

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El diseño, implementación y construcción de estructuras de pavimentos flexibles es la alternativa de pavimentación más económica como técnica en las obras de infraestructura vial para vías de segundo y tercer orden. Sin embargo, a pesar de esta consideración, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios que utilizan estos corredores, ya que el mantenimiento en estas vías restringe su uso. Tal afirmación ha llevado a buscar nuevas alternativas en lo que se refiere a los materiales que componen la mezcla asfáltica para mejorar su capacidad de respuesta mecánica.

La combinación apropiada de agregado, asfalto, y aditivos en diferentes proporciones crean un material denominado mezcla asfáltica, cuyo objetivo principal es ofrecer condiciones adecuadas para el flujo vehicular y soportar los esfuerzos inducidos por los ejes vehiculares y las condiciones medioambientales. Los agregados constituyen aproximadamente un 95% de la mezcla y están conformadas por partículas gruesas y finas que crean un esqueleto mineral y brindan en gran medida la rigidez en la mezcla. De otra parte, dada las características físicas y químicas del asfalto, este proporciona cohesión entre las partículas del agregado, y en unión especialmente con el material más fino (llenante mineral o material pasa el tamiz #200) crean un mástico, que ofrecen trabajabilidad, resistencia, e impermeabilidad, entre otras propiedades. La influencia del porcentaje, origen, y características de la llenante mineral en la respuesta mecánica de las mezclas asfálticas ha sido objeto de múltiples investigaciones, encontrándose afectaciones en la resistencia a la deformación plástica, fatiga, y susceptibilidad al agua, entre otras propiedades.

Es por esto, que el objetivo de esta investigación es establecer la incidencia del contenido de llenante mineral (CAOLÍN) en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas cerradas. La investigación se realizará con tres tipos de materiales pétreos y

dos tipos de cemento asfáltico, los resultados obtenidos mostrarán que el origen del agregado pétreo y el porcentaje del llenante mineral dentro de la mezcla asfáltica cerrada inciden significadamente en las mezclas asfálticas cerradas, empleando pruebas de caracterización mecánica, ENSAYO MARSHALL.

## **1.2 Justificación**

La mayor parte de las estructuras que se diseñan y construyen en Bolivia son flexibles. De las cuales un gran porcentaje poseen unas características específicas de resistencia y durabilidad que son insuficientes para soportar los niveles de tránsito alto que se presentan. En Bolivia, la red vial cuenta con alrededor de 16.054,35 km y se encuentra a lo largo de todo el país. Sin embargo, solo un pequeño porcentaje se encuentra en óptimas condiciones; en su gran mayoría se presentan daños que afectan el confort y la seguridad de los usuarios, además de generar innumerables costos anuales de rehabilitación y mantenimiento.

La respuesta mecánica de una mezcla asfáltica depende de múltiples factores: asfalto, agregados y llenante mineral, este último tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas debido a su elevada superficie específica y al aumento de la cohesión y adherencia que aporta al resto de áridos y ligante. El objetivo de este polvo mineral es rellenar los huecos del esqueleto de los áridos gruesos y finos, impermeabilizar y densificar la mezcla bituminosa, por lo cual, es muy importante conocer las características geométricas, composición mineralógica y volumen del filler. Por lo anterior, es válido pensar en evaluar la interrelación de un material caolín, con el asfalto, ya que teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, y su disponibilidad a nivel mundial, podría llegar a contemplarse su uso en la fabricación de mezclas asfálticas. Con base a las cifras del Mineral Commodity Summaries, la producción mundial de caolín en 2013 se estimó en 37 millones de toneladas. Principales productores:

Estados Unidos, la Ex Unión Soviética, Alemania, República Checa y Brasil, entre otros. La industria del caolín en México tiene amplias posibilidades de desarrollarse

aún más y aprovechar la demanda existente. En Bolivia, se tienen referenciado yacimientos mineros de caolín de la corporación minera de Bolivia (COMIBOL), en Oruro, donde se realiza la explotación.

El análisis consiste en introducir a una mezcla asfáltica un llenante mineral caolín “que es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas” para mejorar la propiedad de la mezcla asfáltica, también mejorar la propiedad de una mejor impermeabilización de la superficie y la mejora trabajabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica cumpliendo especificaciones técnicas para que una mezcla asfáltica tenga una mejor durabilidad ante el efecto de las cargas y efectos de la humedad.

Los resultados que se obtengan del estudio permitirán su mayor utilización en los proyectos viales de nuestra región aprovechando las ventajas técnicas del producto en estudio que a la larga nos traerá ahorro económico.

### **1.3 Planteamiento del problema**

#### **1.3.1 Situación problemática**

La carpeta asfáltica es la capa superior del pavimento flexible que está compuesta proporcionalmente de materiales pétreos y asfalto. La calzada es un camino o parte de una carretera o carretera reservada a los vehículos, está compuesta de la rasante siendo la línea que marca la cota final de la superficie de rodamiento vehicular y carpeta asfáltica. La superficie de rodamiento vehicular es aquella que se encuentra afectada por los diferentes cambios climáticos; en consecuencia, es notorio cuando la calzada ya no cumple con las especificaciones técnicas mínimas necesarias, provocando futuros accidentes de tránsito. Además, es importante analizar el deterioro de la carpeta asfáltica e implementar un nuevo método de diseño de mezcla asfáltica que permitan mejorar y estabilizar las vías, asegurar el tránsito y movilizar la producción. De no tomar en cuenta estos problemas y corregir a tiempo estas anomalías, el único posible resultado sería el deterioro de los pavimentos asfálticos y por ende un problema socio económico a lo largo de esta red vial.

El asfalto está siendo sometido a elevadas exigencias que han obligado a los ingenieros a buscar distintas alternativas que mejoren sus propiedades y lo hagan competente a la demanda actual.

Con este trabajo queremos estudiar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con adición de Caolín como llenante mineral en porcentajes, teniendo como punto de partida el estudio **“ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS”** Para poder observar las características del asfalto son directamente proporcionales a la cantidad del caolín que se proporcionara a la mezcla.

Se realizarán ensayos en laboratorio para caracterizar los materiales a utilizar en la mezcla asfáltica con caolín que sería el filler, y dependiendo de los resultados que se obtenga podemos concluir si este material puede ser incluido en los las mezclas asfálticas como llenante mineral, buscando una sustancia que remplace los filler comunes, cemento, arena fina y cal, proponemos estudiar el **“CAOLÍN”**, el cual material será utilizado como un llenante mineral, está alternativa puede tener excelentes resultados por el aumento en las propiedades mecánica de la mezcla asfáltica.

Dando a entender que la idea de utilizar caolín como llenante mineral es viable y que en porcentajes bajos dio muy buenos resultados en otros estudios, lo que nosotros queremos es continuar con este estudio, aplicado en nuestro medio, observando las propiedades, y así poder afirmar que el caolín tiene altas propiedades para merecer ser utilizada como una llenante mineral.

### **1.3.2 Problema**

¿Qué cambios mecánicos produce la incorporación de caolín (silicato de aluminio hidratado) a una mezcla asfáltica para mejorar sus propiedades en pavimentos flexibles?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica cerrada a partir del remplazo de un llenante mineral de trituración por la adición del caolín como llenante mineral, cuyas propiedades mecánicas sean evaluadas por el diseño Marshall.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar paso a paso la metodología y recomendaciones de la guía de asfaltos para la correcta realización de los ensayos de laboratorio.
- Realizar la caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica convencional para la elaboración de las briquetas.
- Elaborar una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con caolín (silicato de aluminio hidratado) en diferentes porcentajes.
- Comparar el efecto de la adición de caolín como llenante mineral, con dos tipos de cemento asfálticos y tres diferentes tipos de agregados pétreos con los mismos porcentajes introducidos de caolín.
- Establecer los beneficios que se puede obtener con la incorporación de caolín a ser usado como llenante mineral a través de la elaboración de briquetas por el diseño Marshall.
- Analizar si el caolín tiene suficientes características para llegar a ser una llenante mineral competitiva con los que actualmente se utilizan.
- Hacer un análisis de costos de la mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificado con caolín.
- Efectuar un análisis comparativo de una mezcla asfáltica a través de gráficos estadísticos entre una mezcla introduciendo caolín y la mezcla convencional.
- Elaborar una buena redacción de las conclusiones y recomendaciones de nuestro estudio.

## **1.5 Hipótesis**

Si aplicamos porcentajes de llenante mineral (Caolín) en el diseño de mezclas asfálticas y lo empleamos en la construcción de capas de rodadura, entonces obtendremos un material que ofrezcan condiciones adecuadas para el flujo vehicular y soportar los esfuerzos inducidos por los ejes vehiculares y las condiciones medioambientales.

## **1.6 Definición de variables independientes y dependientes**

Las variables en la investigación, representan un concepto de vital importancia dentro de un proyecto. Las variables, son los conceptos que forman enunciados de un tipo particular denominado hipótesis.

### **1.6.1 Variable independiente**

Una variable independiente es considerada un fenómeno a la que se le va a evaluar su capacidad para influir, incidir o afectar a otras variables.

En investigación experimental se llama así, a la variable que el investigador manipula para ver los efectos que produce en otra variable, su nombre lo explica de mejor modo en el hecho que de no depende de algo para estar allí.

Para nuestra investigación la variable independiente es la **MEZCLA ASFÁLTICA**, por cuanto ésta no depende de algo para su aplicación y es la variable que vamos a manipular para mejorar sus propiedades.

### **1.6.2 Variable dependiente**

Una variable dependiente es una Propiedad o característica que se trata de cambiar mediante la manipulación de la variable independiente. Cambios sufridos por los sujetos como consecuencia de la manipulación de la variable independiente por parte del experimentador. En este caso el nombre lo dice de manera explícita, va a depender de algo que la hace variar.

Las variables dependientes son las que se miden.

En nuestra investigación la variable dependiente sería la llenante mineral (Caolín) ya que es el material a incorporar a la mezcla asfáltica para mejorar sus propiedades.

## **1.7 Diseño metodológico**

### **1.7.1 Componentes**

#### **1.7.1.1 Unidades de estudio y decisión muestral**

Las unidades de estudio y decisión muestral son las siguientes:

#### **1.7.1.2 Unidades de estudio**

Para nuestro estudio de investigación la unidad de estudio son los cementos asfálticos para pavimentos aplicados en una mezcla asfáltica.

#### **1.7.1.3 Población de estudio**

Como población de estudio tenemos a los cementos asfálticos diluidos y mezclados en una mezcla asfáltica.

#### **1.7.1.4 Decisión muestral**

En nuestra investigación tenemos los cementos asfálticos diluidos mezclados con una llenante mineral.

