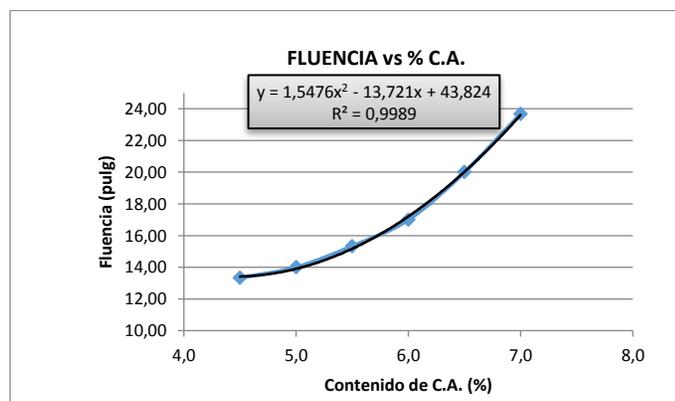
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.12** Gráfica de estabilidad vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



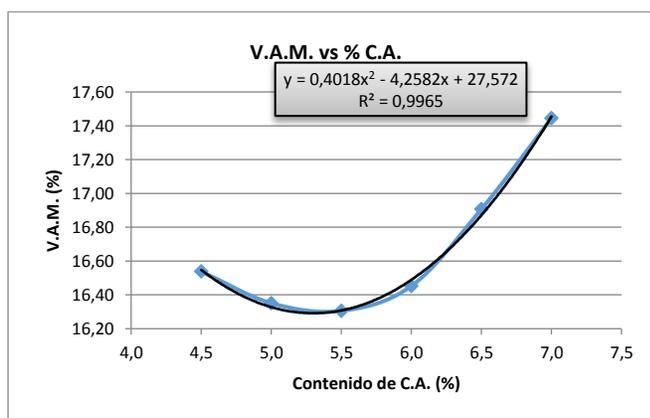
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.13** Gráfica fluencia vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



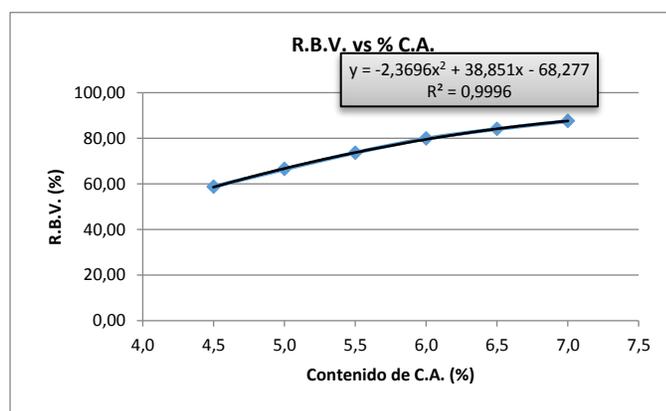
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.14** Gráfica de V.A.M. vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



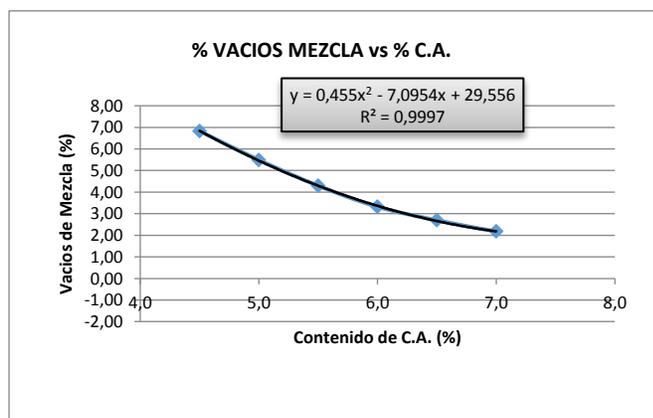
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.15** Gráfica de R.B.V. vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.16** Gráfica de % vacíos en la mezcla vs porcentaje de C.A. (50 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.42** Resumen de resultados del ensayo Marshall a 50 golpes

<b>Contenido de cemento asfáltico</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Estabilidad (libra)</b>	<b>Densidad máxima teórica</b>	<b>Fluencia promedio (pulgadas)</b>	<b>% de vacíos de mezcla total (%)</b>	<b>V.A.M. vacíos agregado mineral (%)</b>	<b>R.B.V. relación betumen vacíos (%)</b>
4.5	2.20	1267.269	2.35	13.33	6.68	16.53	59.57
5.0	2.21	1669.345	2.34	14.00	5.33	16.34	67.41
5.5	2.22	1978.155	2.32	15.33	4.12	16.30	74.73
6.0	2.23	2082.484	2.30	17.00	3.12	16.44	81.01
6.5	2.23	1931.026	2.28	20.00	2.48	16.89	85.30
7.0	2.22	1539.704	2.26	23.67	1.95	17.43	88.83

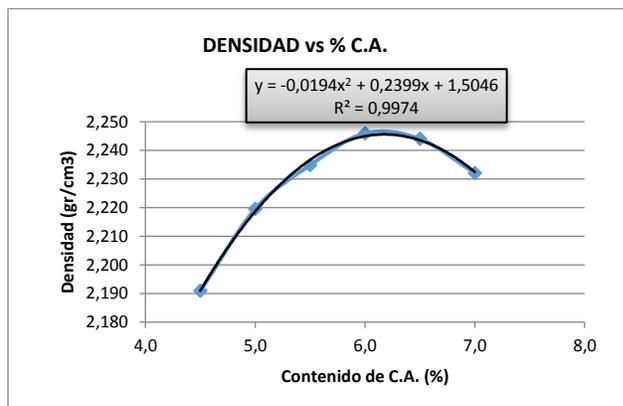
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.43** Tabla de resultados obtenidos de la práctica por el método Marshall a 75 golpes

N° de probeta	% de Asfalto		altura de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	grs/cm <sup>3</sup>	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.63	1186.7	1192.6	652	540.6	2.20	2.19	2.35	6.95	16.77	58.55	653	1740.2	0.94	1631.59	1593.09	13	12.33
2			6.73	1190.8	1199.2	655	544.2	2.19						655	1745.6	0.92	1597.19		12	
3			6.77	1187.7	1196.5	654	542.5	2.19						643	1713.2	0.91	1550.49		12	
4	5.00	5.26	6.68	1194.0	1199.1	662	537.1	2.22	2.22	2.34	5.00	16.06	68.85	770	2055.2	0.93	1906.23	1793.69	14	13.00
5			6.70	1189.8	1197.7	660	537.7	2.21						740	1974.5	0.92	1821.43		12	
6			6.79	1190.1	1199.4	664	535.4	2.22						689	1837.1	0.90	1653.41		13	
7	5.50	5.82	6.66	1190.9	1195.4	649	546.4	2.18	2.23	2.32	3.60	15.84	77.27	780	2082.2	0.93	1940.37	1946.28	15	14.00
8			6.59	1193.0	1196.0	668	528.0	2.26						788	2103.7	0.95	1988.00		14	
9			6.64	1193.0	1196.6	670	526.6	2.27						765	2041.8	0.94	1910.48		13	
10	6.00	6.38	6.40	1187.7	1188.9	660	528.9	2.25	2.25	2.30	2.36	15.79	85.03	799	2133.3	0.99	2106.66	2064.32	15	15.00
11			6.45	1189.3	1190.9	664	526.9	2.26						793	2117.2	0.98	2064.24		16	
12			6.53	1187.5	1189.3	658	531.3	2.24						792	2114.5	0.96	2022.07		14	
13	6.50	6.95	6.43	1187.1	1188.5	660	528.5	2.25	2.24	2.28	1.68	16.21	89.62	782	2087.5	0.98	2045.80	2036.04	15	16.00
14			6.38	1189.8	1192.6	657	535.6	2.22						779	2079.5	0.99	2063.87		16	
15			6.44	1189.7	1191.4	666	525.4	2.26						766	2044.5	0.98	1998.46		17	
16	7.00	7.53	6.58	1192.3	1199.4	659	540.4	2.21	2.23	2.26	1.44	17.00	91.55	721	1923.3	0.95	1821.16	1973.02	18	17.00
17			6.41	1191.6	1191.6	658	533.6	2.23						793	2117.2	0.99	2085.41		19	
18			6.36	1188.2	1195.5	669	526.5	2.26						756	2017.5	1.00	2012.49		14	
Especificaciones			mínimo						3	13	75					1800	8			
			máximo						5	-	82					-	16			

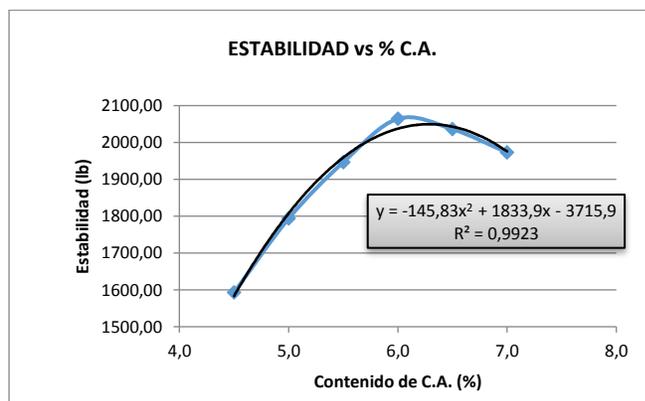
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.17** Gráfica de densidad vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



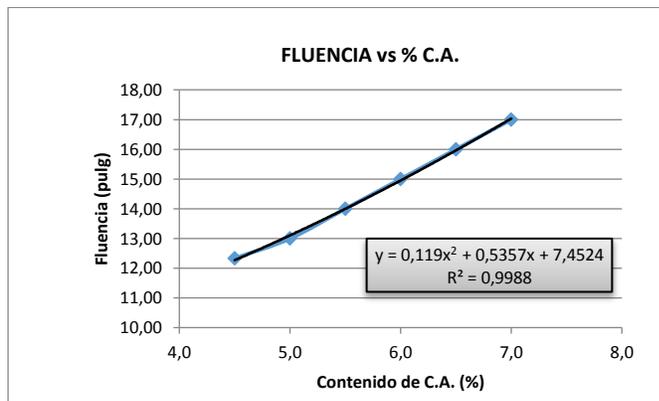
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.18** Gráfica de estabilidad vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



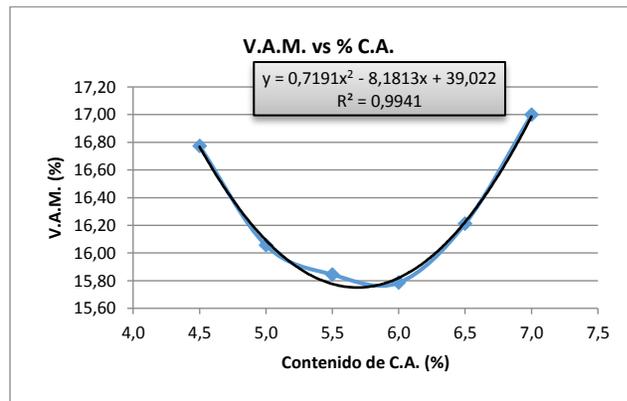
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.19** Gráfica fluencia vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



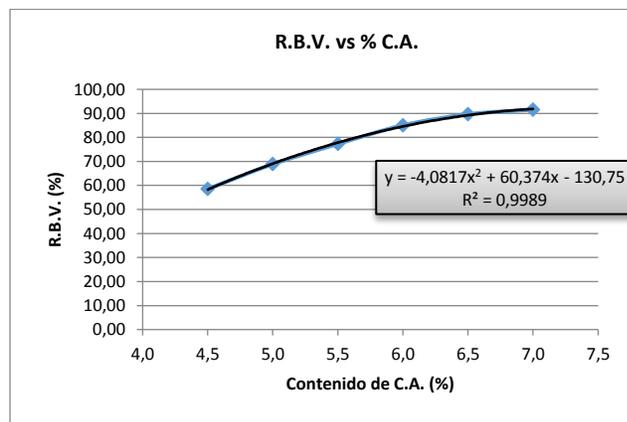
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.20** Gráfica de V.A.M. vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



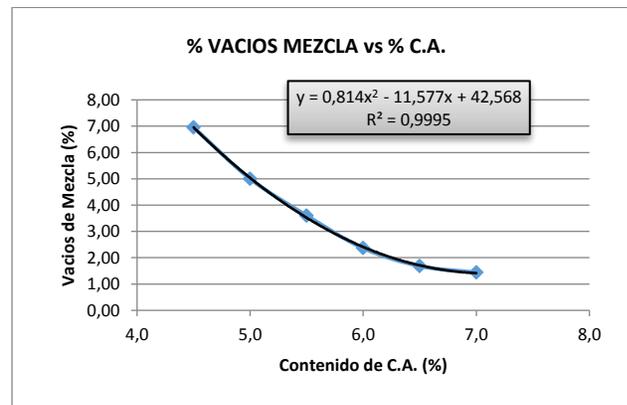
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.21** Gráfica de R.B.V. vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.22** Gráfica de % vacos en la mezcla vs porcentaje de C.A. (75 golpes)



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.44** Resumen de los resultados del ensayo Marshall a 75 golpes

Contenido de cemento asfáltico	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Densidad máxima teórica	Fluencia promedio (pulgadas)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. vacíos agregado mineral (%)	R.B.V. relación betumen vacíos (%)
4.5	2.19	1593.09	2.35	12.33	6.95	16.77	58.55
5.0	2.22	1793.69	2.34	13.00	5.00	16.06	68.85
5.5	2.23	1946.28	2.32	14.00	3.60	15.84	77.27
6.0	2.25	2064.32	2.30	15.00	2.36	15.79	85.03
6.5	2.24	2036.04	2.28	16.00	1.68	16.21	89.62
7.0	2.23	1973.02	2.26	17.00	1.44	17.00	91.55

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 3.4.4. Determinación del porcentaje óptimo de betumen

El contenido óptimo de betumen en una mezcla depende en gran medida de las características del agregado como la graduación y absorción. En la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con espesor suficiente para resistir los elementos de intemperismo para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe de ser grande porque se pierde resistencia y estabilidad. En las mezclas asfálticas es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo, ya que es una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tan que sea suficiente de resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa ya de más de resultar antieconómica puede provocar una pérdida de estabilidad en la carpeta, además de este exceso de asfalto puede ser resbalosa la superficie.

#### Máximos y mínimos de un vértice

$$f_{(x)} = ax^2 + bx + c$$

Condición para determinar el vértice:

$a < 0$  ocurre un máximo

$a > 0$  ocurre un mínimo

Determinación de las coordenadas de un vértice:

$$x_{\text{vertice}} = -\frac{b}{2a} \quad y_{\text{vertice}} = f(x_{\text{vertice}})$$

### **Ecuaciones en estudio 35 golpes**

#### **Estabilidad máxima**

$$y = -36.307x^2 + 496.67x - 2.2534$$

$$a = -36.307 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 496.67$$

$$c = -2.2534$$

Xmax = 6.84 contenido de ligante para la estabilidad máxima

Ymax = 1696.32 estabilidad máxima

#### **Densidad máxima**

$$y = -0.0225x^2 + 0.2741x + 1.4129$$

$$a = -0.0225 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 0.2741$$

$$c = -1.4129$$

Xmax = 6.09 contenido de ligante para la densidad máxima

Ymax = 2.25 densidad máxima

#### **Vacíos en la mezcla**

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3,4 o 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en Y para obtener el valor de la incógnita X.

$$y = -0.991x^2 + 13.205x + 44.139$$

$$a = -0.991 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 13.205$$

$$c = 44.139$$

Xmax = 6.52 contenido de ligante para los vacíos de la mezcla máxima

Ymax = 3.4 vacíos de la mezcla máxima

**Tabla N°3.45** Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para 35 golpes

<b>Densidad del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b>		
<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Estabilidad Marshall (lb)	1696.32	6.84
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2.25	6.09
Relación betún vacíos	3.40	5.52
<b>Promedio</b>		<b>6.15</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

### Ecuaciones en estudio 50 golpes

#### **Estabilidad máxima**

$$y = -414.86x^2 + 4899.6x - 12409$$

$$a = -414.86 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 4899.6$$

$$c = -12409$$

X<sub>max</sub> = 5.91 contenido de ligante para la estabilidad máxima

Y<sub>max</sub> = 2057.37 estabilidad máxima

#### **Densidad máxima**

$$y = -0.011x^2 + 0.1361x + 1.8076$$

$$a = -0.011 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 0.1361$$

$$c = -1.8076$$

X<sub>max</sub> = 6.19 contenido de ligante para la densidad máxima

Y<sub>max</sub> = 2.23 densidad máxima

#### **Vacíos en la mezcla**

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3,4 o 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en Y para obtener el valor de la incógnita X.

$$y = 0.455x^2 - 7.0954x + 29.556$$

$$a = -0.455 > 0 \text{ máximo}$$

$$b = -7.0954$$

$$c = 29.556$$

$X_{\max} = 5.52$  contenido de ligante para los vacíos de la mezcla máxima

$Y_{\max} = 4.18$  vacíos de la mezcla máxima

**Tabla N°3.46** Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para 50 golpes

<b>Densidad del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b>		
<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Estabilidad Marshall (lb)	2057.37	5.91
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2.23	6.19
Relación betún vacíos	4.18	5.52
<b>Promedio</b>		<b>5.57</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

### Ecuaciones en estudio 75 golpes

#### **Estabilidad máxima**

$$y = -414.86x^2 + 4899.6x - 12409$$

$$a = -145.83 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 1833.9$$

$$c = -3715.9$$

$X_{\max} = 6.29$  contenido de ligante para la estabilidad máxima

$Y_{\max} = 2049.70$  estabilidad máxima

#### **Densidad máxima**

$$y = -0.011x^2 + 0.1361x + 1.8076$$

$$a = -0.0194 < 0 \text{ máximo}$$

$$b = 0.2399$$

$$c = -1.5046$$

$X_{\max} = 6.18$  contenido de ligante para la densidad máxima

$Y_{\max} = 2.25$  densidad máxima

#### **Vacíos en la mezcla**

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3,4 o 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en Y para obtener el valor de la incógnita X.

$$y = 0.455x^2 - 7.0954x + 29.556$$

$$a = -0.814 > 0 \text{ máximo}$$

$$b = -11.577$$

$$c = 42.5680$$

$X_{\max} = 5.52$  contenido de ligante para los vacíos de la mezcla máxima

$Y_{\max} = 3.40$  vacíos de la mezcla máxima

**Tabla N°3.47** Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para 75 golpes

<b>Densidad del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b>		
<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Estabilidad Marshall (lb)	2049.70	6.29
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2.25	6.18
Relación betún vacíos	3.40	5.52
<b>Promedio</b>		<b>6.00</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.5. Elaboración de briquetas Marshall

Una vez encontrado el porcentaje de contenido óptimo de cemento asfáltico se procedió a la elaboración de 54 briquetas de las cuales todas estaban para control de estabilidad y flujo y control de resistencia en el ensayo de compresión, también se determinó la densidad teórica máxima por el método Rice.

La dosificación de los agregados es la siguiente:

**Tabla N°3.48** Dosificación mezcla flexible con porcentaje óptimo de C.A.

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava (%)	25
Ponderación de Gravilla (%)	34
Ponderación de Arena (%)	40
Ponderación de Filler (%)	1

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°3.49** Dosificación de mezclas asfálticas flexible con porcentaje óptimo de C.A.

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%	93.00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00	84.00
Peso de Grava (gr) *	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50	279.00
Peso de Gravilla (gr) *	389.64	387.60	385.56	383.52	381.48	379.44
Peso de Arena (gr) *	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Peso de Filler (gr) *	11.46	11.40	11.34	11.28	11.22	11.16
Peso total de la briqueta (gr) *	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

**Fuente:** Elaboración propia.

## **Análisis**

La densidad aumenta con el contenido de betumen hasta un máximo después del cual empieza a decrecer. La curva de estabilidad es similar a la de densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente, no siempre a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de la máxima densidad. Los valores del flujo aumentan con los incrementos en el contenido de asfalto.

El porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total disminuye al incrementar el contenido de betumen, teniendo hasta un mismo. El porcentaje de vacíos en los agregados minerales disminuye al incrementarse el contenido de betumen, hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar.

### **3.5. Gravedad específica máxima teórica o densidad máxima medida (Dmm) “ensayo Rice” Norma ASTM D 2041**

Norma AASHTO T209-08

Este ensayo se utiliza para determinar la cantidad real de vacíos que posee la mezcla asfáltica compactada.

El ensayo consiste en tomar la muestra de la mezcla asfáltica, segregarla hasta que todas las partículas se encuentren sueltas tomando la precaución de que no exista el fracturamiento de las partículas.

Pesar del picnómetro de vacíos solo y el picnómetro de vacíos más muestra.

Colocar la muestra segregada en el picnómetro de vacíos, posteriormente llenarla con agua las  $\frac{3}{4}$  remover manualmente durante 5 minutos, nuevamente llenar con agua.

A continuación, se la somete a la extracción de burbujas de aire por medio de la bomba de vacíos durante  $15 \pm 2$  min.

Finalmente, se llena con agua el picnómetro de vacíos procurando que queden burbujas en su interior y toma su peso en conjunto.

Se realiza tomando aproximadamente más de 1.500g de la mezcla asfáltica preparada, suelta y a temperatura ambiente para poder determinar la densidad máxima teórica Rice utilizando las fórmulas requeridas.

**Figura N°3.46** Peso del picnómetro a capacidad vacío y lleno



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.47** Peso del picnómetro, agitador mecánico



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°3.48** Equipo para determinar la densidad máxima teórica Rice



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1. Resultados obtenidos del ensayo rice

Realizado el ensayo para determinar la densidad de las mezclas asfálticas en caliente mediante el método Rice, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados a continuación.

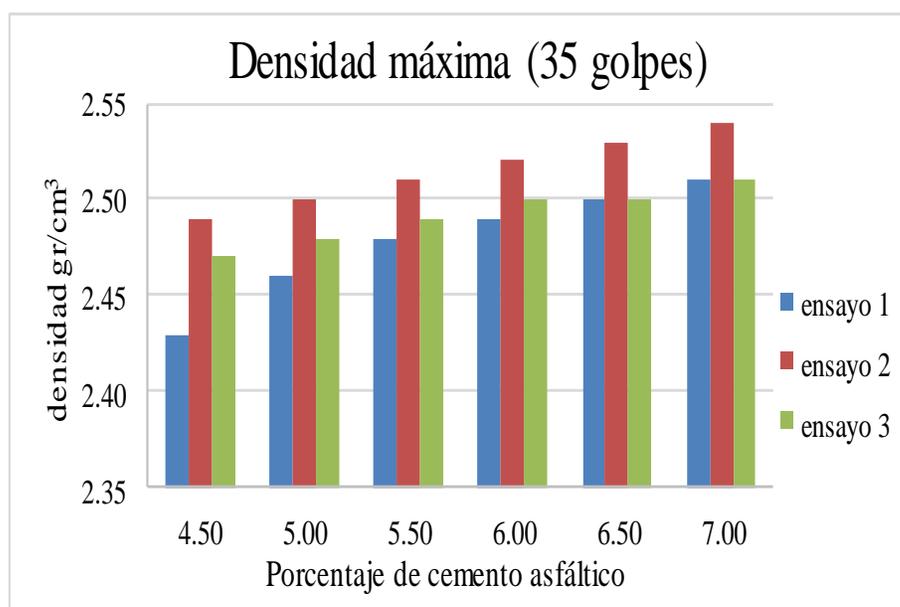
#### 3.5.1.1. Densidad máxima a 35 golpes

**Tabla N°3.50** Densidad máxima Rice promedio para 35 golpes

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad Máxima Medida (Método Rice) (gr/cm <sup>3</sup> )		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
4.50	2.43	2.49	2.47
5.00	2.46	2.50	2.48
5.50	2.48	2.51	2.49
6.00	2.49	2.52	2.50
6.50	2.50	2.53	2.50
7.00	2.51	2.54	2.51

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica N°3.23** Gráficas generadas para la obtención del cemento asfáltico óptimo



**Fuente:** Elaboración propia.

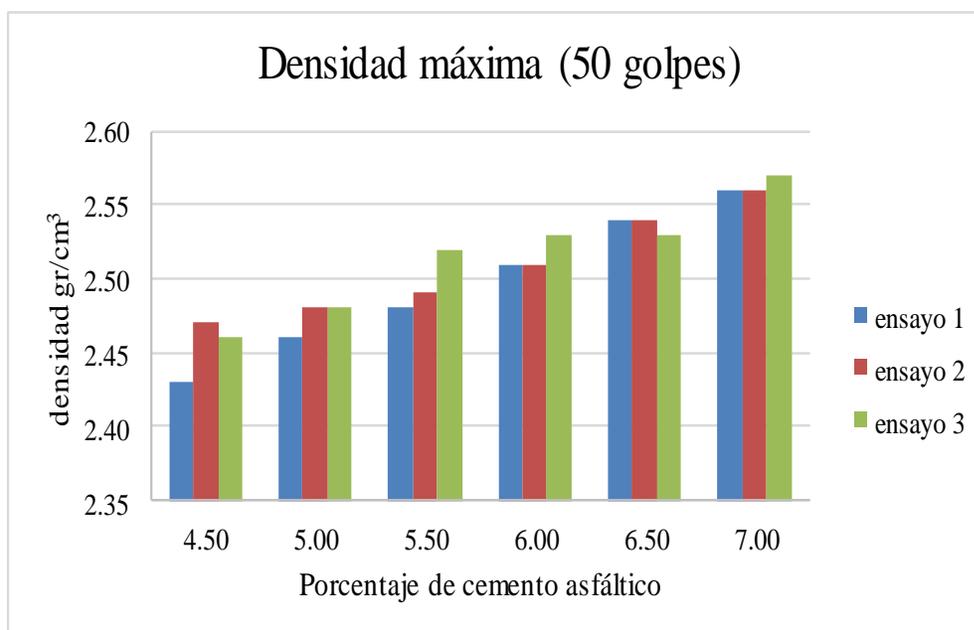
### 3.5.1.2. Densidad máxima a 50 golpes

Tabla N°3.51 Densidad máxima Rice promedio para 50 golpes

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad Máxima Medida (Método Rice) (gr/cm <sup>3</sup> )		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
4.50	2.43	2.47	2.46
5.00	2.46	2.48	2.48
5.50	2.48	2.49	2.52
6.00	2.51	2.51	2.53
6.50	2.54	2.54	2.53
7.00	2.56	2.56	2.57

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica N°3.24 Gráficas generadas para la obtención del cemento asfáltico óptimo



Fuente: Elaboración propia.

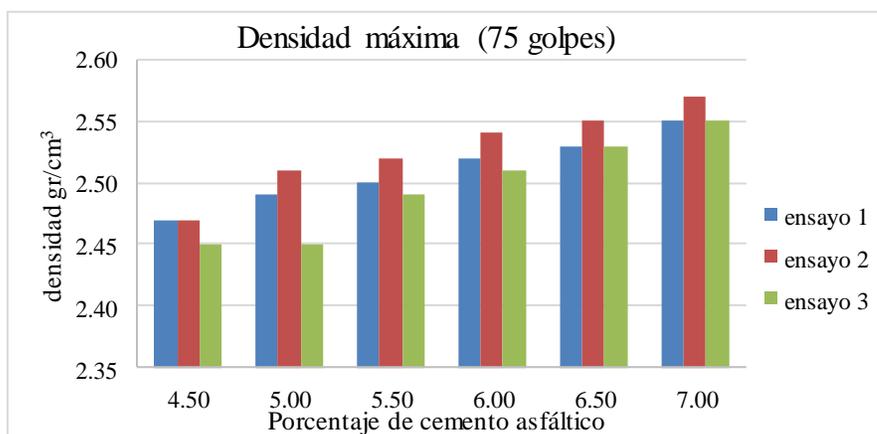
### 3.5.1.3. Densidad máxima a 75 golpes

Tabla N°3.52 Densidad máxima Rice promedio para 75 golpes

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad Máxima Medida (Método Rice) (gr/cm <sup>3</sup> )		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
4.50	2.47	2.47	2.45
5.00	2.49	2.51	2.45
5.50	2.50	2.52	2.49
6.00	2.52	2.54	2.51
6.50	2.53	2.55	2.53
7.00	2.55	2.57	2.55

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica N°3.25 Gráficas generadas para la obtención del cemento asfáltico óptimo



Fuente: Elaboración propia.