## **1.8 Métodos y técnicas empleadas**

Para el presente estudio de investigación se empleará el método inductivo y la técnica experimental.

### **1.8.1 Método inductivo**

El método inductivo es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares. Es método científico más usual en el que pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación para hechos de un registro; la clasificación y estudios de estos hechos; la derivación inductiva que parte de los hechos y permite llegar a una generalización; y la contrastación. Esto supone que, tras una primera etapa de observación, análisis y clasificación de los hechos se logra postular una hipótesis que brinda una solución al problema.

Se aplicará el método inductivo en la investigación revisando y siguiendo normas y guías de pavimentos establecidas en nuestro país para realizar los ensayos de

laboratorio, ya que la idea de utilizar distintos tipos de materiales para mejorar propiedades de otro no es nada nueva ya que se tiene conocimiento que data desde la antigüedad, todo esto como metodología constructiva para mejorar las propiedades de adherencia entre capas de pavimento.

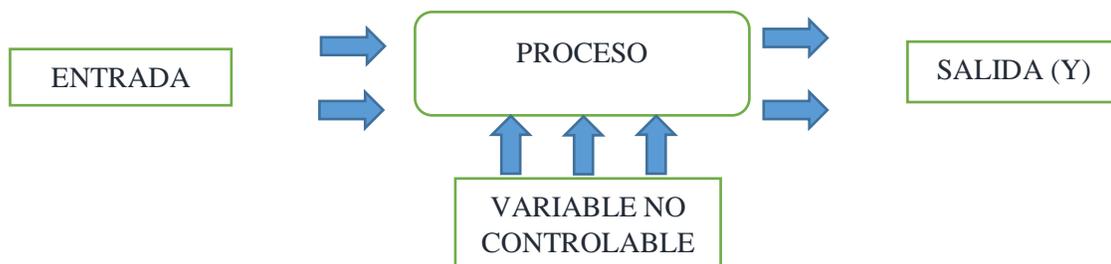
La metodología y estudios consistirán en realizar pruebas experimentales de laboratorio que ayuden a establecer de manera precisa parámetros reales, que sirvan de apoyo para implantar recomendaciones técnicas a la hora de utilizar caolín en las mezclas asfálticas.

Debido a que los datos obtenidos en los proyectos investigativos son de pruebas empíricas y consentimiento del investigador, este proyecto busca establecer resultados experimentales reales, los cuales servirán de guía y recomendación propia. del autor. La metodología consiste primeramente en la caracterización de los materiales a utilizar en el desarrollo de la investigación siguiendo parámetros y normas ya establecidas en nuestro país, primeramente, se caracterizará el material granular que se utilizará en la mezcla asfáltica a través de ensayos en el laboratorio, posteriormente se caracterizará el cemento asfáltico a utilizar a través de ensayos en laboratorio.

## 1.8.2 Técnicas empleadas

### 1.8.2.1 Diseño experimental

El diseño experimental es un método estadístico que se aplica en investigaciones experimentales en diferentes áreas: agricultura, industria, medicina, etc. Permite conocer mejor las variables involucradas en un proceso como una caja negra.



### **1.8.2.2 Técnica**

L La técnica a utilizar será experimental a través de ensayos sobre el material en estudio para evaluar sus propiedades.

Paso 1.- Caracterización de tres tipos de agregados para elaborar la mezcla asfáltica.

Paso 2.- Caracterización del cemento asfáltico a utilizar para la mezcla asfáltica.

Paso 3.- Caracterización de los materiales de la capa rodadura tipo.

Pasó 4.- Dosificación de la mezcla asfáltica.

Pasó 5.- Incorporación de caolín (llenante mineral) a la mezcla asfáltica.

Paso 6.- Elaboración de probetas de capa rodadura.

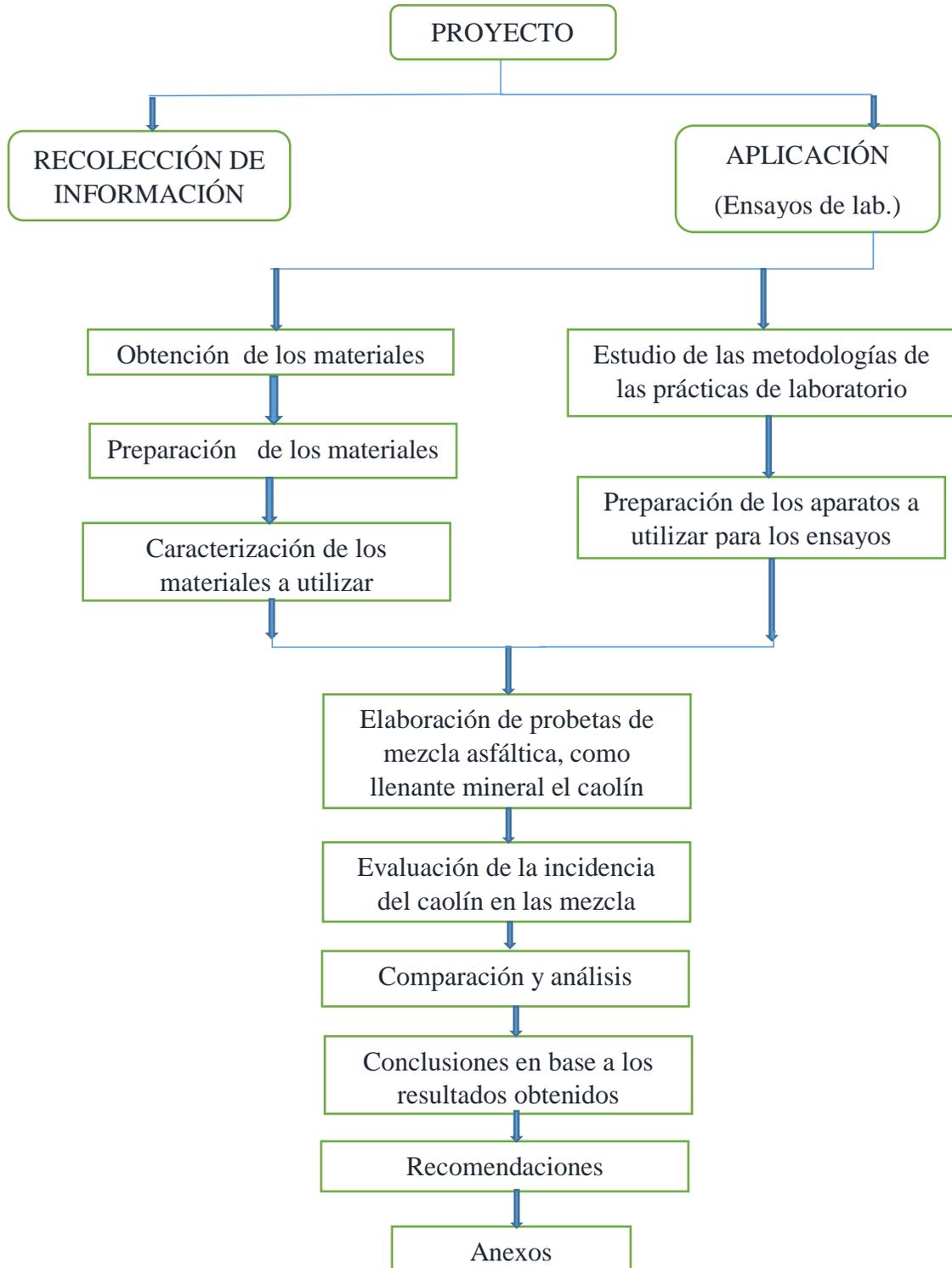
Pasó 7.- Colocado de caolín a la mezcla asfáltica aplicado a la capa rodadura.

Pasó 9.- Evaluación de la resistencia de la capa de rodadura a través del sometimiento de las briquetas.

Para ello se realizarán ensayos para cada tipo de asfalta y cada tipo de agregado pétreo en laboratorio para tener una muestra representativa de la presente investigación.

### 1.8.3 Metodología

Flujograma de proceso de la investigación a realizar



## **1.8.4 Técnicas de muestreo**

### **1.8.4.1 Técnicas de muestreo no probabilística**

El muestreo es no probabilístico que se aplicará para la obtención de una llenante mineral aplicada en la mezcla asfáltica y material de aportación.

El agregado de aportación se lo obtendrá de la chancadora “Garzón”, “Santana”, y de la planta de almacenamiento del SE.DE.CA., de la ciudad de Tarija y los cementos asfálticos se los obtendrá de la planta de almacenamiento del SE.DE.CA., de la ciudad de Tarija.

El silicato de aluminio hidratado (CAOLÍN) se lo obtendrá del yacimiento de caolín en Bolivia está ubicado dentro del radio urbano de la ciudad de Oruro, conocido como el cerro “la colorada” y es explotada por la corporación Minera de Bolivia (COMIBOL)

### **1.8.4.2 Descripción de equipos e instrumentos**

#### **1.8.4.2.1 Para caracterización de los asfaltos**

**Penetrómetro de asfalto.** - Aparato para determina la penetración del betún.

**Viscosímetro de Saybolt.**- Instrumento para determinar la viscosidad del asfalto.

**Cleveland de copa abierta.**- Aparato para determinación de punto de inflamación con el cual se determinará el punto de ignición.

**Ductilímetro.**- Instrumento con el cual se determinará la ductilidad del asfalto a una temperatura de 25 grados centígrados.

**Picnómetro.**- Instrumento que sirve para determinar la densidad o peso específico del cemento asfáltico en estudio.

#### **1.8.4.2.2 Para caracterización de los agregados para la mezcla asfáltica**

**Balanza.**- Es usada para obtener los distintos que se requieran con una sensibilidad de 0.1 g.

**Juego de tamices.**- El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11.

**Cesto cilíndrico.**- Canasta metálica hecha de malla metálica N 4, nos permitirá determinar el peso específico y absorción del agregado grueso.

**Matraz de 500 ml.-** Aparato que nos permitirá determinar el peso específico y absorción del agregado fino.

**Recipientes cilíndricos.-** Son cilindros que nos permitirán determinar el peso unitario de los agregados.

**Máquina de desgaste de los ángeles.-** Consiste en un tambor hueco de acero cerrado en ambos extremos y con esferas de acero.

#### 1.8.4.2.3 Para elaboración de probetas

**Molde de compactación.-** En este molde estará la mezcla asfáltica para la evaluación de las características volumétricas de las mezcla asfálticas.