### Porcentaje de asfalto absorbido (J)

Es el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado seco, se calcula mediante la siguiente expresión.

$$J = \frac{(I - H) * 10^4}{I * H * \%Agreg}$$

#### Donde:

J = % Asfalto absorbido.

I = Valor ensayo Rice.

H = Gravedad específica teórica.

%Agreg = Porcentaje de agregado seco.

**Tabla N°3.53** porcentaje de cemento asfáltico absorbido

<b>J =</b>	<b>1.91</b>
I =	2.46
H =	2.35
% Agreg =	0.955

**Fuente:** Elaboración propia.

**Volumen ocupado por el agregado con respecto a la probeta (K)**

$$K = \frac{\%Agreg \times G}{Gagr}$$

Dónde:

% Agreg = Porcentaje de agregado seco.

G = Gravedad específica Bulk de la briqueta compactada.

Gagr = Gravedad específica del agregado.

**Tabla N°3.53** volumen ocupado por el agregado

<b>K =</b>	<b>82.95</b>
% Agreg =	0.955
G =	2.19
G agreg =	2.52

**Fuente:** Elaboración propia.

**Volumen de vacíos en aire (L)**

$$L = \left(1 - \frac{G}{I}\right) \times 100$$

Dónde:

G = Gravedad específica Bulk de la briqueta compactada.

I = Gravedad específica de la mezcla asfáltica método Rice.

**Tabla N°3.53** volumen de vacíos de aire

<b>L =</b>	<b>10.94</b>
G =	2.19
I =	2.46

**Fuente:** Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO

#### 4.1. Análisis de los resultados obtenidos utilizando el método de rice

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades volumétricas (densidades máximas teóricas medidas), de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente utilizando el método de Rice, en este capítulo se realizará un análisis utilizando para ello la estadística descriptiva, así como también se presentarán sus respectivas gráficas para una mejor apreciación del comportamiento en los resultados obtenidos.

##### 4.1.1. Densidad máxima teórico medida (método rice) en mezclas asfálticas

Los resultados que se presentan fueron realizados conforme indicaciones de la norma de ensayo ASTM 2041.

La densidad máxima y gravedad específica en mezclas asfálticas son propiedades fundamentales cuyos valores están influenciados por la compactación de la mezcla en términos de tipo y cantidades de agregados y materiales bituminosos.

El método Rice permite determinar la densidad máxima teórica medida de las mezclas asfálticas sin compactar, a 25 °C, así como el porcentaje de ligante absorbido por los agregados pétreos de la mezcla, de modo que se pueda cuantificar la cantidad total o efectiva de asfalto requerida por la misma.

La densidad de Rice se lo calcula mediante la siguiente fórmula.

$$Dmm = \frac{Mm}{Mm + Mpa - Mpam}$$

Donde:

Dmm = Densidad máxima medida de la mezcla sin compactar (gr/cm<sup>3</sup>)

Mm = Masa de la muestra a temperatura ambiente (gr)

Mpa = Masa del recipiente lleno con agua (gr)

Mpam = Masa del recipiente lleno con agua y muestra (gr)

**Tabla N°4.1** Cuadro de resultados de la densidad medida Rice

<b>Densidad Máxima Medida (Método Rice) (gr/cm<sup>3</sup>)</b>						
<b>Contenido de cemento asfáltico (%)</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Media</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>35 golpes</b>						
4.50	2.43	2.49	2.47	2.46	2.43	2.49
5.00	2.46	2.50	2.48	2.48	2.46	2.50
5.50	2.48	2.51	2.49	2.49	2.48	2.51
6.00	2.49	2.52	2.50	2.50	2.49	2.52
6.50	2.50	2.53	2.50	2.51	2.50	2.53
7.00	2.51	2.54	2.51	2.52	2.51	2.54
<b>50 golpes</b>						
4.50	2.43	2.47	2.46	2.45	2.43	2.47
5.00	2.46	2.48	2.48	2.47	2.46	2.48
5.50	2.48	2.49	2.52	2.50	2.48	2.52
6.00	2.51	2.51	2.53	2.52	2.51	2.53
6.50	2.54	2.54	2.53	2.54	2.53	2.54
7.00	2.56	2.56	2.57	2.56	2.56	2.57
<b>75 golpes</b>						
4.50	2.47	2.47	2.45	2.46	2.45	2.47
5.00	2.49	2.51	2.45	2.48	2.45	2.51
5.50	2.50	2.52	2.49	2.50	2.49	2.52
6.00	2.52	2.54	2.51	2.52	2.51	2.54
6.50	2.53	2.55	2.53	2.54	2.53	2.55
7.00	2.55	2.57	2.55	2.56	2.55	2.57

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.2** Resumen de los resultados de las densidades determinadas con el método Rice

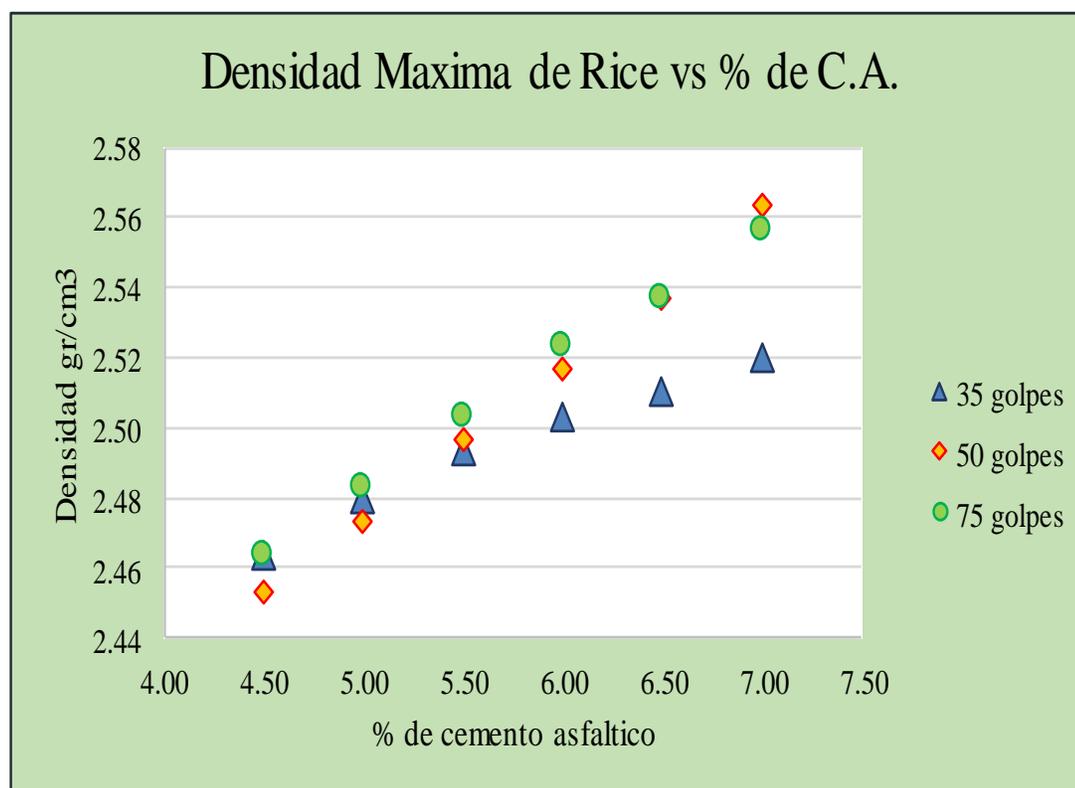
<b>Contenido de cemento asfáltico (%)</b>	<b>Densidad Máxima Medida (Método Rice) (gr/cm<sup>3</sup>)</b>		
	<b>35 golpes</b>	<b>50 golpes</b>	<b>75 golpes</b>
4.50	2.46	2.45	2.46
5.00	2.48	2.47	2.48
5.50	2.49	2.50	2.50
6.00	2.50	2.52	2.52
6.50	2.51	2.54	2.54
7.00	2.52	2.56	2.56

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla de resumen de las densidades máximas obtenidas mediante el método Rice, los valores promedios fluctúan entre 2.45 gr/cm<sup>3</sup> y 2.56

gr/cm<sup>3</sup>, de los cuales los valores mínimos se encuentran para mezclas asfálticas con contenido de ligante de 7% mientras que las mezclas asfálticas con contenido de ligante de 4.5 % obtuvieron valores máximos de entre 2.52 gr/cm<sup>3</sup> a 2.56 gr/cm<sup>3</sup>.

**Figura N°4.1** Resumen de los resultados de las densidades determinadas con el método Rice



**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura mostrada se puede observar el comportamiento de las densidades máximas determinadas utilizando el método Rice, con relación a los diferentes porcentajes de cemento asfáltico. Se observa que las densidades mayores a 2.5 gr/cm<sup>3</sup> se obtienen con cantidades de ligante de entre 6.0% y 7.0 %, pero según va decreciendo la cantidad de ligante en la mezcla asfáltica también la densidad conseguida también decrece, siendo así que para una cantidad de 4.5% se obtuvieron valores cerca 2.46 gr/cm<sup>3</sup> mientras que la densidad más alta se consiguió para un 7.0% de ligante.

#### 4.1.2. Densidad máxima teórica obtenida mediante el método Marshall

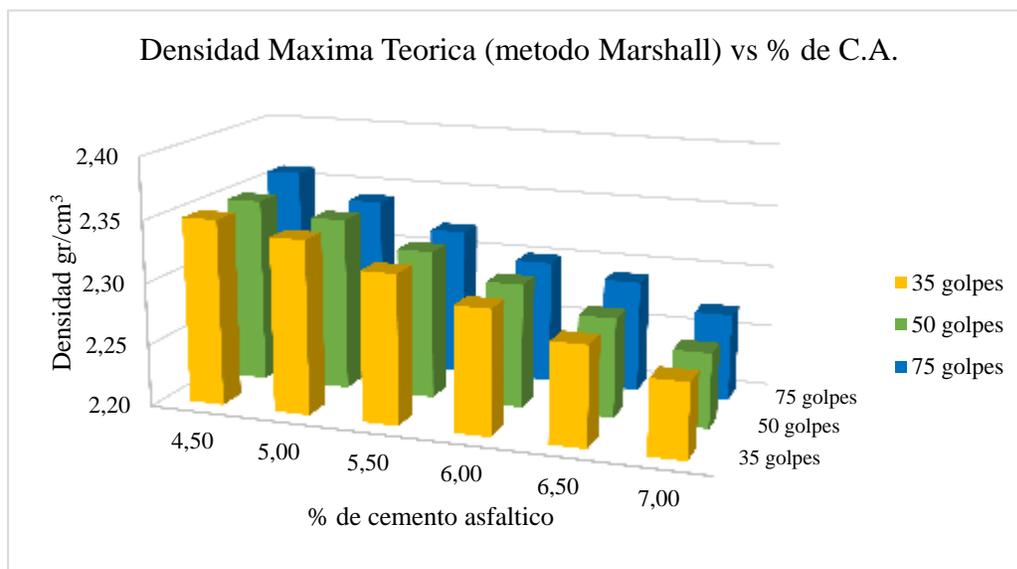
**Tabla N°4.3** Resumen de los resultados de las densidades determinadas con el método Marshall

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad Máxima Medida (Método Marshall) (gr/cm <sup>3</sup> )		
	35 golpes	50 golpes	75 golpes
4.50	2.35	2.35	2.36
5.00	2.34	2.34	2.34
5.50	2.32	2.32	2.32
6.00	2.30	2.30	2.30
6.50	2.28	2.28	2.29
7.00	2.26	2.26	2.27

**Fuente:** Elaboración propia.

De los resultados de densidad obtenidos mediante la metodología Marshall, para diferentes cantidades de ligante aplicadas a la mezcla asfáltica, y en distintos grados de compactación, tal como se muestra en la tabla 4.3, en la misma se observa la influencia que tiene el grado de compactación en la determinación de la densidad de una mezcla asfáltica. Ya que a medida que la cantidad de golpes para la compactación de la mezcla asfáltica aumenta también se consigue el aumento en la densidad de la misma.

**Figura N°4.2** Densidades determinadas por el método Marshall



**Fuente:** Elaboración propia.

Como se puede notar en la gráfica 4.2 las densidades obtenidas decrecen a medida que la cantidad de ligante asfáltico aumenta en una mezcla asfáltica, viéndose este mismo resultado para los diferentes grados de compactación (35, 50 y 75 golpes). Consiguiéndose mejores resultados de densidad en mezclas con un contenido de ligante asfáltico 4.5%. Para los tres grados de compactación siendo estas entre  $2.35 \text{ gr/cm}^3$  y  $2.36 \text{ gr/cm}^3$ .

#### **4.1.3. Procedimiento de la adición de mezcla flexible en caliente con distintos porcentajes de asfalto**

Después de haber realizado el diseño de mezcla asfáltica hecha con agregados pétreos y de haber hecho la mezcla asfáltica con agregado pétreo, hemos notado que los agregados utilizados para el estudio tiene mayor afinidad con el cemento asfáltico y como consecuencia de esto las mezclas de concreto asfáltico requieren una menor cantidad de porcentaje de cemento asfáltico para que sus partículas queden perfectamente cubiertas y también con bajo porcentaje de cemento asfáltico se logra obtener las características necesarias que regulan las especificaciones como por ejemplo: VMA, VRA, % VACÍOS, y al obtener estos se encuentran dentro de las especificaciones.

También hemos podido observar en los diseños hechos, que la experiencia dictamina que no se deben producir mezclas con materiales cuyo tamaño cae directamente sobre la línea de densidad máxima ya que frecuentemente no queda suficiente espacio en la mezcla para el asfalto líquido, y se produce un material tipo plástico.

Otro problema se produce cuando el diseño de la mezcla acerca su densidad a la línea de densidad máxima. Las variaciones en la granulometría de la mezcla de la pila del material hacen que la curva oscile hacia ambos lados de la línea de densidad máxima, causando granulometría discontinua en la mezcla.

Una mezcla cuya densidad esta justo sobre la línea de densidad máxima pocas veces contiene suficientes vacíos en el agregado mineral (VAM), especialmente si el diseño contiene un porcentaje relativamente alto del material que pasa por una criba de 0.75 milímetros (tamiz numero 200); si se escoge un nivel de granulometría en una línea aproximadamente paralela a la línea de densidad máxima, se produce una mezcla de granulometría uniforme que resulta muy tolerante. Sin embargo, la línea de densidad

máxima debe usarse solamente como una guía para obtener una granulometría uniforme. Otros criterios, tales como los VAM, la estabilidad y otras especificaciones también deben cumplirse.

Una línea ligeramente curva da buenos resultados. Sin embargo, el posible beneficio que el diseñador intenta lograr al permitir la granulometría discontinua frecuentemente queda anulado por los problemas de segregación.

Al graficar la granulometría de una mezcla, incluir puntos de tantos tamaños de criba o tamiz como sea posible.

#### **4.2. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico para 35 golpes.**

De la tabla se obtiene los valores máximos de la densidad Bulk, de la estabilidad, de la gráfica % de asfalto Vs. vacíos en aire, se tomará en cuenta el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente al 4% de vacíos en aire con su respectivo contenido de asfalto ideal para la mezcla.

**Tabla N°4.4** Valores tomados en cuenta para contenido óptimo de asfalto.

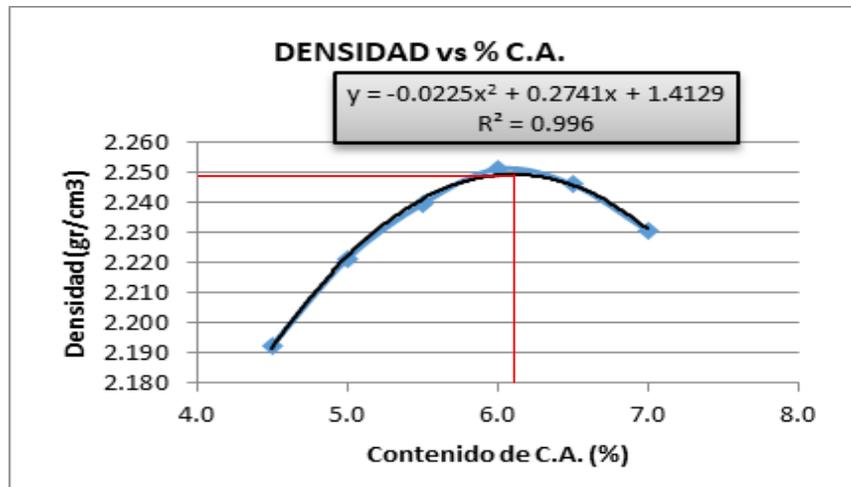
<b>Datos</b>	<b>Valores máximos</b>	<b>% De Asfalto</b>
% C.A. Para la máxima densidad Bulk	1696.32	6.09
% C.A. Para la máxima estabilidad	2.25	6.84
% C.A. Para 4% de vacíos	3.40	5.52
Promedio		6.15

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el valor calculado del cemento asfáltico óptimo se procedió a tomar los valores correspondientes en las curvas para dicho porcentaje de asfalto.

#### 4.2.1. Gráficas de las propiedades Marshall de los pavimentos asfálticos.

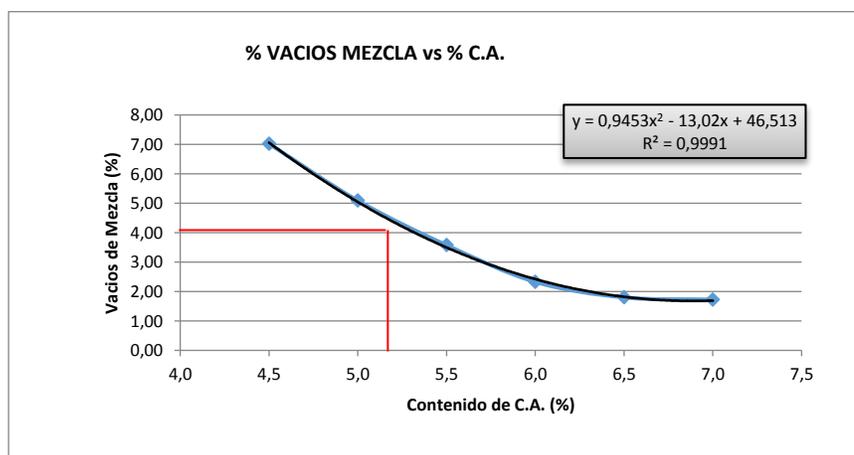
Gráfico N°4.1 Curva, Peso específico “Bulk” Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva proporciona el peso específico “Bulk” óptimo para el diseño de la mezcla tomando en cuenta el porcentaje promedio obtenido con anterioridad de las gráficas, para el cual se tiene que para 6.15% de asfalto corresponde un peso específico “Bulk” igual a 2.25, el cual es menor al máximo obtenido en el ensayo de las probetas.

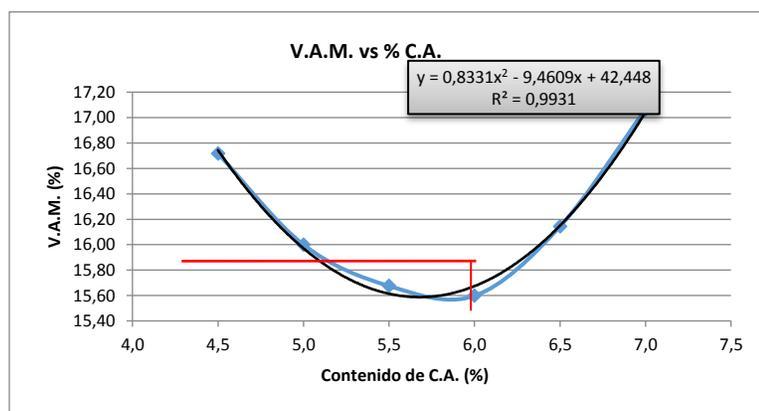
Gráfico N°4.2 Curva, vacíos con aire Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomará el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5,36% de asfalto, así mismo se tomará el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

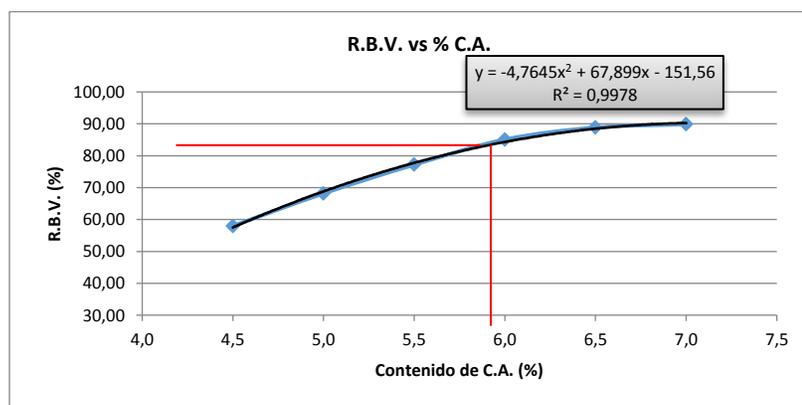
**Gráfico N°4.3** Curva, vacíos con aire Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 6.15%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 15.62.

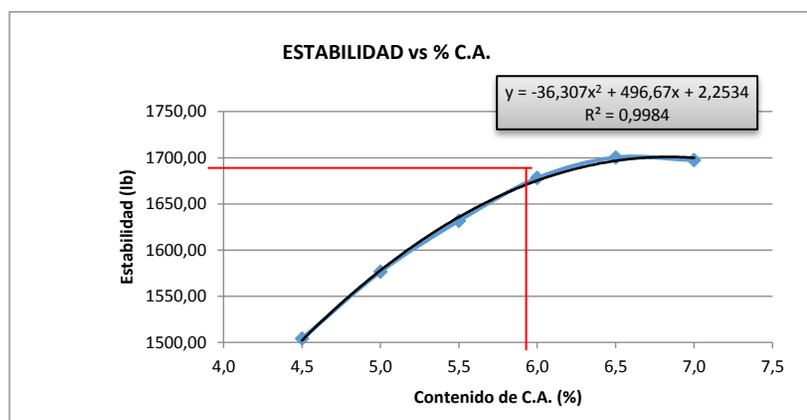
**Gráfico N°4.4** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que, a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumentan para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 6.15% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 85.25.

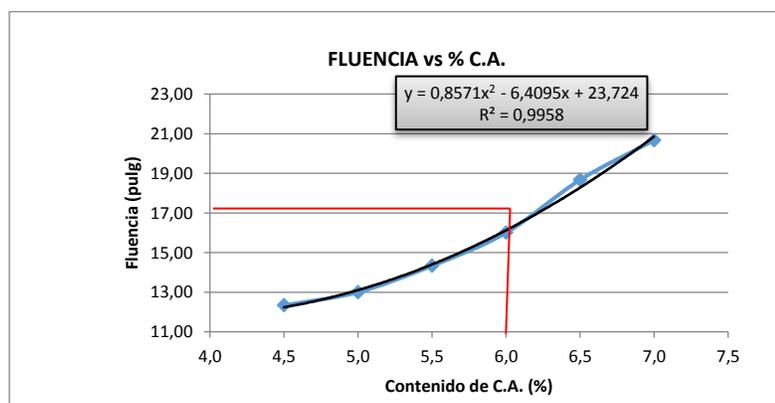
**Gráfico N°4.5** Curva, estabilidad Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** El ensayo realizado mediante el método Marshall en el cual se nota una curva polinómica de forma ascendente, hasta una estabilidad aproximada en el punto más alto de la curva de 1700.271 mientras que para el contenido de asfalto óptimo promediado de 6.15% tenemos una estabilidad de 1657.881.

**Gráfico N°4.6** Curva, flujo Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En el gráfico se puede visualizar la curva polinómica que a menor contenido de asfalto - menor deformación mientras que a mayor contenido de asfalto mayor deformación por lo que para nuestro contenido de asfalto óptimo de 6.15% se obtiene una deformación de 13.98 que se encuentra entre los valores recomendados que son de 8 -14 centésimas de pulgada.

#### 4.2.2. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para mezcla asfáltica (35 golpes).

**Tabla N°4.5** Resumen de resultados obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

<b>Denominación</b>	<b>Valor</b>
Porcentaje óptimo	6.15
Peso específico "Bulk"	2.25
Porcentaje vacíos con aire	5.36
Porcentaje vacíos en agregados minerales	15.62
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	85.25
Estabilidad (libras)	1657.881
Flujo (pulga/100)	13.98

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,15 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

#### 4.2.3. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico para 50 golpes.

De la tabla se obtiene los valores máximos de la densidad Bulk, de la estabilidad, de la gráfica % de asfalto Vs. vacíos en aire, se tomará en cuenta el porcentaje de cemento

asfáltico correspondiente al 4% de vacíos en aire con su respectivo contenido de asfalto ideal para la mezcla.

**Tabla N°4.6** Valores tomados en cuenta para contenido óptimo de asfalto.

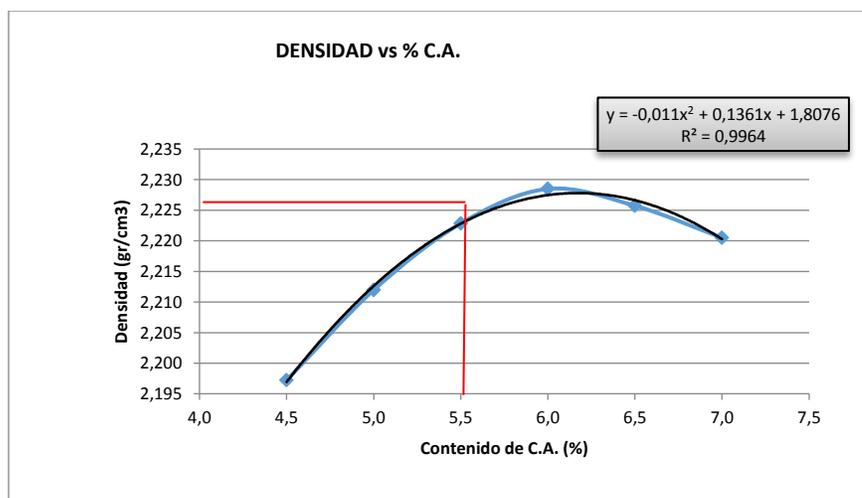
Datos	Valores máximos	% De Asfalto
% C.A. Para la máxima densidad Bulk	2057.37	5.91
% C.A. Para la máxima estabilidad	2.23	6.19
% C.A. Para 4% de vacíos	4.18	5.52
Promedio		5.57

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el valor calculado del cemento asfáltico óptimo se procedió a tomar los valores correspondientes en las curvas para dicho porcentaje de asfalto.