**Compactador.-** Este compactador sirve para las probetas según especificaciones técnicas.

#### 1.8.5 Descripción de instrumentos

**La balanza digital.-** Es un instrumento de medición se caracteriza por dos rasgos fundamentales: su gran rango de pesaje y su capacidad para obtener el peso con una precisión asombrosa.

**Figura 1.1.** Balanza digital



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Hornos.-** Los hornos de secado son aparatos para mantener una temperatura entre 105°C y 150°C y sus termostatos no deben ser manipulados, pues toman un tiempo considerable en estabilizarlos y ajustarlos nuevamente a la temperatura requerida. Las muestras horneadas deben ser removidas del horno por el laboratorista a más tardar 24 horas después de haberlas colocada allí.

**Figura 1.2.** Horno eléctrico



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Tamices.-** Son mallas metálicas constituidas por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el material triturado. Las aberturas que deja el tejido y que en conjunto constituyen la superficie de tamizado pueden ser de forma distinta, según la clase de tejido. Las mallas cuadradas se aconsejan para productos de grano plano, escamas o alargado. Las aberturas se identifican por un número que indica la cantidad de aberturas por pulgada cuadrada.

**Figura 1.3.** Serie de tamices metálicos



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Ductilímetro.-** Consta de un recipiente de acero inoxidable provisto de un carro de tracción que se desliza a través de unas guías dentro del baño y que es accionado mediante un motor eléctrico. El equipo realiza el ensayo de manera automática en tres

probetas simultáneamente. Velocidad de tracción de 1 y 5 cm /min. Incluye 3 moldes de bronce.

**Figura 1.4.** Ductilímetro



Fuente: Elaboración propia.

**Penetrómetro.-** Equipo que permite el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0.1 mm El peso del vástago será de 47.5 g. y 0.05 g. el peso total de la aguja. Para cargas totales de 100 g. y 200 g., dependiendo de las condiciones es en que se aplique el ensaye, se estipulan pesas de 50.0 y 100.0 g.

**Figura 1.5.** Penetrómetro



Fuente: Elaboración propia.

**Viscosímetro.-** Se utiliza para comparar la viscosidad específica de aceites y alquitranes utilizados en carreteras, con la viscosidad del agua. Se compone de un baño de agua completo con un termorregulador digital de precisión, agitador eléctrico, dispositivo de refrigeración.

**Figura 1.6.** Viscosímetro



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Picnómetro.-** Es un instrumento de medición cuyo volumen es conocido y permite conocer la densidad o peso específico de cualquier fluido ya sea líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura.

**Figura 1.7.** Picnómetro



Fuente: Elaboración propia.

### **1.8.6 Procedimiento de aplicación**

**Caracterización de asfalto.-** La caracterización del cemento asfáltico a modificar como del cemento asfáltico a utilizar basándose en la determinación de la viscosidad, penetración y punto de inflamación ya que son los parámetros más importantes. Estos parámetros deben cumplir los rangos especificados por normas, caso contrario no sería factible para realizar las mezclas asfálticas y se busca otra procedencia de cemento asfáltico.

**Caracterización de agregados.-** Para la caracterización de los agregados de aporte se debe primeramente someter al secado de los mismos a través del horno.

Posteriormente se comenzará con la práctica del tamizarlo a través del rop tap para realizar el vibrado de los tamices y el posterior pesaje del material que quedó retenido en cada tamiz.

Con estos valores obtendremos la curva granulométrica de los agregados, se analizará la curva granulométrica la cual debe estar dentro de los rangos máximos y mínimos de cada tamiz para su utilización en la práctica.

También se realizará ensayos de peso específico, peso unitario y desgaste de los ángeles.

**Elaboración de briquetas.-** Para la elaboración de las briquetas, se debe considerar que la granulometría, contenido óptimo de cemento asfáltico, compactación de la capa rodadura que debe cumplir con las especificaciones de la norma para la elaboración de las probetas de capa rodadura.

Posteriormente una vez elaborado las briquetas a través de su compactación en los moldes a 75 golpes ambas caras de la muestra, se dejará por un periodo mínimo de 24 hrs. y posteriormente se realizará los cálculos correspondientes a la mezcla asfáltica. Siguiendo las normas de pavimentos, obteniendo la probeta completa para el estudio y evaluación de las propiedades de la mezcla asfáltica introduciendo la llenante mineral (caolín).

**Número de ensayos a realizar.-** Para la realización de este trabajo se realizarán los ensayos requeridos y necesarios, tanto, para agregados a utilizar y del cemento

asfáltico, así también se procederá a la elaboración de las probetas de carpeta de rodadura con el fin de comprobar la mejora de la mezcla asfáltica, mediante el método ensayo MARSHALL, se usará como llenante mineral, el caolín, adicionando diferentes porcentajes de caolín ( silicato de aluminio hidratado) que tendrán una variación del 0% al 5% con intervalo de 1%, de los cuales se utilizará el mejor porcentaje para realizar ensayos de durabilidad.

**Tabla 1.1.** Número de ensayos a realizar para la elaboración de las probetas

	<b>Ensayos a realizar</b>	<b>Cant.</b>
<b>Agregados</b>	Granulometría	3
	Peso específico del agregado grueso (grava)	3
	Peso específico del agregado grueso (gravilla)	3
	Peso específico de agregado fino (arena)	3
	Peso unitario de agregado grueso (grava)	3
	Peso unitario de agregado grueso (gravilla)	3
	Peso unitario de agregado fino (arena)	3
	Equivalente de arena	3
	Desgaste de los ángeles	2
<b>Cemento asfáltico</b>	Penetración	3
	Ductilidad	3
	Punto de inflamación	3
	Punto de ablandamiento	3
	Peso específico	3
	Pérdida de masa	3
	Viscosidad	3
<b>Total</b>	<b>45</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Se elaborará mezclas asfálticas (briquetas) para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la capa del pavimento flexible, la dosificación se realiza con la combinación de granulometría en función del porcentaje de C.A. adoptado según el contenido mínimo de cemento asfáltico.

**Tabla 1.2.** Elaboración de briquetas para obtener la cantidad óptima de C.A.

Porcentajes de cemento asfáltico	Número de briquetas
4.5%	3
5.0%	3
5.5%	3
6.0%	3
6.5%	3
7.0%	3
<b>Total briquetas</b>	<b>18</b>

Fuente: Elaboración propia.

## **1.9 Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información**

Una vez obtenido los resultados de caracterización y de los ensayos realizados en el laboratorio se procede al tabulado y si es posible corregir los resultados obtenidos de cada ensayo. Para el análisis se empleará la estadística descriptiva para el análisis de los datos.

### **1.9.1 Estadística descriptiva**

El proceso seguido en el estudio estadístico de una cierta característica o variable, puede subdividirse en tres pasos sucesivos.

**A). Recogida de datos.-** Planteado el test o encuesta oportuna y recogidos los datos que correspondan, el primer análisis que realizaremos es el del tipo de variable que pretendemos estudiar (cualitativa o cuantitativa; discreta o continua). Esto condicionará en gran medida su posterior tratamiento de los datos en estudio de la investigación.

**B). Organización de los datos. -** Determinado el modo de agrupamiento de las observaciones, procedemos a su recuento, construyendo la tabla de frecuencias. Posteriormente podremos visualizar tales frecuencias de forma gráfica con el diagrama estadístico apropiado.

**C). Análisis final.-** La obtención de muy diversas conclusiones respecto de la variable estudiada, se podrá realizar con auxilio de los diferentes parámetros estadísticos (de centralización, posición, dispersión, etc.).

Para nuestra investigación se trabajará con variables **cuantitativas** ya que los valores de las observaciones son numéricos (cuantificables) y en consecuencia estos son ordenables.

#### **1.9.1.1 Gráficos estadísticos a utilizar**

**Diagrama de barras.-** Para variables cuantitativas y cualitativas no agrupadas en intervalos.

#### **1.9.1.2 Medidas de dispersión**

**Rango.-** Con el fin de medir el mayor o menor grado de separación de las observaciones realizadas, es la diferencia entre el valor máximo y mínimo observado.

$$\mathbf{R = Máx. -Mín.}$$

**Desviación media.-** Es la media de las desviaciones o separaciones de cada una de las observaciones, respecto a la media aritmética, consideradas en valor absoluto.

$$Dx = \frac{\sum n_i |x_i - \bar{x}|}{N}$$

Con los ensayos de laboratorio determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que debe tener el riego de liga que es el material modificado en la investigación.

Con los ensayos de laboratorio se podrá determinar:

- Gráficos de resultados obtenidos con la incorporación de la llenante mineral.
- Relaciones entre la mezcla asfáltica con caolín y mezcla asfáltica convencionales.
- Gráficas de Resultados de estabilidad y fluencia.

**Coefficiente de variación (C.V.).-** Desviación estándar dividida por la media. También es conocida como desviación estándar relativa (R.S.D.). El coeficiente de variación puede ser expresado en porcentaje.

$$C.V. = \frac{S}{X}$$

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación.

S = Desviación estándar.

X = Valor medio.

### **1.10 Alcance de la investigación**

El tema en estudio “Análisis de la incidencia del caolín (silicato de aluminio hidratado) como llenante mineral en la respuesta mecánica de mezclas asfálticas cerradas” está limitado a mejorar las propiedades sobretodo de estabilidad y fluencia del pavimento asfáltico incorporando a la mezcla asfáltica el caolín existente en nuestro medio, con el fin buscar nuevos materiales para mejorar materiales asfálticos.

Primeramente, se describirá de manera general de que se trata la investigación para la incorporación de un llenante mineral en la mezcla asfáltica donde se dará a conocer su problemática, los objetivos, hipótesis, etc.

Posteriormente la teoría acerca de las mezclas asfálticas, se detallará estados de conocimiento acerca de los mismos como ser sus características, propiedades, clasificación, etc.

Luego nos referimos a los cementos asfálticos, donde se detalla toda información necesaria como las características, propiedades, componentes, sus limitaciones, etc. de cada material mencionado.

El siguiente paso es la experimentación que se realizará, describe los métodos, criterios y medios para la obtención de datos, caracterización de los materiales a utilizar para que luego sean analizados.

**CAPÍTULO II**  
**CEMENTO ASFÁLTICO, MEZCLA**  
**ASFÁLTICAS Y LLENANTE MINERAL**

## **CAPÍTULO II**

### **CEMENTO ASFÁLTICO, MEZCLA ASFÁLTICAS Y LLENANTES MINERALES**

#### **2.1 Antecedentes de los asfaltos**

Como se explica en el manual del instituto del asfalto, el asfalto es uno de los componentes ingenieriles más arcaico utilizado desde los inicios del hombre para la construcción. Fue en Egipto, aproximadamente en el año 2500 a.c. que el asfalto fue descubierto; es una palabra cuyo vocablo que deriva de “Sphalto” que significa “que deja caer” este término se utiliza en Asiria entre los años 1400 y 600 a.c.

Tiempo después esta palabra fue adoptada por los griegos, quienes le otorgaron el significado de “que rigidiza o estabiliza, y finalmente evoluciono al latín y después al francés (asphalte) y al español (asfalto), hasta llegar al inglés (asphalt).

En el antiguo mundo el asfalto era utilizado como mortero para la pega de bloques en la construcción, en la realización de pavimentos interiores y como impermeabilizante en la industria naval y números aplicaciones más.

Como ejemplos históricos de ello se encuentren: la industria naval que producía y utilizaba el asfalto en sumeria ceca de los 6000 a.c., el uso de asfalto como mortero en la construcción de torres de babel y la utilización como material impermeable que le daban los egipcios al igual que como material de relleno del cuerpo humano en el proceso de momificación.

En aquel entonces era común encontrar asfalto natural depositado en estanques y lagos de asfalto, así como en piedras porosas como la caliza y la arenisca (piedras conocidas también como piedras asfálticas). Esto se explica debido a las fuerzas geológicas que provocaron el ascenso del asfalto a la superficie y al hacer contacto este con los elementos de la atmosfera provocaban su endurecimiento, ejemplo de esto son los depósitos del lago de asfalto de trinidad, el cual se encuentra en la isla del mismo

nombre en la costa de Venezuela. Sin embargo, en la actualidad el asfalto que se utiliza es artificial y se deriva del petróleo.

El asfalto refinado comenzó a utilizarse hace casi doscientos años como sustituto del asfalto natural debido a que este último solo se encontraba en lugares apartados y su geología no era tan buena, ya que su contenido malténico al calentarse se evaporaba con rapidez y se endurecía con mucha facilidad. Al mismo tiempo, la industria automotriz empezó a expandirse por lo que una nueva industria llegó para mejorar las condiciones de las carreteras proporcionándoles texturas más suaves y diseños más modernos, por lo que el asfalto comenzó a verse como producto industrial barato e inagotable; fue así como se inició el uso del asfalto en las carreteras.

A principios del siglo XIX, sus aplicaciones se enfocaron en el ámbito de las vías terrestres, por lo que fue en 1802 cuando se utilizaron por primera vez en Francia rocas asfálticas como material para la construcción de banquetas, y en Filadelfia se utilizaron en 1838, pero la evolución del asfalto y su aplicación en las vías terrestres se dio en 1870 en Newark, New Jersey, cuando se construyó el primer pavimento de asfalto en el mundo.

Conforme la industria de las mezclas asfálticas iba en ascenso, comenzaron a surgir nuevas investigaciones para conocer el comportamiento de los asfaltos por medio numerosas pruebas que fueron desarrollándose. En 192 Prevost Hubbard desarrolló uno de los primeros métodos de evaluación para determinar el Gmb (propiedad física de una mezcla asfáltica compactada) con el fin de simular el comportamiento de ésta en campo.

Cinco años más tarde, Francis Hveem desarrolló un método de evaluación para el sangrado por exceso de asfalto en una mezcla asfáltica compactada y también obtener una mezcla más estable. Al mismo tiempo Bruce Marshall desarrolló uno de los métodos más importantes de la historia, el cual determina la cantidad óptima de asfalto

y de densidad que debe tener una mezcla asfáltica compactada para resistir las cargas transmitidas por los vehículos hacia la estructura<sup>1</sup>.

## **2.2 Definición**

Desde el punto de vista de composición química, los asfaltos son mezclas complejas de hidrocarburos de alto peso molecular, con una notable proporción de heteroátomos (oxígeno, azufre, nitrógeno) y cierta cantidad de metales, tales como vanadio y níquel. Adicionalmente, la mayoría de los asfaltos muestran en su composición ciertas sales orgánicas solubles en la forma de microcristales.

Todos estos constituyentes proporcionan las características físicas, reológicas, coloidales y de durabilidad en el asfalto. Desde el punto de vista estructural, se considera al asfalto como una sustancia coloidal compuesta de varias fracciones, siendo las principales los asfáltenos, los máltenos, las resinas, y los carbenos.

Los asfáltenos son sustancias policíclicas de alto peso molecular (>5000), aglomeradas en forma de partículas sólidas y constituyen la fase coloidal dispersa en el asfalto. Se ha determinado que los asfáltenos son típicamente compuestos de hidrocarburos aromáticos con cadenas laterales parafínicas en grado variable, dependiente de la procedencia del crudo y las condiciones de elaboración del asfalto.

Los asfáltenos pueden ser precipitados utilizando disolventes saturados y volátiles, tales como el "spirit" de petróleo IP (sulfonado y con rango de ebullición entre 60 y 80° C), n-pentano o n-heptano; son solubles en benceno, pero insolubles en hexano. La cantidad de asfáltenos precipitados, así como su naturaleza, puede variar dependiendo del tipo de solvente que se utilice. La parte no precipitada corresponde a los máltenos.

Los aceites (máltenos) representan los hidrocarburos de menor peso molecular, son líquidos a temperatura ambiente y constituyen la fase continua del sistema coloidal.

---

<sup>1</sup> Ayala, M. y Juárez, I. Tesis de Grado: Diseño de Mezcla Asfáltica Modificado con fibra de vidrio disponible en el Salvador. San Salvador: U. de el Salvador (2010).

Los asfáltenos le confieren al asfalto la dureza y los máltenos le proporcionan las propiedades de adhesividad y ductilidad; las resinas y carbenos tienen influencia en la viscosidad, o propiedad de flujo del asfalto.

Las resinas son sustancias de consistencia semisólida o pastosa y un color más claro que los asfáltenos. Tienen un peso molecular más bajo que los asfáltenos (oscila entre el de los asfáltenos y el de los máltenos), están disueltas en el crudo y son parcialmente solubles en el hexano, pero insolubles en el propano. Constituyen el elemento que permite mantener la estabilidad del sistema coloidal al propiciar la interacción entre los asfáltenos y los máltenos. Cuanto mayor es el contenido de resinas, más dúctil y blando es el asfalto. Los carbenos son constituyentes de naturaleza muy aromática, y representan la pequeña parte insoluble en CS<sub>2</sub> (en la cual el asfalto es prácticamente soluble).

Las características del asfalto dependen esencialmente de las proporciones relativas de sus constituyentes. A mayor proporción de asfáltenos, mayor dureza. Por oxidación al aire se pueden transformar las resinas y los máltenos en asfáltenos y por lo tanto aumentar la dureza.

### **2.3 Producción de asfalto**

A través de los tiempos el asfalto y sus mezclas han ido modificándose. Desde la referencia de los afloramientos de asfalto en el mar muerto y de su utilización en la india como impermeabilizante de muros en los almacenamientos de agua.

En la actualidad no podríamos concebir el mundo que vivimos sin la mezcla asfáltica, que pavimenta los caminos y no se permite la comunicación, y el intercambio de productos y servicios.

La necesidad ha cambiado y las técnicas también, por lo cual, me permito recordarles un poco de los últimos cambios en la fabricación y que tratemos todos de pensar en cuál será el futuro.

Al transcurso del tiempo las plantas de asfalto han ido cambiando su diseño, de acuerdo a las necesidades y los cambios de especificación. Muchos de los cambios han sido causados por los ahorros, mayor producción o por mejoramiento de las emisiones contaminantes.

Hace unos 40 años, las plantas productoras de mezcla asfáltica, eran del tipo dosificadoras y producían con una gran calidad. De estas plantas aún hay algunas en operación y siguen produciendo con esa alta calidad.

Debido a restricciones para contaminar el ambiente y en especial la del aire, a las plantas se tuvo que adicionar equipos más grandes y difíciles de transportar.

A los comienzos de los 70 se introducen a la industria de las mezclas asfálticas las secadoras y mezcladoras de tambor, que aunadas a los silos de almacenamiento y a la disponibilidad de controles eléctricos, nos permiten tener plantas productoras continuas que funcionan más sencillamente y que poder trasladarlas con mayor facilidad logrando economías en la producción.

Por frecuencia los cambios tecnológicos y de mejoría del medio ambiente nos llevan a modernizar los equipos productores de concreto asfáltico para reducir los costos de operación, ser competitivos y con mejor calidad.

En el presente ya se usan métodos de calentamiento, como las microondas y se están desarrollando cada vez más rápido nuevas técnicas, haciendo obsoletas hasta las plantas que aún no han tenido el 50% de su vida económica. Es de suponer que estos procesos se aceleran o produzcan otros cambios más drásticos, a medida que en algunos países empiece a escasear el petróleo.

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfaltos. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando vidrios tipo crudos de petróleo antes de procesarlos.

El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción de solventes.

La destilación por vacíos consiste en separar al asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos de crudo dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto.

Es así como un sulfato muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo del petróleo o mezcla de crudo de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de la destilación por vacíos o extracción con solventes<sup>2</sup>.

## **2.4 Composición del asfalto**

Antes de intentar discutir las relaciones entre la composición química y las propiedades del asfalto que afectan la durabilidad, daremos atención a la composición química del asfalto. El asfalto no está compuesto de elementos químicos simples, es una mezcla bastante compleja de moléculas orgánicas, sistemas de alta condensación llamados aromáticos.

Un análisis elemental de varios asfaltos se muestra en la tabla 2.1. Aunque las moléculas de asfalto están compuestas predominantemente de carbono e hidrógeno, la

---

<sup>2</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

mayoría de las moléculas contienen una o más de los llamados heteroátomos de nitrógeno, azufre y oxígeno junto con algo de metales, principalmente vanadio y níquel.

**Tabla 2.1** Composición de un asfalto

<b>Código</b>	<b>B-2959</b>	<b>B-3036</b>	<b>B-3051</b>	<b>B-3602</b>
<b>Origen</b>	<b>Mezcla Mexicana.</b>	<b>Arkansas Lousiana.</b>	<b>Boscan.</b>	<b>California.</b>
Porcentaje de Carbono	83.77	85.78	82.90	86.77
Porcentaje de Hidrogeno	9.91	10.79	10.45	10.94
Porcentaje de Nitrógeno	0.28	0.26	0.78	1.10
Porcentaje de Azufre	5.25	3.41	5.43	0.99
Porcentaje de Oxigeno	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio, ppm.	180.00	7.00	1380.00	4.00
Níquel, ppm.	22.00	0.40	109.00	6.00

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt Institute

Como se observa en la tabla, los heteroátomos, aunque en menor proporción comparado, con las moléculas de hidrocarburo, pueden variar en concentraciones por arriba de los rangos que dependen del origen del asfalto, porque los heteroátomos a menudo se encadenan de manera funcional con la polaridad de sus moléculas, su presencia puede generar una gran alteración en algunas de las propiedades físicas entre asfaltos de diferente origen.