#### 4.2.4. Gráficas de las propiedades Marshall de los pavimentos asfálticos.

**Gráfico N°4.7** Curva, Peso específico “Bulk” Vs. % de asfalto

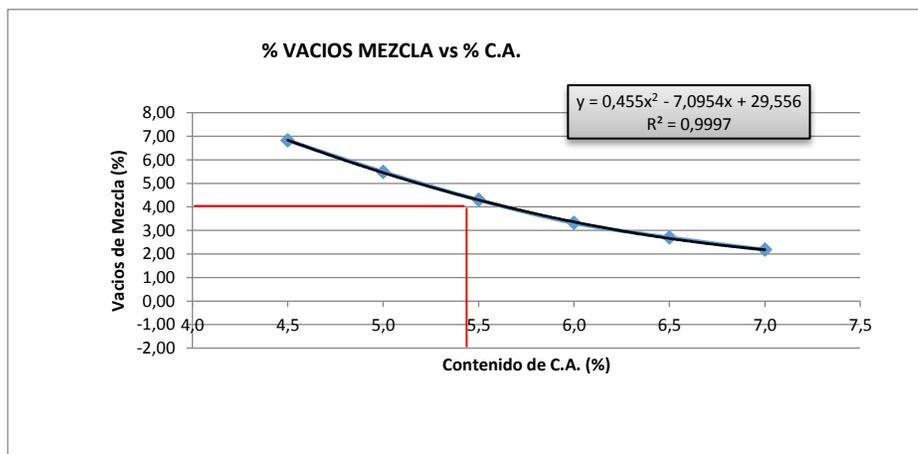


**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva proporciona el peso específico “Bulk” óptimo para el diseño de la mezcla tomando en cuenta el porcentaje promedio obtenido con anterioridad de las

gráficas, para el cual se tiene que para 5.57% de asfalto corresponde un peso específico “Bulk” igual a 2.226, el cual es menor al máximo obtenido en el ensayo de las probetas.

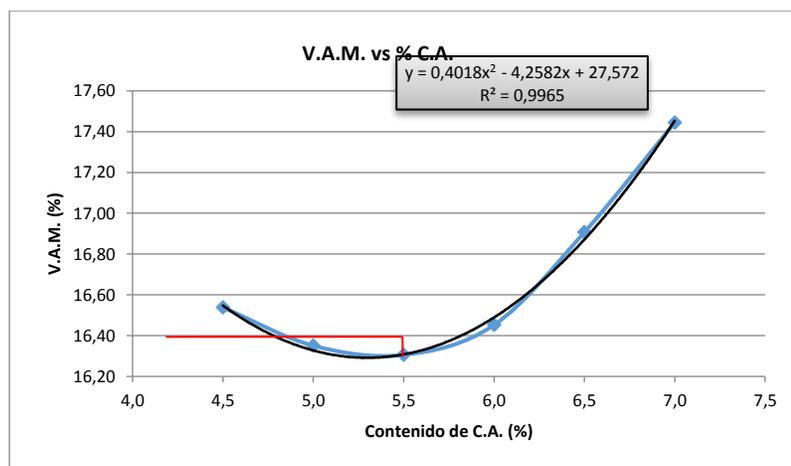
**Gráfico N°4.8** Curva, vacíos con aire Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomará el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5,64% de asfalto, así mismo se tomará el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

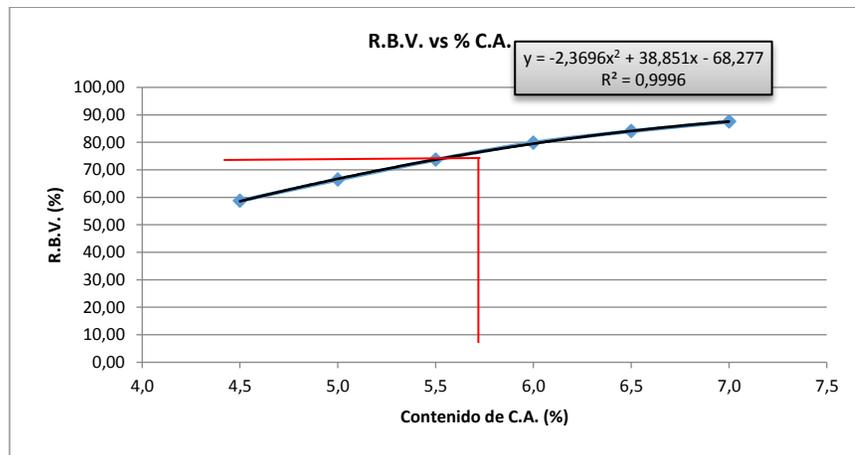
**Gráfico N°4.9** Curva, V.A.M. Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

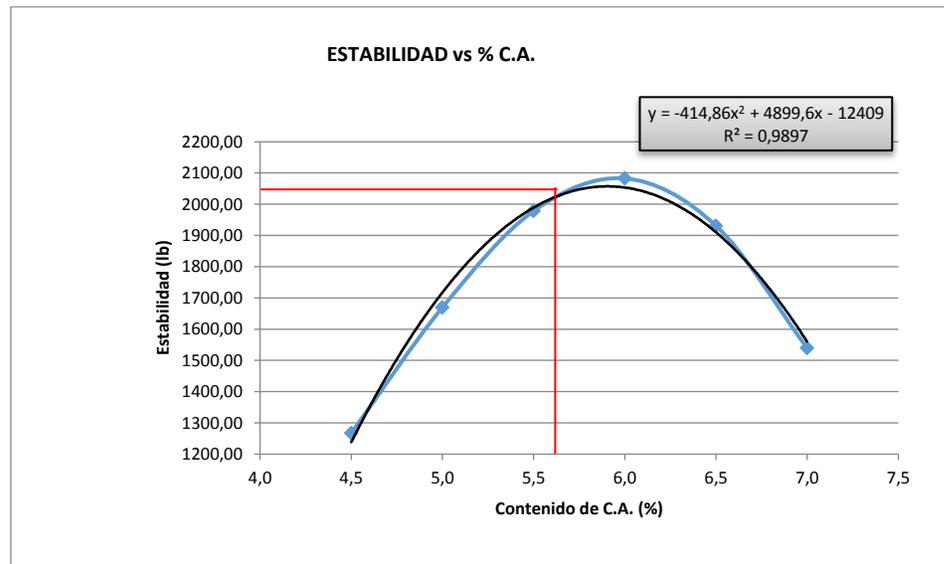
**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 5.57%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 16.38.

**Gráfico N°4.10** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto



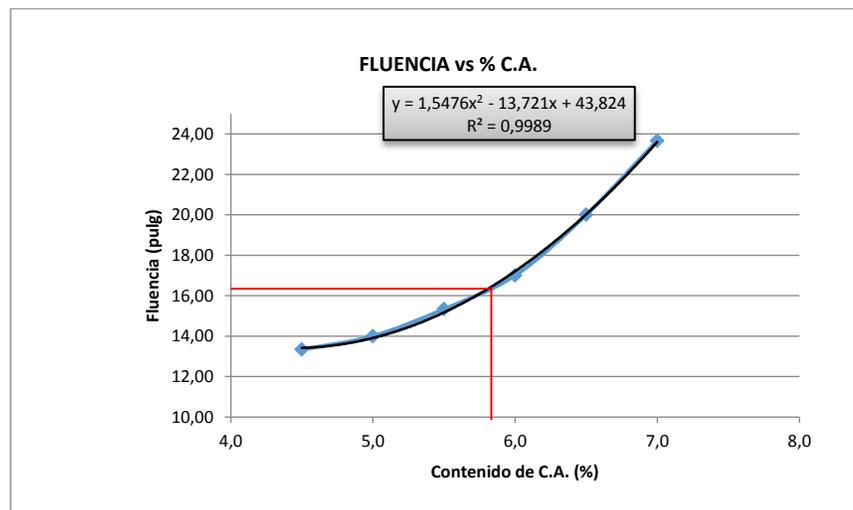
**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que, a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumentan para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 5.57% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 72.82.

**Gráfico N°4.11** Curva, estabilidad Vs. % de asfalto

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** El ensayo realizado mediante el método Marshall en el cual se nota una curva polinómica de forma ascendente, hasta una estabilidad aproximada en el punto más alto de la curva de 2100.225 mientras que para el contenido de asfalto óptimo promediado de 5.57% tenemos una estabilidad de 2088.225.

**Gráfico N°4.12** Curva, flujo Vs. % de asfalto

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En el gráfico se puede visualizar la curva polinómica que a menor contenido de asfalto - menor deformación mientras que a mayor contenido de asfalto mayor deformación por lo que para nuestro contenido de asfalto óptimo de 6.15% se obtiene una deformación de 13.99 que se encuentra entre los valores recomendados que son de 8 -14 centésimas de pulgada.

#### 4.2.5. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para mezcla asfáltica a 50 golpes

**Tabla N°4.7** Resumen de resultados obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

Denominación	Valor
Porcentaje óptimo	5.57
Peso específico "Bulk"	2.226
Porcentaje vacíos con aire	5.64
Porcentaje vacíos en agregados minerales	16.38
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	72.82
Estabilidad (libras)	2088.225
Flujo (pulga/100)	23.67

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,09 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

#### 4.2.6. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico para 75 golpes.

De la tabla se obtiene los valores máximos de la densidad Bulk, de la estabilidad, de la gráfica % de asfalto Vs. vacíos en aire, se tomará en cuenta el porcentaje de cemento

asfáltico correspondiente al 4% de vacíos en aire con su respectivo contenido de asfalto ideal para la mezcla.

**Tabla N°4.8** Valores tomados en cuenta para contenido óptimo de asfalto.

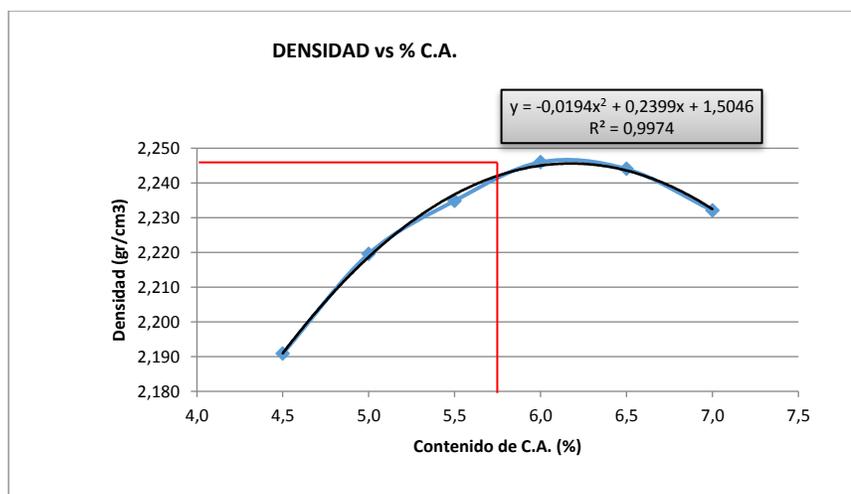
Datos	Valores máximos	% De Asfalto
% C.A. Para la máxima densidad Bulk	2049.70	6.29
% C.A. Para la máxima estabilidad	2.25	6.18
% C.A. Para 4% de vacíos	3.40	5.52
Promedio		6.00

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el valor calculado del cemento asfáltico óptimo se procedió a tomar los valores correspondientes en las curvas para dicho porcentaje de asfalto.

#### 4.2.7. Gráficas de las propiedades Marshall de los pavimentos asfálticos.

**Gráfico N°4.13** Curva, Peso específico “Bulk” Vs. % de asfalto

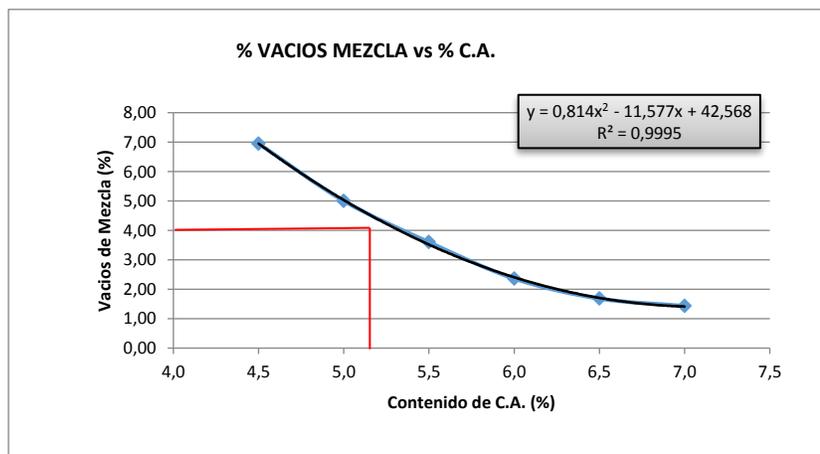


**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva proporciona el peso específico “Bulk” óptimo para el diseño de la mezcla tomando en cuenta el porcentaje promedio obtenido con anterioridad de las

gráficas, para el cual se tiene que para 6.00% de asfalto corresponde un peso específico “Bulk” igual a 2.248, el cual es menor al máximo obtenido en el ensayo de las probetas.