Un análisis elemental con valores promedio entrega poca información acerca de los átomos que se incorporan a las moléculas o sobre qué tipo de estructura molecular está presente. El tipo de estructura molecular es una información necesaria para entender fundamentalmente los efectos de la composición en las propiedades físicas y en la actividad química de este material.

El asfalto es indudablemente producto de materia orgánica de organismos vivos depositada y transformada, por ello la estructura molecular del compuesto presenta una gran diversidad. Carbonos en sistemas llamados aromáticos son estimados por

correlación basados en análisis *carbono – hidrógeno*, [H.E. Schweyer and E.L. Chipley; 1967], [L.W. Corbett; 1967] sus densidades determinadas directamente por resonancia magnética molecular (*NMR*).

Las concentraciones de carbono aromático determinadas por NMR presentan un contenido típico de 25 a 35 por ciento de asfalto.

La estructura molecular del hidrocarburo es muy compleja por los heteroátomos de azufre, nitrógeno, y oxígeno que están presentes en una combinación suficiente, uno o más heteroátomos por molécula pueden estar presentes. Estos pueden estar incorporados dentro de los componentes, o en un grupo químico funcional más discreto junto a estos componentes.

Los heteroátomos, particularmente nitrógeno y oxígeno, y el denominado sistema aromático contribuyen considerablemente a la polarización de las moléculas que provocan las principales fuerzas de cohesión y las propiedades físicas.

## **2.5 Propiedades físicas de los asfaltos**

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

### **2.5.1 Durabilidad**

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

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la prueba de película delgada en horno (TFO) y la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO).

### **2.5.2 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.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos, como relacionada con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

### **2.5.3 Susceptibilidad a la temperatura**

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más 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 o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas

temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

#### **2.5.4 Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia 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).

En el proceso de elaboración de la mezcla el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se encuentra en el tambor mezclador. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la prueba de película delgada en horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento.

Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

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

Una vez más, las causas principales la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado<sup>3</sup>.

## **2.6 Propiedades químicas del asfalto**

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

En condiciones normales, los hidrocarburos forman una solución coloidal de dos fases, en la que los hidrocarburos más pesados, denominados asfáltenos, están dispersos en las moléculas de hidrocarburos más ligeros, denominados máltenos. Los asfáltenos por su color negro y similitud con el polvo grueso de grafito, le proporcionan su color y dureza al asfalto. Los máltenos son líquidos viscosos y pegajosos compuestos de resinas y aceites que le proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto (su valor cohesivo).

La proporción de asfáltenos y máltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno.

Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento:

---

<sup>3</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

Envejecimiento primario o de corto plazo: Se produce desde la fabricación de la mezcla, hasta el proceso de compactación, se debe a altas temperaturas que es sometido el asfalto para realizar los trabajos de elaboración de las mezclas asfálticas. La volatilización es su causa principal (evaporación de los constituyentes más livianos del asfalto).

Envejecimiento secundario o de largo plazo: Es aquél que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. La oxidación es su causa principal (reacción del asfalto con el oxígeno).

## **2.7 Ensayos empíricos del cemento asfáltico**

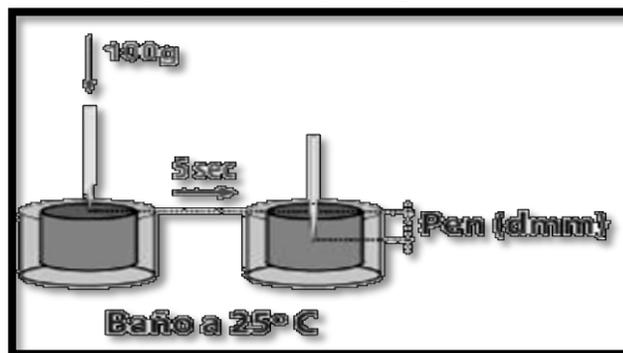
Para estudiar la consistencia de los asfaltos se desarrollan ensayos en laboratorio, los cuales determinan si son aptos o no para trabajar en las mezclas asfálticas destinada a la pavimentación<sup>4</sup>.

**Penetración.-** El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100g y que la carga se aplica durante 5 seg. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

---

<sup>4</sup> Laboratorio nacional de vialidad. (Junio de 2015). Mezcla asfáltica en caliente. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)

**Figura 2.1** Ensayo de penetración



Fuente:[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAIO0i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAIO0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

Los asfaltos se clasifican según su dureza o consistencia por medio de la penetración en milésima de milímetros, el instituto de asfalto ha adoptado cuatro diferentes grados de asfalto para pavimentación comprendidos los cuales están dentro de los siguientes rangos.

**Tabla 2.2** Clasificación de asfalto según su dureza

Asfalto para pavimento	
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

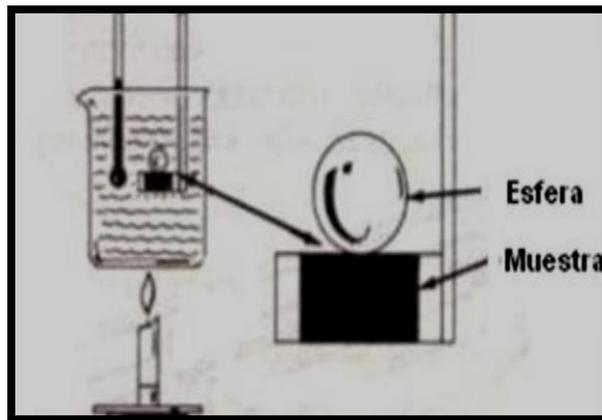
Fuente: Carlos Luis Verdezoto

**Punto de ablandamiento.** - Los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a diferentes temperaturas.

Normalmente este método se lo realiza mediante el método arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los cementos asfálticos de pavimentos, frecuentemente se usa para caracterizar los materiales más duros que son empleados en otras aplicaciones e indica la consistencia del asfalto una vez tomada la temperatura necesaria del mismo y se ablanda esto puede ser en un rango de 48° a 57°C.

El ensayo consiste en llenar de asfalto dos anillos de latón de dimensiones normalizadas, las muestra separadas una de la otra se suspende de un baño de agua destilada y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificado, a continuación, se calienta el baño a una velocidad de 5 °C por minuto y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero caiga desde una distancia de 25mm está temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

**Figura 2.2** Ensayo de punto de ablandamiento



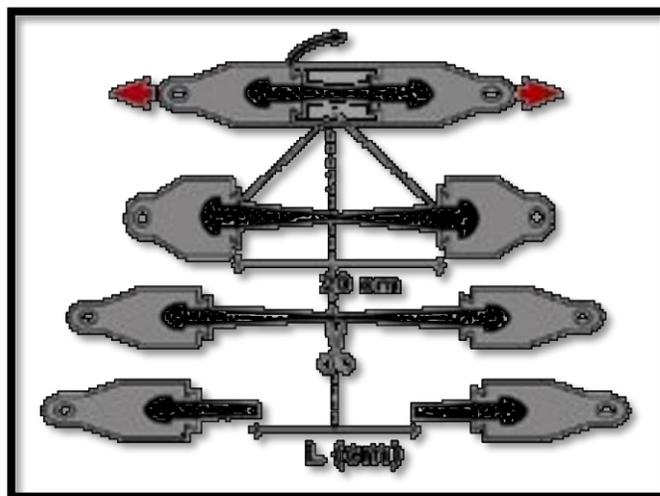
Fuente:[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAIO0i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAIO0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

**Ductilidad.-** La ductilidad es una propiedad que tienen algunos elementos que pueden deformarse sin romperse.

Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica. Por otro lado, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura.

Consiste en colocar una muestra o patrón en un baño de ductilidad a 25°C, para después medir el alargamiento elástico en porcentaje de la deformación con una velocidad de alargamiento de 5cm/min $\pm$ 5%, antes de la ruptura (>100cm); unos asfaltos con ductilidad elevada son susceptibles a los cambios de temperatura.

**Figura 2.3** Ensayo de ductilidad



Fuente:[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

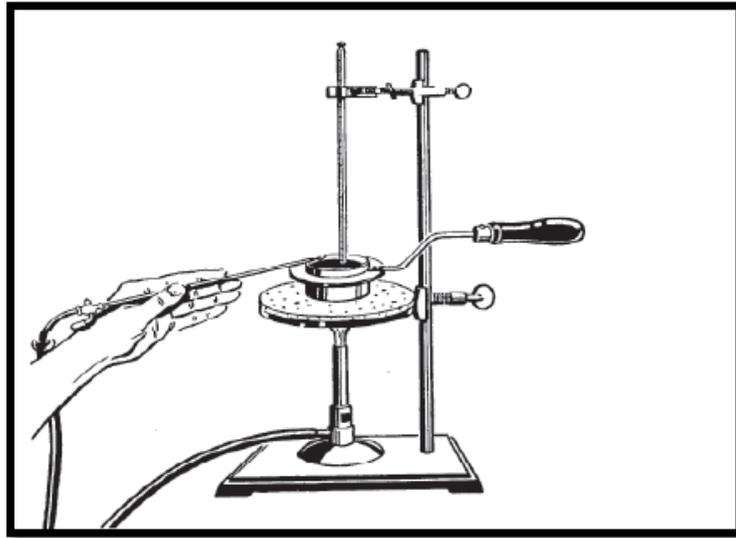
**Punto de inflamación.-** El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland. Según condición normalizada prescrita en el método ASTM D-92, se trata de un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida.

Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

**Figura 2.4** Ensayo de punto de inflamación



Fuente:[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

**Peso específico.-** Es necesario conocer el peso específico del asfalto que se emplea para hacer las correcciones de volumen y se emplea también como factor para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentos compactados.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso especificado de 1.05 significa que el material pesa 1.05 veces lo que pesa el agua a temperatura fijada.

Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expande cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.

En Ecuador PETROECUADOR, produce cementos asfálticos en la refinería de Esmeraldas, que por sus características físicas de penetración (según el MTOP 60-70) es utilizado como un asfalto AC-20.

Los resultados de los ensayos antes indicados comparados con sus respectivas especificaciones, nos lleva a concluir si este asfalto es apto o no para posteriormente ponerlo en uso.

## **2.8 Mezclas asfálticas**

### **2.8.1 Empleo de las mezclas asfálticas en la construcción de firmes**

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

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

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

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

- a) Firmes Flexibles. (Base Granular).