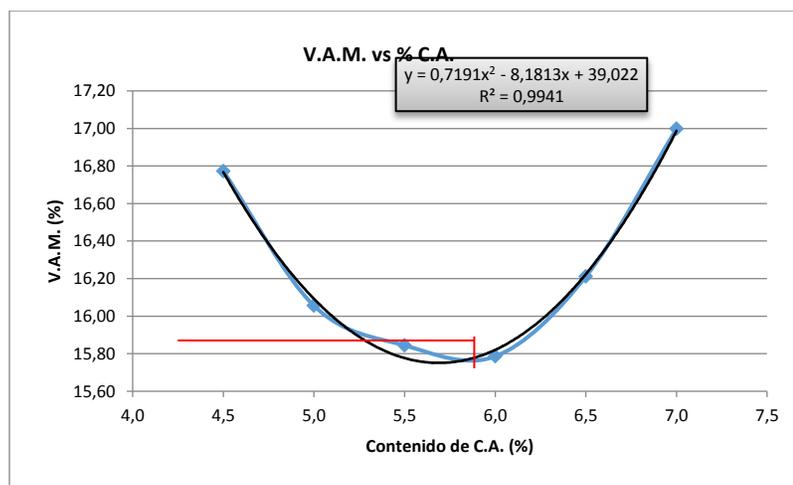
**Gráfico N°4.14** Curva, vacíos con aire Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomara el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5.42% de asfalto, así mismo se tomara el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

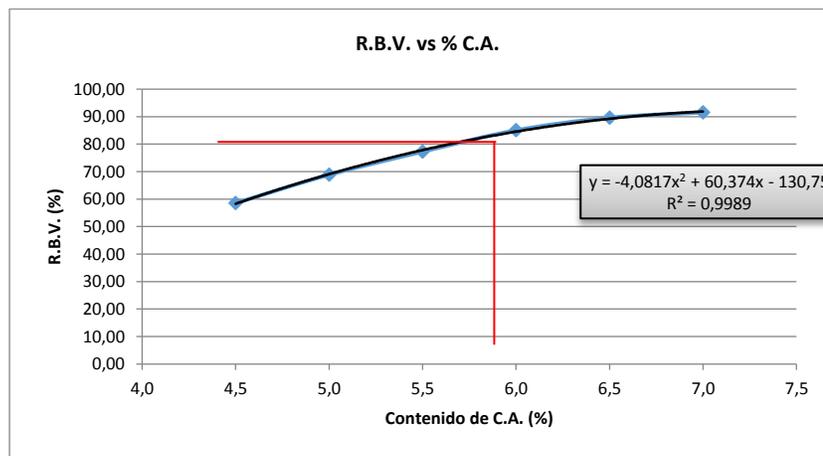
**Gráfico N°4.15** Curva, V.A.M. Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 6.00%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 15.78

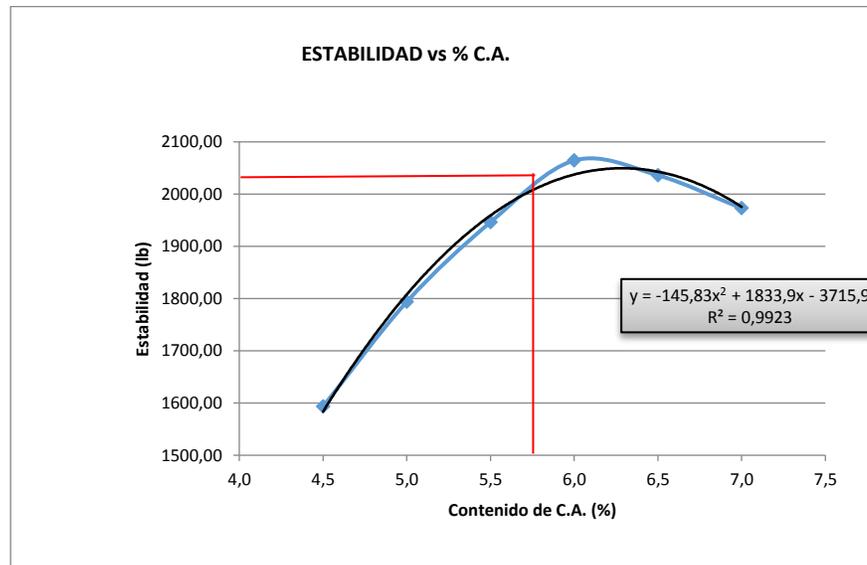
**Gráfico N°4.16** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumenta para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 6.00% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 82.25.

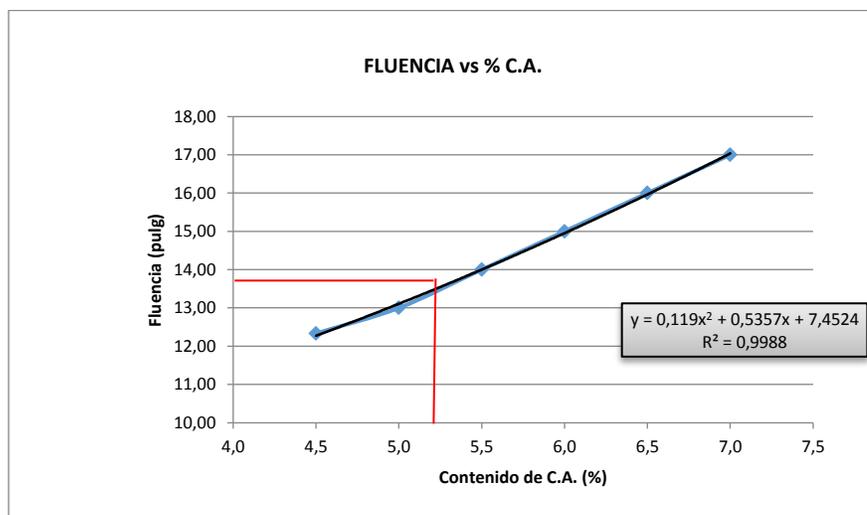
**Gráfico N°4.17** Curva, estabilidad Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** El ensayo realizado mediante el método Marshall en el cual se nota una curva polinómica de forma ascendente, hasta una estabilidad aproximada en el punto más alto de la curva de 2000.555 mientras que para el contenido de asfalto óptimo promediado de 6.00% tenemos una estabilidad de 2038.225.

**Gráfico N°4.18** Curva, flujo Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En el gráfico se puede visualizar la curva polinómica que a menor contenido de asfalto - menor deformación mientras que a mayor contenido de asfalto mayor deformación por lo que para nuestro contenido de asfalto óptimo de 6.00% se obtiene una deformación de 13.65 que se encuentra entre los valores recomendados que son de 8 -14 centésimas de pulgada.

#### 4.2.7. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para mezcla asfáltica a 75 golpes.

**Tabla N°4.9** Resumen de resultados obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

<b>Denominación</b>	<b>Valor</b>
Porcentaje óptimo	6.00
Peso específico "Bulk"	2.248
Porcentaje vacíos con aire	5.42
Porcentaje vacíos en agregados minerales	15.78
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	82.25
Estabilidad (libras)	2038.225
Flujo (pulga/100)	13.65

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,09 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

#### 4.3. Comparación de los métodos de diseño Marshall y Rice

En cuanto a los porcentajes de contenido de asfalto obtenidos por las dos metodologías de diseño, se observa que por el método de Marshall y Rice se tomó los mismos

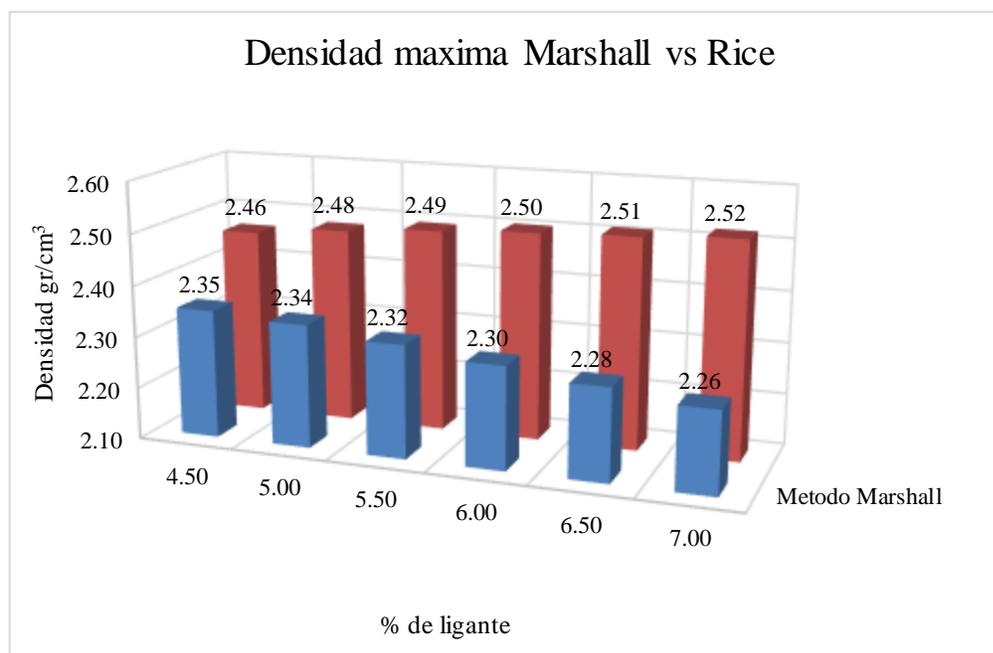
porcentajes de cemento asfáltico para ambos ensayos. Donde se puede verificar la densidad máxima teórica. Donde se llegó a evidenciar que esta diferencia se debe a los diferentes criterios que maneja cada método de diseño para su obtención y además del tipo de compactación.

**Tabla N°4.10** Densidad máxima teórica compactado y sin compactar a 35 golpes

Contenido de cemento asfáltico	Densidad Máxima Teórica (Marshall)	Densidad Máxima Teórica Medida (Rice)
%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>
4.50	2.35	2.46
5.00	2.34	2.48
5.50	2.32	2.49
6.00	2.30	2.50
6.50	2.28	2.51
7.00	2.26	2.52

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°4.3** Densidad máxima teórica Marshall vs Rice (35 golpes)



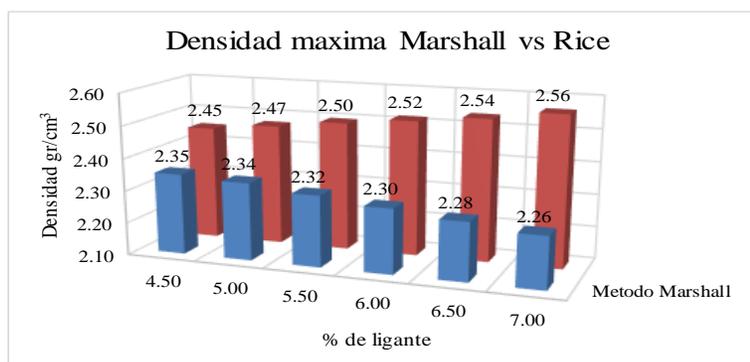
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.11** Densidad máxima teórica compactado y sin compactar a 50 golpes

Contenido de cemento asfáltico	Densidad Máxima Teórica (Marshall)	Densidad Máxima Teórica Medida (Rice)
%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>
4.50	2.35	2.56
5.00	2.34	2.53
5.50	2.32	2.52
6.00	2.30	2.50
6.50	2.28	2.47
7.00	2.26	2.45

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°4.4** Densidad máxima teórica Marshall vs Rice (50 golpes)

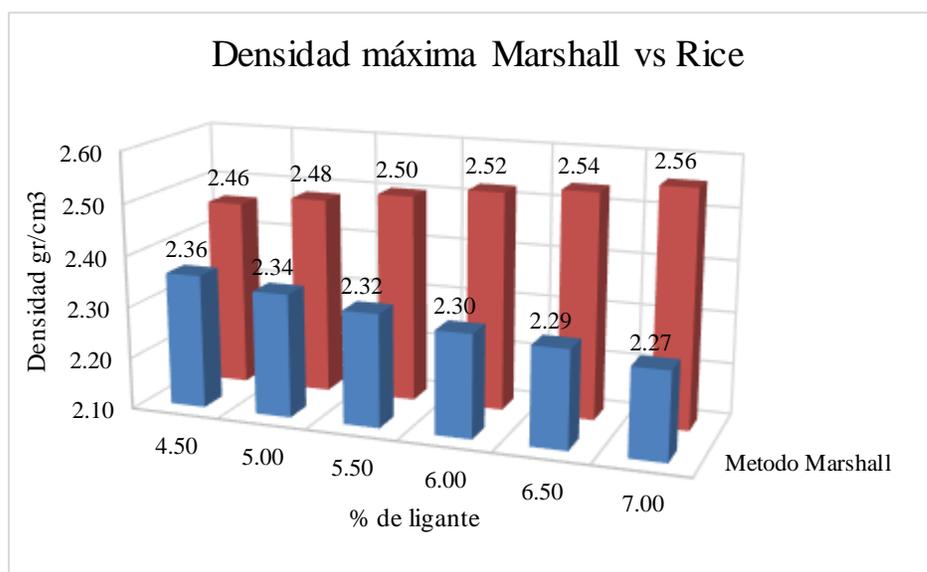


**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.12** Densidad máxima teórica compactado y sin compactar a 75 golpes

Contenido de cemento asfáltico	Densidad Máxima Teórica (Marshall)	Densidad Máxima Teórica Medida (Rice)
%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>
4.50	2.36	2.56
5.00	2.34	2.54
5.50	2.32	2.52
6.00	2.30	2.50
6.50	2.29	2.48
7.00	2.27	2.46

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura N°4.5** Densidad máxima teórica Marshall vs Rice (75 golpes)

**Fuente:** Elaboración propia.

De las gráficas y tablas comparativas de densidades máximas obtenidas mediante el método Marshall y el método Rice, se observa que los valores de densidades máximas obtenidas mediante el método de Rice oscilan entre  $2.45 \text{ gr/cm}^3$  y  $2.56 \text{ gr/cm}^3$  siendo estas mayores a las obtenidas con la metodología Marshall las cuales tienen un valor de entre  $2.26 \text{ gr/cm}^3$  y  $2.36 \text{ gr/cm}^3$ .

También de las gráficas mostradas se deduce que a medida que aumenta el porcentaje de asfalto el porcentaje de vacíos en el método Rice tiende a disminuir, por lo cual la densidad conseguida es mayor a la del ensayo Marshall.

Estos ensayos cuyo fin es obtener la densidad máxima de la mezcla asfáltica, a diferencia de la densidad Marshall esta densidad se obtiene luego de extraer los vacíos que si bien no aportan masa agregan volumen.