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

- b) Firmes Flexibles. (Base Asfáltica).
- c) Compuesto por una base y un pavimento asfáltico y el cual está constituido por una capa intermedia y otra de rodadura, la sub-base puede ser granular o bien tratada con un ligante hidráulico o hidrocarbonado.
- d) Firmes Semi-rígidos. (Base tratada con ligantes hidráulicos).

Constituido por una capa de base tratada con ligantes hidráulicos, o de concreto, la sub-base suele ser de material granular, pudiendo ser estabilizada, el pavimento está formado por una o dos capas de mezcla asfáltica (rodadura e intermedia).

e) Firmes Rígidos. (Pavimentos de hormigón).

Están formados por una losa de hormigón colocada directamente sobre la explanada, o sobre una capa de base granular o estabilizada o un hormigón pobre, la losa de hormigón actúa como capa de rodadura.

### **2.8.2 Funcionalidad de las mezclas asfálticas en los firmes**

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

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

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

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

1. La adherencia del neumático al firme.

2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

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

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento. Por ejemplo, son fácilmente asequibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad de los vehículos, en los métodos de diseño de pavimentos.

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

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

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

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

### **2.8.2.1 Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura**

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

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, en los países fríos, en particular en el centro de Europa, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no proporcionan la textura adecuada, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla como son la incrustación en la superficie de gravillas o al abujardado en caliente.

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

### **2.8.2.2 Propiedades de las mezclas asfálticas para capas inferiores**

Las capas de espesor apreciable de un firme tienen una misión estructural fundamental para absorber la mayor parte de las solicitaciones del tráfico, de forma que éstas lleguen convenientemente disminuidas a las capas inferiores, explanada o cimiento de la carretera.

Existen tendencias y países que llegan a utilizar paquetes asfálticos de gran espesor que forman la losa estructural fundamental del firme. En otros casos la función resistente radica en la colaboración con otras capas de materiales granulares o hidráulicos.

La tendencia española tradicional para el diseño de las mezclas de las capas gruesas de base ha sido la de elegir granulometrías inspiradas en el Instituto del Asfalto, con muchos huecos. Las mezclas anteriores son netamente abiertas con un esqueleto mineral, en cuyo rozamiento interno radica la función resistente. Estas mezclas se podían considerar inspiradas en las antiguas bases de piedra partida o Macadam tratadas por penetración con ligantes hidrocarbonados.

### **2.8.3 Definición de las mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua este. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción 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.

### **2.8.4 Clasificación de mezclas asfálticas**

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

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

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

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

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la 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.

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

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

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenan téis: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

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

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

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

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

#### **f) Por la Granulometría**

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

### **2.8.5 Tipologías de las mezclas asfálticas**

#### **2.8.5.1 Mezcla asfáltica en caliente**

Constituye el tipo más generalizado de mezclas asfálticas y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de

ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente. (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales art. 542 y 543 PG3.) Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

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

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

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

WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas. Con FHWA.

5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrolló de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura. Con NCHRP.

6. Método SUPERPAVE (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

#### **2.8.5.2 Mezclas asfálticas en frío**

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja

debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

#### **2.8.5.3 Mezcla porosa o drenantes**

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos, con asfaltos normales, se aplican en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón.

Utilizadas como mezclas en caliente para tráfico de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm, se consigue que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacúe rápidamente por infiltración.

#### **2.8.5.4 Microaglomerado**

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm, lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los microaglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor.

Hay microaglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

#### **2.8.5.5 Masillas**

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que, si hay agregado grueso, se haya disperso en la masilla formada por aquellos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.

Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Los asfaltos fundidos, son de este tipo, son mezclas de gran calidad, pero su empleo está justificado únicamente en los tableros de los puentes y en las vías urbanas, incluso en aceras, de los países con climas fríos y húmedos.

#### **2.8.5.6 Mezclas de alto módulo**

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 Mpa. a 20 grados centígrados y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15 cm, tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de grava cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción o como las mezclas convencionales en gran espesor la ventaja es una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorra espesor.

### **2.8.6 Consideraciones para la selección de una mezcla asfáltica**

En muchas ocasiones, el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante, sin embargo, esa es solo la última fase de un proceso más amplio, que requiere de un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados, a fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución.

Las fases de las que consta el proyecto de una mezcla son las siguientes:

- a) Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, etc. Asimismo, hay que distinguir si se trata de un firme nuevo o de una rehabilitación.
- b) Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- c) Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar.
- d) Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación.
- e) Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo es siempre un factor muy relevante.
- f) Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de

las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un huso previamente seleccionado.

g) Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, Estructura del firme, Técnicas de Diseño y Ejecución, Sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias trazado de la vía, entre otros), Condiciones de drenaje, Consideraciones económicas. Para realizar el proyecto de una mezcla asfáltica que se empleará en un determinado pavimento existe una gama amplia de posibles soluciones, para esto se hace necesario un estudio muy riguroso y detenido, para elegir el diseño más adecuado técnica y económicamente.

Existen también principios que se aplican de acuerdo con las siguientes reglas:

a) Tipo de mezclas asfálticas según su composición granulométrica.

El tipo de mezcla asfáltica a emplear se determinará en función de:

- La capa de firme a que se destine.
- La categoría del tráfico.
- La sección de firmes correspondiente.

b) Tipo de ligante asfáltico.

El tipo de ligante asfáltico a emplear dependerá de:

- La capa de firme a que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- La categoría del tráfico.
- El clima de la zona en que se encuentre la carretera.

c) Relación Fíller /Asfalto.

La relación ponderal de los contenidos de filler y asfalto de la mezcla asfáltica, dependerá de:

- La capa de firme a que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- La categoría del tráfico.
- La zona en que se encuentre la carretera.

## **2.9 Diseño de mezclas asfálticas**

Existen diferentes métodos de diseño. En Bolivia oficialmente se usa el Método Marshall.

- Método Marshall: Basado en estabilidad y contenido de vacíos.
- Método Superpave: Basado en el contenido de vacíos.

Una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinaciones en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen varios métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de agregado y asfalto en una mezcla.

El método Marshall tiene como propósito determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método provee información propiedades de la mezcla asfáltica caliente y establece contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. El método Marshall, como se presenta en esta sección, solo se aplica en mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que utilizan cemento asfáltico clasificado, con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm o menos. El método puede

ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente de penetración<sup>5</sup>.

### **2.9.1 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas**

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad del pavimento de mezclas en caliente estas incluyen la: estabilidad, la durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo principal de procedimiento de diseño de mezcla es el de garantizar que a mezcla de pavimentación posee cada una de estas propiedades.

**Estabilidad.-** La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo las cargas repetitivas.

**Durabilidad.-** La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto.

**Impermeabilidad.-** La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior, a través de esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseños de mezcla se relacionan con impermeabilidad.

---

<sup>5</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

**Trabajabilidad.-** La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Cuando la trabajabilidad es mala puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

**Flexibilidad.-** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse sin que se agriete, al movimientos y asentamientos graduales de la subrasante se sientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

### **2.9.2 Características de los materiales pétreos para las mezclas asfálticas**

Los agregados pétreos típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 %, en peso, y entre 75 y el 85 %, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayor de las características de capacidad portante.

Los agregados adecuadamente graduados por su tamaño y escogidos por las propiedades que les provee su naturaleza forman lo que se conoce como el esqueleto pétreo y se mantienen íntimamente adheridos y cohesionados por las propiedades que posee el asfalto.

Debido al rompimiento de la emulsión asfáltica se lleva a cabo por la interacción química de ésta con el material pétreo, es necesario conocer el tipo de material pétreo que se tiene para determinar el tipo de emulsión asfáltica más apropiada.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Según la asociación de productores y pavimentadores asfálticos, la roca se tritura para angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas.

En un estudio se hizo el análisis con material que fue obtenido de forma procesada e industrial donde se determinó que la distribución de tamaños de agregados se realiza de manera que los vacíos de las fracciones gruesas sean llenados por las fracciones finas dejando espacio suficiente para el ingreso del ligante y vacíos de aire. La estabilidad de la mezcla se logra a través de la sucesión de contactos entre distintas fracciones con un mínimo de asfalto y de vacíos de aire.

El agregado grueso debe proceder de la trituración de la roca o de la grava o de una combinación de ambas, sus fragmentos deberán ser limpios resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, estará exento de polvo, estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla y otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

Dentro de las propiedades y características de los agregados para obtener un pavimento asfáltico de calidad podemos mencionar las siguientes:

**Gradación y tamaño de la partícula.-** Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones de acuerdo a normas establecidas. Esta distribución de varios tamaños de partícula dentro del agregado es comúnmente llamada gradación del agregado o gradación de la mezcla.

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

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra del agregado antes de ser lavado es comparado con su peso después de ser lavado) proporciona una medida exacta del porcentaje del material indeseable más fino que 0.075 mm. El ensayo de

equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm

**Dureza.-** Los agregados deberán ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla asfáltica y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que estén en, o cerca de la superficie, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores en la estructura del pavimento, esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito.

**Forma de la película.-** La forma de la película afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación en la obra, así como la cantidad de la fuerza necesaria para compactar la mezcla asfáltica y la densidad requerida. La forma de las partículas también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.

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

**Textura de la superficie.-** La textura superficial de las partículas del agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la de papel de liga aumenta la resistencia en el pavimento debido que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento de tránsito sea más seguro.

Adicionalmente las partículas de asfalto se adhieren mejor a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

**Capacidad de absorción.-** Todos los agregados son porosos y algunos más que otros la cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información dentro del estudio que se realizará. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las de más partículas de agregado. Debido a esto un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados para la elaboración de mezclas asfálticas a menos que posean otras características que lo haga deseable, a pesar de su alta capacidad de absorción.

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

Los agregados hidrofóbicos tienen poca afinidad con el asfalto por lo consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestas al agua. Existen varios ensayos para determinar la afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar es sumergido en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente<sup>6</sup>.

### **2.9.3 Porcentaje de asfalto en la mezcla**

---

<sup>6</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

El ligante asfáltico interviene en las mezclas asfálticas en proporciones diferentes según el tipo de formulación, generalmente este valor oscila entre el 3% y el 10 % sobre la masa de los agregados pétreos. Generalmente los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su antigua clasificación de acuerdo al ensayo de penetración, como aquellos de penetración intermedia (50/60 y 70/100) y actualmente también tienen un uso generalizado los asfaltos modificados. El asfalto, está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contienen otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. La principal propiedad que le confiere el asfalto a la mezcla es su adhesividad o poder ligante, mediante el cual se mantienen íntimamente unidas las partículas de agregados. Otra de las propiedades importantes del ligante asfáltico es su impermeabilidad y la resistencia a la mayoría de los ataques químicos que pueden generar los ácidos, álcalis y las sales. Por último, su susceptibilidad térmica, o comportamiento termoplástico marcan su diferencia de comportamiento entre los distintos intervalos térmicos a los cuales puede estar expuesto el asfalto. Los asfaltos convencionales poseen una elevada viscosidad a baja temperatura, y a medida que son sometidos a temperaturas mayores, su viscosidad desciende considerablemente.

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de los resultados de la relación de vacíos-densidad, y de la prueba de estabilidad-flujo. Se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos sea de 5% para una mezcla densa y 10% para una mezcla abierta. Luego, se evalúan las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto, y comparadas con los criterios de diseño.

Si se cumplen todos los criterios, es el contenido de diseño de asfalto. Si no se cumplen todos los criterios será necesario hacer algunos ajustes a volver a diseñar la mezcla.

### **2.9.3.1 Mezcla asfáltica densa**

Para obtener el porcentaje óptimo de una mezcla densa se elaboraron pastillas con un porcentaje de asfalto de 6.0%, 6.25% y con un 6.5%, ya no se elaboraron más pastillas ya que si se aumentaba el porcentaje estaba muy sobrada y si se realizaba con un porcentaje menor faltaría por cubrir el agregado, esto se caracteriza de acuerdo a su aspecto físico del asfalto con respecto a los agregados.

El porcentaje que se determinó de acuerdo a los vacíos, fue de 6.25% de asfalto por el cual se empezó a mezclar las placas asfálticas.

**Tabla 2.3** Prueba de Marshall para una mezcla densa

Pastilla	% de Asfalto	Resistencia (kg)	Flujo (mm)
1	5.75	1170.3615	4.6961
2	5.75	926.2637	3.6901
3	5.75	1225.1513	4.5438
4	6.00	1162.9452	3.8806
5	6.00	1117.7172	4.4149
6	6.00	1249.2191	5.1913
7	6.25	989.2316	4.0629
8	6.25	1380.1147	3.8516
9	6.25	1257.6614	4.3555
10	6.50	1258.7031	4.5779
11	6.50	1096.5258	4.3894
12	6.50	1186.4066	3.8700

Fuente: Especificaciones técnicas de mezcla asfáltica caliente, Comisión Permanente de Asfalto argentina 2006

### 2.9.3.2 Mezcla asfáltica abierta

Para obtener el porcentaje óptimo de una mezcla cerrada se elaboraron pastillas con un porcentaje de asfalto de 5.0, 5.25 y con un 5.5%, de igual forma para la mezcla densa, ya no se siguió elaborando más pastillas ya que si se aumentaba el porcentaje estaba muy sobrada y si se realizaba con un porcentaje menor faltaría por cubrir el agregado, esto se caracteriza de acuerdo a su aspecto físico del asfalto con respecto a los agregados.

El porcentaje que se determinó de acuerdo a los vacíos mencionados anteriormente fue de 5.25% de asfalto por el cual se empezó a mezclar las placas asfálticas.

**Tabla 2.4** Prueba de Marshall para una mezcla abierta

Pastilla	% de Asfalto	Resistencia (kg)	Flujo (mm)
1	5.00	777.6907	5.284
2	5.00	1159.6491	6.3643
3	5.00	929.933	2.5573
4	5.25	1031.5678	5.2941
5	5.25	0	0
6	5.25	852.1949	4.7727
7	5.50	892.4321	4.8239
8	5.50	1340.8569	6.3465
9	5.50	806.9669	3.9069

Fuente: Especificaciones técnicas de mezcla asfáltica caliente, Comisión Permanente de Asfalto argentina 2006

## 2.10 Tipos de asfaltos

Los tipos de asfalto refinado producidos por destilación directa son los siguientes:

Se producen asfaltos directamente de los cementos asfálticos, disolviéndolos en destilados volátiles; esos productos se llaman asfaltos rebajados y cuando contienen solventes tipo nafta o gasolina dan lugar a asfaltos líquidos de curado rápido y aquellos que contienen querosene como solvente darán asfaltos de curado medio.

En el caso de una carpeta de rodamiento, construida por el procedimiento de mezcla en el lugar, el solvente debe separarse de la mezcla asfáltica, dejando cemento asfáltico como cementante y como medio impermeabilizante.

Mientras más dura sea la base asfáltica más solvente se necesitará para un grado determinado de fluidez. La rapidez con la cual los asfaltos rebajados pueden invertir su estado para convertirse en cementos asfálticos, depende de la cantidad, carácter del solvente y las condiciones empleadas en su uso.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **2.11 Reacción del asfalto ante altas temperatura**

El cemento asfáltico expuesto a temperaturas extremadamente calurosas, como los desiertos, o a condiciones de velocidad y cargas sostenidas, como un tráiler a velocidad lenta, puede comportarse como un líquido viscoso, por esta razón que se le considera un fluido newtoniano puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa.

A los líquidos viscosos como el cemento asfáltico también se les conoce como “plásticos” ya que una vez que comienzan a fluir pierden su forma y jamás la recuperan, es por esta razón que cuando aplicas este tipo de mezclas en caliente sobre todo en un día caluroso está tiende a fluir bajo el tránsito vehicular y el peso del mismo, en pocas palabras su conducta es la de un plástico, lo que ocasiona roderas y movimiento de las intersecciones. Al mismo tiempo que pierde adherencia entre el agregado y el asfalto, lo cual puede ocasionar un desprendimiento de la carpeta de rodadura.

### **2.12 Llenante mineral o filler**

Es el material que pasa el tamiz #200 que se utiliza como filler en una mezcla asfáltica para mejorar su resistencia su trabajabilidad y durabilidad.

Las llenantes minerales están definidas como partículas finamente divididas que pueden modificar las propiedades del asfalto sin ser visibles en él, las llenantes minerales más comunes son la cal, la arena y el cemento. Consiste en la incorporación inicial de asfalto diluido en forma de película a una superficie de una base no asfáltica

a fin de prepararla para recibir un tratamiento superficial o una nueva capa de construcción, el objeto de la imprimación es de: impermeabilizar la superficie, taponear los vacíos capilares, recubrir y unir las partículas sueltas del agregado, endurecer o reforzar la superficie, ayudar a la compactación y conservación de la base sin un excesivo uso de agua, promover adherencia entre la superficie de la base y el tratamiento o construcción de recubrimiento.

### **2.12.1 Introducción**

Las mezclas bituminosas, también denominadas aglomerados bituminosos, constituyen el principal componente de los pavimentos en los firmes flexibles de carretera. Estas mezclas están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado que, junto con las partículas más finas, denominada filler o polvo mineral, constituyen el mástico que aglomera y cohesiona al conjunto, de este modo, las partículas que forman los áridos quedan cubiertas por una película continua de filler y betún, formando la mezcla bituminosa con unas características funcionales y estructurales adecuadas para su empleo como unidad de obra en los firmes de carretera.

En este sentido, la propiedad fundamental de las mezclas bituminosas para carreteras es su capacidad de deformarse sin romper al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos.

Este es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles. La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas bituminosas, dado que los áridos conforman una estructura granular.

En cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, es decir, el mástico o sistema filler-betún, que define su comportamiento ante las sollicitaciones deformantes (Bianchetto, Miró y Pérez Jiménez, 2006). En este sentido, es más apropiado pensar en las propiedades que el mástico proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al ligante.

Como fundamento, la incorporación de fíller en las mezclas permite optimizar las propiedades del medio continuo bituminoso espesando el betún con el fin de modificar su viscosidad y consistencia mediante la formación de una lámina de mástico de mayor espesor que recubre a los áridos, mejorando, entre otras características, la cohesión y adhesividad del conjunto.

Por otro lado, cuando se plantea la construcción de una carretera la operativa habitual lleva a una elección de materiales basada en las normas vigentes. Como se ha expuesto, en el caso de haber optado por un firme con presencia de mezcla bituminosa, las características y calidad del mástico, y de los elementos que lo forman, tienen una importancia fundamental en las propiedades del conjunto y, por tanto, en el comportamiento en servicio del firme. En las especificaciones vigentes en España (Orden FOM 891/2004), se identifica y clasifica a los ligantes bituminosos y fíller es mediante una serie de ensayos que evalúan de forma parcial e indirecta sus propiedades. Siguiendo este patrón se asegura la validez teórica de los materiales por separado, pero queda la incógnita de cuál es su comportamiento conjunto bajo las condiciones de trabajo futuras. Así, se puede dar la paradoja de que dos másticos formados por ligantes y fílleres de idénticas propiedades según las especificaciones, proporcionen a la mezcla comportamientos en servicio completamente diferentes.

En los últimos años, se han desarrollado ensayos que permiten evaluar las características mecánicas y reológicas del betún y del mástico, lo que proporciona una valoración de los ligantes bituminosos y de los fíller más acordes con las propiedades funcionales que ha de tener la mezcla en la carretera. Lo mismo ha ocurrido en el proyecto de mezclas bituminosas. Así, se han desarrollado metodologías que permiten valorar también la respuesta de la mezcla frente a mecanismos de deterioro como son su resistencia al envejecimiento, a la acción del agua, a la fisuración por fatiga o por esfuerzos térmicos, en lugar de fundamentarse exclusivamente, en métodos de dosificación basados en ensayos mecánicos.

### **2.12.2 Definición y origen**

El fíller o polvo mineral puede ser de aportación o de recuperación. El fíller de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en la composición del mástico de las mezclas bituminosas.

Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. En cambio, cuando se utiliza fíller de recuperación, es decir, aquél procedente de la propia trituración de los áridos, no se puede asegurar con certeza y de forma continua sus características y comportamiento en la mezcla, y se debe determinar previamente su adecuación para el empleo en la mezcla bituminosa.

### **2.12.3 Propiedades**

El fíller, como componente de las mezclas bituminosas, juega un papel importante en la determinación de las propiedades y el comportamiento de las mismas.

Generalmente, se ha demostrado que el papel del fíller en la mezcla es complejo. Por una parte, el fíller sirve de material inerte para rellenar los huecos presentes en la mezcla, mientras que, por otro lado, dada su finura y las características superficiales que presenta, el fíller también sirve como material activo, actividad que se expresa en las propiedades físico-químicas en el contacto entre el fíller y el ligante bituminoso (Craus, Ishai y Sides, 1978).

Un buen conocimiento de las características y propiedades del relleno mineral, así como de las características que este confiere a las mezclas bituminosas, es fundamental para llevar a cabo una óptima utilización del fíller en la composición de las mezclas.