Razón por la cual la densidad Marshall siempre es menor. Sintéticamente, el procedimiento consiste en utilizar principio de Arquímedes para obtener volumen de la mezcla y una bomba de vacío para eliminar el aire contenido en la misma.

La densidad máxima es proporcional a la ponderación entre los pesos específicos de los materiales primarios que integran la mezcla asfáltica.

Este valor puede usarse de referencia antes de dosificar una mezcla o bien para detectar posibles fallos en el equipamiento de laboratorio si se arrojan valores muy diversos.

Por otro lado, tener en cuenta el valor de la densidad Rice es de gran importancia por los siguientes motivos:

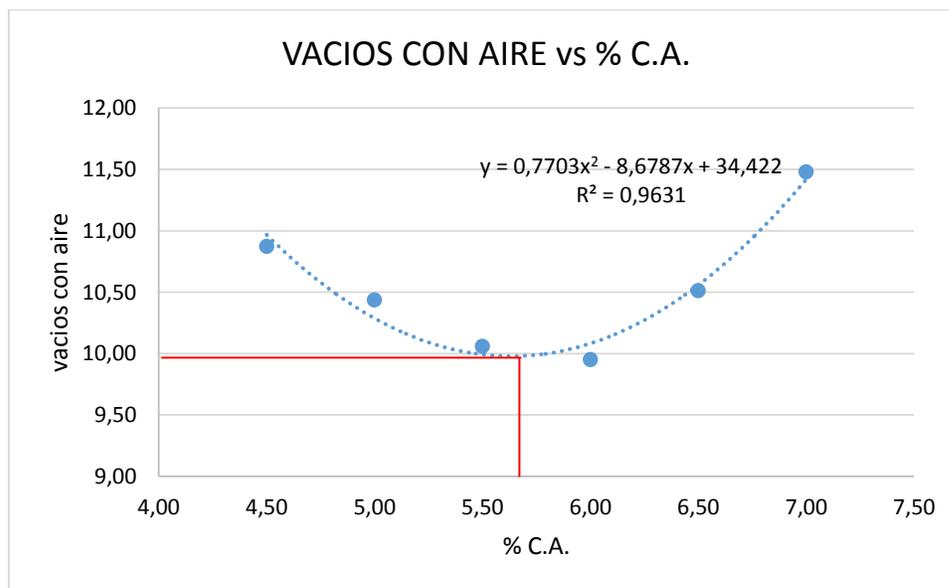
Puede indicar exceso de asfalto o falta del mismo, esto se da ya que es un ensayo sencillo y rápido en comparación al ensayo por método Marshall, por ejemplo.

Permite detectar cambios en los pesos específicos de los agregados. Como se explicará en el ensayo de peso específico. Esto significa que por ejemplo obtener un valor de densidad Rice mayor al de Formula no siempre indicara vacíos altos.

Este cambio se verá acompañado de un aumento de la densidad Marshall al mismo tiempo. Esto indica que los vacíos están en un rango aceptable, ya que ambas densidades aumentan proporcionalmente.

#### 4.3.1. Comparación de los métodos de diseño Marshall y Rice 35 golpes.

**Gráfico N°4.19** Curva Vacíos con aire Vs. % de asfalto



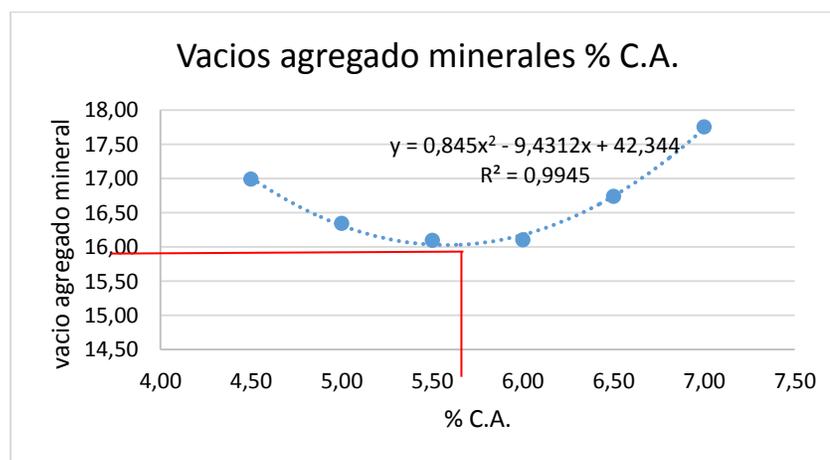
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.13** Datos Vacíos con aire Vs. % de asfalto.

<b>% De Asfalto</b>	<b>Vacíos con aire</b>
4.5	10.87
5.0	10.43
5.5	10.06
6.0	9.95
6.5	10.51
7.0	11.48

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomara el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5.72% de asfalto, así mismo se tomara el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

**Gráfico N°4.20** Curva, V.A.M. Vs. % de asfalto.

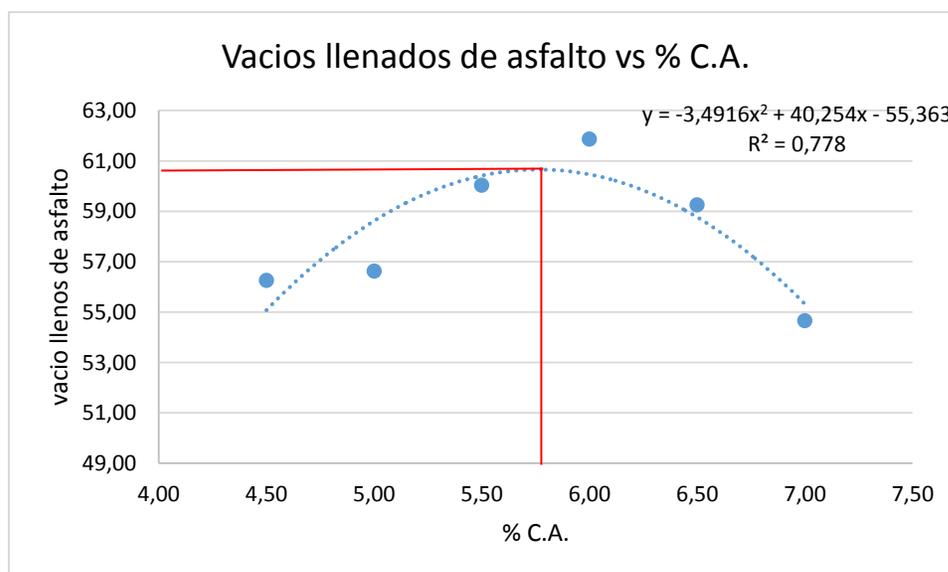
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.14** Datos, V.A.M Vs. % C.A.

% De Asfalto	V.A.M.
4.5	16.99
5.0	16.34
5.5	16.10
6.0	16.10
6.5	16.74
7.0	17.75

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 5.72%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 15.99.

**Gráfico N°4.21** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.15** Datos, vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto.

<b>% De Asfalto</b>	<b>Vacíos llenos de asfalto</b>
4.5	56.25
5.0	56.62
5.5	60.03
6.0	61.85
6.5	59.25
7.0	54.66

**Fuente:** Elaboración propia.

Interpretación: En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que, a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumentan para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 5.72% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 60,52.

#### **4.3.2. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para mezcla asfáltica con el método Rice (35 golpes).**

**Tabla N°4.16** Resumen de obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

<b>Denominación</b>	<b>Valor</b>
Porcentaje vacíos con aire	5.72
Porcentaje vacíos en agregados minerales	15.99

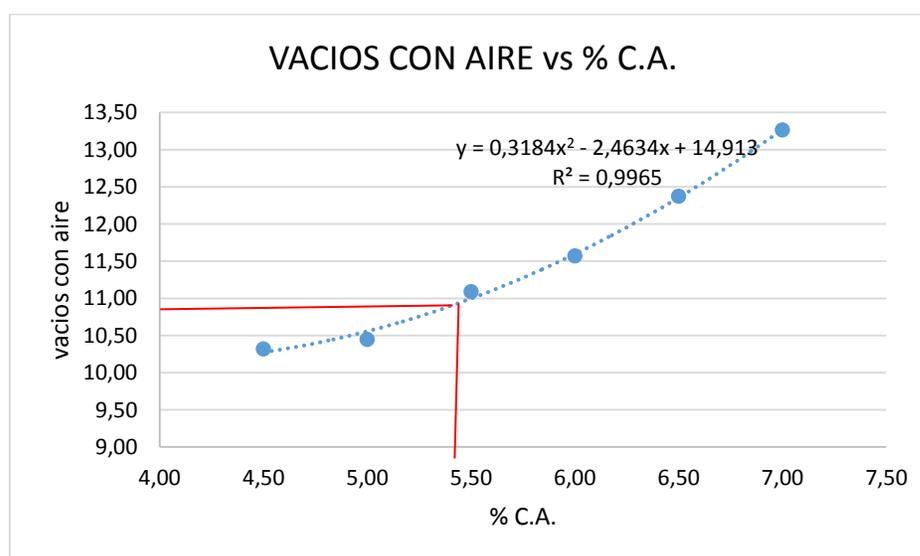
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	60.52
---------------------------------------	-------

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,09 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

#### 4.3.3. Comparación de los métodos de diseño Marshall y Rice 50 golpes.

**Gráfico N°4.22** Curva Vacíos con aire Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.17** Datos Vacíos con aire Vs. % de asfalto.

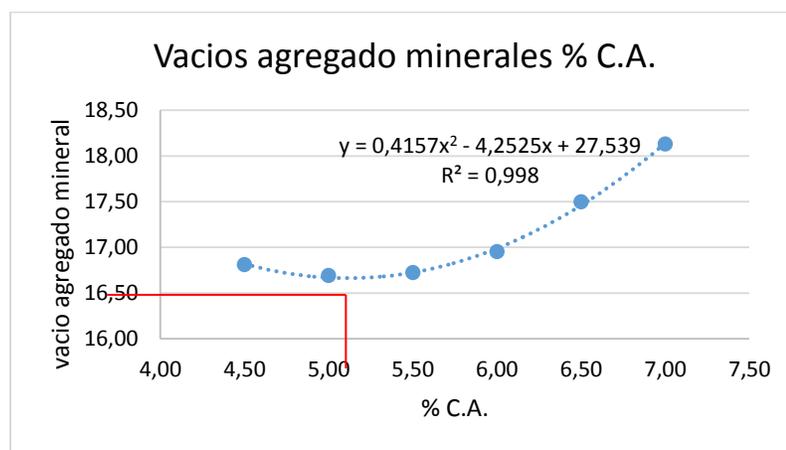
% De Asfalto	Vacios con aire
4.5	10.32
5.0	10.45
5.5	11.09
6.0	11.57

6.5	12.37
7.0	13.26

**Fuente:** elaboración propia

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomara el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5.11% de asfalto, así mismo se tomara el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

**Gráfico N°4.23** Curva, V.A.M. Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.17** Datos, V.A.M Vs. % C.A.

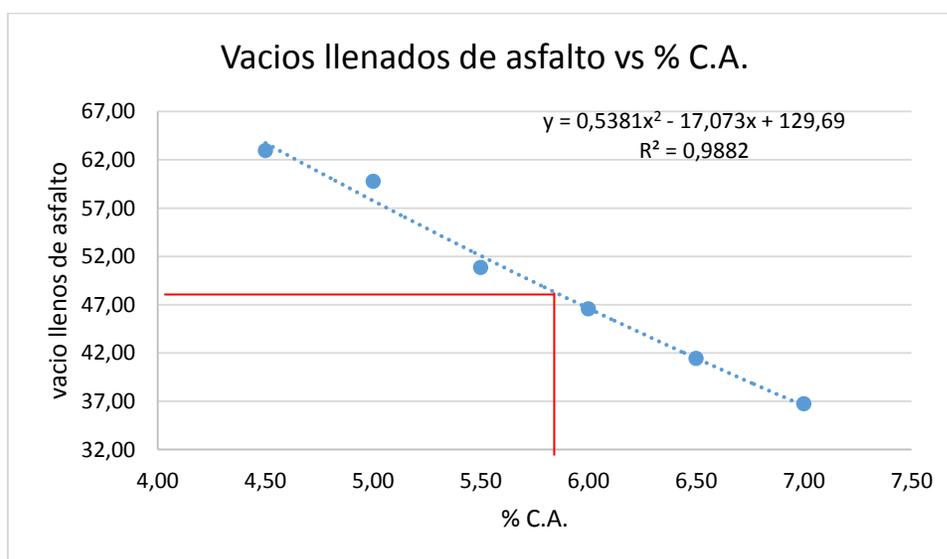
<b>% De Asfalto</b>	<b>V.A.M.</b>
4.5	16.81
5.0	16.69
5.5	16.72

6.0	16.95
6.5	17.50
7.0	18.13

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 5.11%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 16.62.

**Gráfico N°4.24** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.18** Datos, vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto.

<b>% De Asfalto</b>	<b>Vacios llenos de asfalto</b>
4.5	62.93
5.0	59.77

5.5	50.83
6.0	46.55
6.5	41.41
7.0	36.71

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que, a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumentan para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 5.76% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 48,52.

#### 4.3.4. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para un pavimento asfáltico (método Rice).

**Tabla N°4.19** Resumen de obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

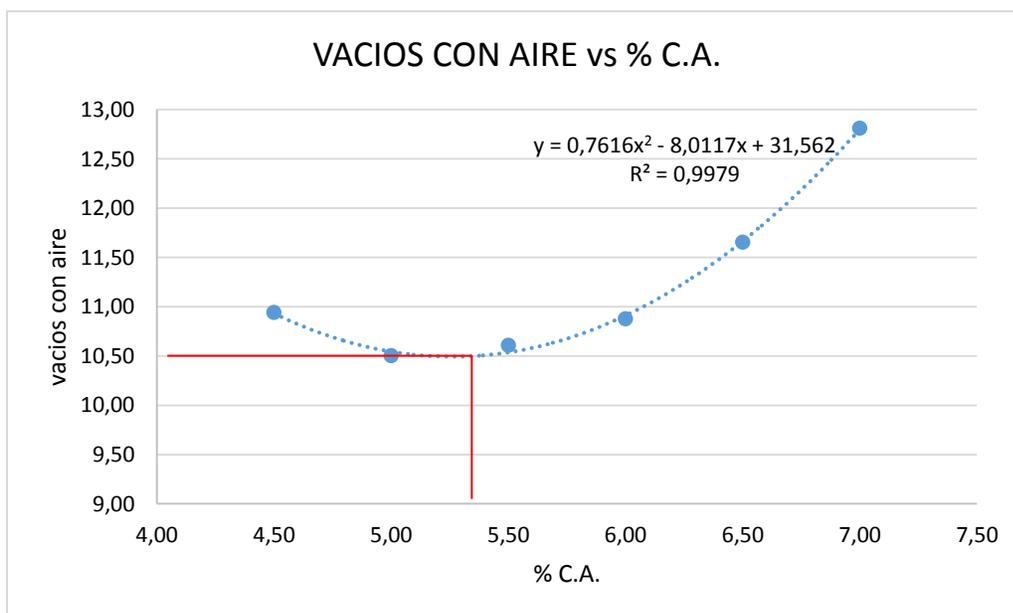
Denominación	Valor
Porcentaje vacíos con aire	5.72
Porcentaje vacíos en agregados minerales	16.62
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	48.52

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,09 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

### 4.3.5. Comparación de los métodos de diseño Marshall y Rice 75 golpes.

**Gráfico N°4.25** Curva Vacíos con aire Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.20** Datos Vacíos con aire Vs. % de asfalto.

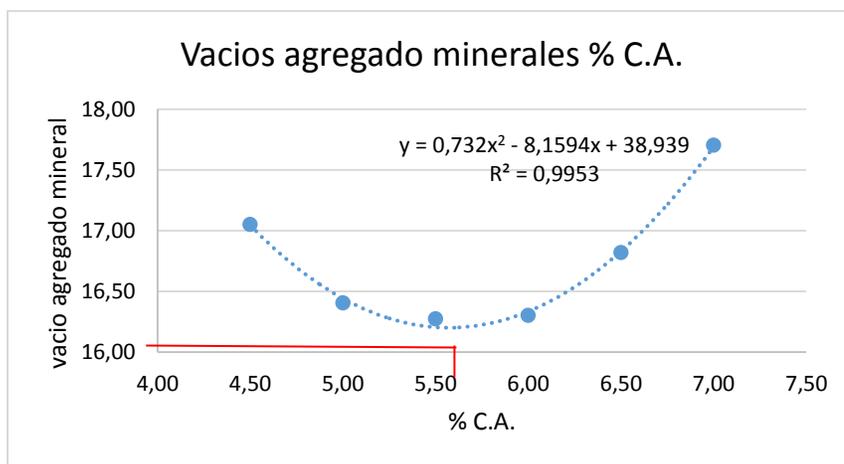
% De Asfalto	Vacios con aire
4.5	10.94
5.0	10.50
5.5	10.61

6.0	10.87
6.5	11.65
7.0	12.81

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** Esta curva se puede observar que a mayor porcentaje de asfalto la cantidad de vacíos disminuye considerablemente de la cual se tomara el 4% de vacíos que corresponde al promedio del rango que nos proporciona la normativa para mezclas asfálticas, el valor obtenido del 4% de vacíos en aire corresponde a 5.32% de asfalto, así mismo se tomara el porcentaje de vacíos que corresponde para el valor óptimo de cemento asfáltico calculado.

**Gráfico N°4.26** Curva, V.A.M. Vs. % de asfalto.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.21** Datos, V.A.M Vs. % C.A.

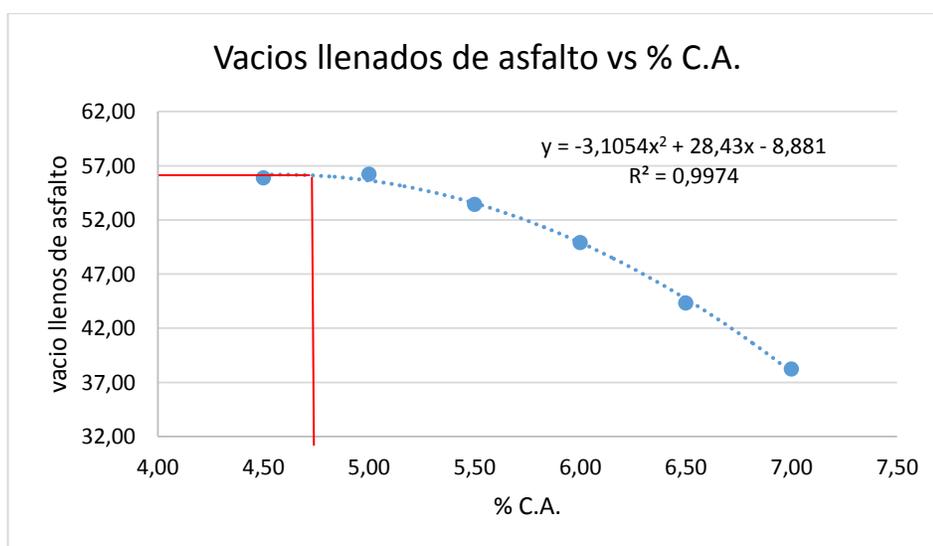
% De Asfalto	V.A.M.
4.5	17.05
5.0	16.41

5.5	16.27
6.0	16.30
6.5	16.82
7.0	17.70

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** La gráfica se puede notar una curva en forma descendente - ascendente en la cual se pudo encontrar el porcentaje de vacíos en agregado mineral para un porcentaje de asfalto igual a 5.60%, el cual realizando el proceso de visualización se tiene que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral es igual a 16.20.

**Gráfico N°4.27** Curva, % de vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla N°4.22** Datos, vacíos llenos de asfalto Vs. % de asfalto.

<b>% De Asfalto</b>	<b>Vacíos llenos de asfalto</b>
4.5	55.86
5.0	56.21

5.5	53.42
6.0	49.90
6.5	44.32
7.0	38.21

**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación:** En la curva polinómica porcentaje de asfalto Vs % de vacíos llenados de asfalto, se puede visualizar que a mayor porcentaje de asfalto, los vacíos llenados por el asfalto aumenta para lo cual hemos de comparar con el porcentaje óptimo obtenido que es igual a 4.58% de acuerdo a ciertos criterios de estabilidad, vacíos en aire y peso específico, en la cual de la curva se ha determinado un porcentaje de vacíos llenados de asfalto es igual a 56.50.

#### 4.3.6. Resultados obtenidos con porcentaje óptimo de asfalto para un pavimento asfáltico (método Rice)

**Tabla N°4.23** Resumen de obtenidos de las gráficas para porcentajes óptimos de asfalto.

Denominación	Valor
Porcentaje vacíos con aire	5.32
Porcentaje vacíos en agregados minerales	16.20
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto	56.50

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos presentes en la tabla fueron determinados para un contenido óptimo de 6,09 % de cemento asfáltico mediante las gráficas resultantes del ensayo Marshall realizado a las briquetas con distintos contenidos de asfalto.

**Tabla N°4.24** Comparación de los dos métodos Marshall y Rice

<b>Marshall (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rice (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
En Bolivia se utiliza esta metodología para dosificar materiales en diseño de mezclas en caliente. Se tienen granulométricas dependiendo del tipo de mezcla. Tamaño máximo.	Esta metodología se usa para determinar el uso de materiales según su distribución granulométrica. Los puntos de control dependen del tamaño máximo nominal de los agregados.
Se caracterizan los agregados por resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, limpieza, forma, angularidad.	Se caracterizan los materiales de acuerdo a las propiedades de origen y consenso.
Solo se contempla el dato de densidad después de compactación para verificar el volumen de vacíos con aire.	El material o agregado para la prueba se realiza con material suelto y en un ambiente templado.
Para determinar el óptimo de asfalto se utilizan pruebas destructivas tales como la medición de la estabilidad.	El óptimo de asfalto se obtiene por medio de propiedades volumétricas que extrae los vacíos de dicha muestra.
Según actualizaciones actuales ambas metodologías requieren hacer el ensayo de susceptibilidad a la humedad para para corroborar la densidad lograda.	

**Fuente:** Elaboración propia.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**  
**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**5.1. Conclusiones**

Con los ensayos realizados y obtenidos los resultados y posterior análisis, para esta investigación se llega a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Los materiales que componen la mezcla asfáltica (materiales pétreos y material bituminoso), cumplieron con las especificaciones exigidas por las normativas AASHTO Y ASTM.
- Realizado la comparación de las densidades máximas por los dos métodos, se pudo comprobar que las densidades máximas obtenidas por el método de Rice fueron relativamente mayores estando en un rango de  $2.45 \text{ gr/cm}^3$  y  $2.56 \text{ gr/cm}^3$  mientras que las obtenidas por el método teórico Marshall, fueron de  $2.26\text{gr/cm}^3$  y  $2.36\text{gr/cm}^3$ .

- Se pudo cumplir el objetivo general y específicos planteados, ya que se pudo realizar la comparación de ambos métodos, determinando las variaciones en sus resultados y la influencia del grado de compactación sobre la densidad con la cual se propone un parámetro a tomar en cuenta en cuanto a la densidad, para una eficiente elaboración de la mezcla asfáltica y su posterior colocación en obra.
- Mediante el método de Rice se observa una clara reducción en el volumen de vacíos o huecos, y la dosificación de la mezcla asfáltica en función del método Rice dio lugar a la elección de un diseño de contenido de ligante menor que la dosificación por el método teórico estándar (Marshall).
- Los resultados obtenidos mediante la metodología Rice representa una ventaja en cuanto a la dosificación de las mezclas asfálticas, obteniéndose un porcentaje eficiente de ligante asfáltica, resultando en un incremento de la Estabilidad, Densidad, y la reducción de espacios vacíos de la mezcla asfáltica, los cuales se traducen en mayor durabilidad ante agentes agresores e incrementa la vida útil del pavimento.
- Se pudo obtener gráficas con datos precisos que dan información acerca de los rangos en los cuales el pavimento sometido a la humedad o a la deformación, logra continuar con su resistencia esperada y cumpliendo con su óptimo desempeño, así como también los rangos en los cuales el pavimento estaría viéndose afectado ya en gran medida por los mismos factores.
- El grado de compactación no influyó en la determinación de la densidad máxima con el método Rice, ya que este método no requiere que la mezcla sea compactada, sino que es aplicada a mezcla suelta.
- La aplicación de este método resulta ser ventajoso con referencia a la obtención del contenido de ligante que resulte eficiente como también para el control durante su aplicación en obra, con el cual se pueda obtener un pavimento con altas características resistentes.
- Como conclusión final, la práctica Rice fue exitosa porque se cumplió su principal objetivo que es la inserción del estudiante en la actividad laboral profesional. Con respecto al objetivo de aplicación de una nueva metodología se puede decir lo mismo ya que, a pesar de no haberse podido aplicar en su máximo

potencial, se llegaron a conclusiones técnicas y se plantearon las ventajas de su posible aplicación en un futuro.

## **5.2. Recomendaciones**

El desarrollo de los ensayos debe realizarse ceñido a las indicaciones de las normas correspondientes, se debe procurar en lo posible contar con equipos de excelente desempeño, que garanticen la calidad de los resultados, ya que se debe tener en cuenta que cualquier variación ocurrida durante los ensayos, influirán de manera negativa en los resultados finales.

- Se recomienda que la compactación de las briquetas, sea realizada por una misma persona con el fin de evitar cambios en la energía aplicada y variar los resultados del ensayo.
- En el desarrollo del proyecto, se presentaron incidentes de disponibilidad de tiempo tanto del material humano utilizado como de las instalaciones del laboratorio, por lo que recomendamos planificar de manera adecuada el tiempo que se va a requerir para el desarrollo de cada actividad, debido a que los tiempos de cada ensayo pueden variar según la experticia de quienes los ejecutan y en caso de presentarse algún imprevisto como por ejemplo el daño de algún equipo, ese tiempo retardaría aún más todo el ensayo.
- Se recomienda proveer un buen mantenimiento a la bomba (parte del equipo utilizado por el método Rice), mediante cambios de aceite y demás controles internos ya que en la conclusión del retiro de vacío es mediante una apreciación visual. Un mal funcionamiento no extraerá las burbujas de aire más pequeñas. Otra recomendación que busca el mismo objetivo es la de limitar la cantidad de mezcla asfáltica ensayada.
- Durante el procedimiento del ensayo es necesario obtener el valor del peso del matraz con el nivel de agua máximo. Se debe tener cuidado con esta medición por la influencia de la temperatura sobre la densidad del agua.
- Ser preciso con el enrasado del matraz en la medición final. En esta se tiene la mezcla asfáltica sin vacíos y embebida en agua hasta la marca que define el

volumen del matraz. Por más que el estrechamiento en la parte superior del mismo colabora con la precisión del llenado a un volumen constante es importante evitar variaciones que alteren el resultado final.

- Se debe tener en cuenta las siguientes condiciones para seleccionar el contenido óptimo. Debe corresponder a la máxima densidad. Se asegura la máxima compacidad de manera análoga a una curva de máxima densidad seca en compactación de suelos. El porcentaje óptimo debe ser con el que se obtenga la máxima estabilidad o cercana a ella. Esta se asocia con la mayor resistencia estructural.
- Este proyecto puede continuarse en futuros trabajos de investigación, en vista de la gran variedad que se puede obtener en sus propiedades, variedades de granulometría, cambios en la temperatura de compactación, cambios en el porcentaje de asfalto etc. Así mismo se pueden incluir ensayos que la norma boliviana de carreteras nos solicita en los pavimentos flexibles y de ese modo lograr tener un contexto más amplio de la variación en distintas condiciones de los pavimentos flexibles.