El fíller, como componente de las mezclas bituminosas, juega un papel importante en la determinación de las propiedades y el comportamiento de las mismas. Generalmente, se ha demostrado que el papel del fíller en la mezcla es complejo. Por una parte, el fíller sirve de material inerte para rellenar los huecos presentes en la mezcla, mientras que, por otro lado, dada su finura y las características superficiales que presenta, el fíller también sirve como material activo, actividad que se expresa en las propiedades

físico-químicas en el contacto entre el fíller y el ligante bituminoso (Craus, Ishai y Sides, 1978).

Un buen conocimiento de las características y propiedades del relleno mineral, así como de las características que este confiere a las mezclas bituminosas, es fundamental para llevar a cabo una óptima utilización del fíller en la composición de las mezclas.

#### **2.12.4 El fíller y su función rellenando en la mezcla bituminosa**

El fíller, al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de huecos de la mezcla evitando un aumento considerable en la demanda de ligante bituminoso.

El fíller consigue cumplir con su función rellena dora dependiendo del volumen de huecos existentes una vez se ha compactado la estructura granular y en función también de la granulometría y forma de las partículas de mayor tamaño

#### **2.12.5 El fíller y su comportamiento reo lógico y cohesivo como componente del sistema fíller-betum**

Es evidente que las características del ligante tienen una gran influencia en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas, pero no es menor el efecto que tienen las propiedades del mástico que forman el fíller y el ligante.

Cuando el fíller se dispersa en un betún se forma un mástico que tiene una mayor consistencia y unas propiedades diferentes a las del ligante original, aumentando notablemente su viscosidad y tenacidad y disminuyendo su susceptibilidad térmica (Miró, 1994).

Este cambio de las propiedades del betún tiene unos efectos muy favorables sobre las propiedades de la mezcla, mejorando su estabilidad, su resistencia a la tracción, su resistencia al desgaste y pudiendo tener también un efecto beneficioso sobre la adhesividad árido-ligante (Pérez Jiménez, 1986)

Además, cuando se incorpora fíller a la mezcla, el espesor de película adherida a los áridos por fuerzas de cohesión será mayor que la que correspondería a sus características superficiales ya que se suman los efectos producidos por las partículas

embebidas en el ligante, formando una película más consistente y aumentando más aun las fuerzas de cohesión entre los áridos.

La cantidad de fíller que puede incorporarse al ligante en forma activa depende del espesor de la película y de la granulometría del fíller (Muñoz, 1976; Soriano, 1991). Por tanto, una cierta proporción del fíller, principalmente las partículas más pequeñas que el espesor de la película de ligante, quedan embebidas en la masa de ligante, no pudiendo contribuir al relleno del esqueleto mineral más que de una forma aislada, sino que forman un mortero de características diferentes a las del ligante sólo, en forma de película sobre la superficie mineral, que modificará las características reológicas de la mezcla (Miró, 1994).

Por otra parte, diversos estudios han demostrado el hecho de que aumentando la proporción de fíller en una mezcla bituminosa se aumenta su estabilidad y resistencia mecánica, pero hasta un cierto límite, ya que conforme aumenta el contenido de fíller, y dependiendo de sus características geométricas y composición mineralógica, la mezcla se va haciendo cada vez más seca y frágil, tendiendo a disgregarse durante su servicio.

Las características geométricas de las partículas del fíller (forma, angulosidad y textura) actúan como núcleos potenciales para intensificar la superficie activa del fíller en la interface fíller-betún. Cuantas más irregularidades geométricas posea el fíller, con idéntica composición mineralógica y relación fíller-betún, los másticos alcanzan, para una temperatura determinada, mayor consistencia (Ishai y Craus, 1978). Este aumento de consistencia se debe a la mayor capacidad de absorción, lo que implica un descenso en el contenido de betún libre del mástico.

Es decir, es bien conocido que partículas de diferentes tipos de fíller con una misma distribución de tamaños pueden tener distintas superficies específicas. Estas variaciones de la superficie específica son debidas a los cambios en la irregularidad geométrica de las partículas de fíller. A medida que la irregularidad geométrica aumenta, la superficie específica también aumenta. El efecto de la superficie específica en el comportamiento del mástico se puede ilustrar como sigue: para una relación fíller/betún determinada, másticos que contengan fílleres con diferentes superficies

específicas tendrán un comportamiento reológico distinto. Si se considera únicamente esta propiedad, entonces, a medida que la superficie específica aumenta, el mástico tenderá a tener, a una determinada temperatura, una viscosidad mayor, una penetración menor y menos ductilidad (Ishai y Craus, 1978). Por tanto, para obtener másticos con un comportamiento reológico similar, la relación fíller/betún debe disminuir a medida que la superficie específica de las partículas de fíller aumenta.

Respecto a esta última afirmación existen investigaciones realizadas por Ruiz (1966) y Rigden (1954) que permiten hallar la relación volumétrica fíller/betún a partir de la cual el sistema de ser viscoso para dejar un fluir complejo.

Dicha relación se puede hallar, para cada tipo de polvo mineral y, en base a la teoría de Ruiz (1966), a partir del valor de la “concentración crítica” de fíller ( $C_s$ ), concepto que se desarrollará con posterioridad.

La irregularidad geométrica de las partículas de fíller proporciona un potencial para intensificar la actividad superficial del fíller en la interfase fíller-betún. La actividad superficial no es otra cosa que la capacidad de la superficie de las partículas de fíller para adsorber el ligante bituminoso. Esta capacidad es principalmente, función de las propiedades químicas y de la composición mineralógica del fíller, pero también de la irregularidad geométrica de las partículas. Es por ello que fílleres cuya composición mineralógica es la misma pero que tienen una rugosidad y angulosidad distintas, a menudo tienen distintas capacidades de adsorber un tipo de ligante bituminoso determinado. Esta capacidad suele aumentar con el aumento de la irregularidad de las partículas, es decir, con partículas más rugosas y angulosas.

A una temperatura determinada, másticos compuestos con fílleres cuya composición mineralógica y cuya relación fíller-betún es la misma tendrán una mayor consistencia cuando contengan fílleres con una mayor irregularidad geométrica de sus partículas. El incremento de la consistencia es debido a una mayor capacidad de adsorción, lo que comporta una disminución en el betún libre en el mástico.

La irregularidad geométrica del fíller y especialmente su textura superficial y su porosidad, tienen un efecto directo en la cantidad de pérdida de ligante en el mástico o en la mezcla. Ishai y Craus (1978) afirman que, según el tipo y carácter de la textura superficial, algunos fílleres pueden provocar un incremento significativo en el contenido de betún en el mástico. Ello es debido a un aumento en la cantidad de betún perdido en las partículas de fíller con una superficie más rugosa o con una mayor porosidad, como esta cantidad de ligante perdido no implica ningún efecto significativo en el comportamiento mecánico de la mezcla, representa un incremento del contenido total de ligante empleado que es técnica y económicamente injustificable, por lo que, en muchas ocasiones, resulta más apropiado rechazar estos polvos minerales.

### 2.13 El caolín

**Figura 2.5.** Explotación del Caolín



Fuente:[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAI00i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina la mineral caolinita. Sus principales características son: peso específico, 2,6; dureza, 2; color blanco (aunque puede tener diversos colores debido a las impurezas);

brillo generalmente terroso mate; higroscópico (absorbe agua); y plasticidad de baja a moderada.

El precio generalmente se rige por la demanda; las industrias consumidoras o los intermediarios fijan el precio, tomando ventaja de los apoyos que prestan a los ejidos relativos a la maquinaria para la explotación y estudios sobre el comportamiento del yacimiento e identificación de las diferentes calidades del mineral.

Una variable que impacta al precio del mineral a pesar de ser barato en su explotación son los energéticos en la fase de transformación o procesamiento, principalmente en el secado y molido. Exportaciones son muy pequeñas (287 mil dólares en 2013) en relación a las importaciones (79.5 millones de dólares). Las ventas de caolín mexicano en el exterior se realizan principalmente con Ecuador, Guatemala, Colombia, Venezuela y Estados Unidos. Las importaciones provienen principalmente de Estados Unidos, Francia y España. En el marco de los tratados comerciales en vigor el mineral del caolín, cuya fracción es 25070001, se encuentra exento de impuesto arancelario.

Con base a las cifras del Mineral Commodity Summaries, la producción mundial de caolín en 2013 se estimó en 37 millones de toneladas. Principales productores: Estados Unidos, la Ex Unión Soviética, Alemania, República Checa y Brasil, entre otros.

La industria del caolín en México tiene amplias posibilidades de desarrollarse aún más y aprovechar la demanda existente. Entre las acciones que tendrían que emprenderse para hacer esto posible son: la realización de un inventario del mineral, lo cual permitiría identificar su vocación y consolidar la oferta hacia las industrias; por otro, la modernización de la cadena productiva garantizaría la elevación de la producción al nivel que requiere la demanda

## **2.14 Características generales del caolín**

### **2.14.1 Ficha técnica**

**Tabla 2.5.** Especificaciones técnica del Caolín

<b>CAOLIN</b>	
	
<b>Nombre de la roca, mineral o piedra</b>	<b>Caolín o caolinita.</b> Caolinita deriva de caolín que es una deformación de Kauling (China) un monte de donde se extraía este mineral, cerca de Jauchu Fa.
<b>Tipo básico</b>	Mineral, sedimentario y metamórfico
<b>Grupo</b>	Minerales de arcilla.  Silicatos: el silicio y el oxígeno, los elementos más abundantes en la corteza terrestre, se combinan con diversos elementos metálicos para producir silicatos. El grupo mineral más extenso y más variado. Por lo general, los silicatos son duros, transparentes o translúcidos y densidad media. Se suelen agrupar por cómo se disponen los átomos de silicio y oxígeno; cada uno de los primeros está rodeado por cuatro de los segundos. Existen más de 900 silicatos distintos.
<b>Sistema Cristalino/Estructura</b>	Monoclínico. Cristal triclinico en láminas muy delgadas, rómbicas o de forma hexagonal. Generalmente en masas arcillosas
<b>Composición química</b>	Caolinita: $Al_2[Si_2O_7](OH)_2$ .
<b>Formación u origen</b>	Se forma al meteorizarse los feldespatos, las micas y otros aluminosilicatos. Se produce por la naturaleza, $O_2$ .
<b>Dureza</b>	1
<b>Textura</b>	Presenta un aspecto terroso, tacto árido y casi siempre susceptible de plasticidad cuando se le añade agua
<b>Densidad</b>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
<b>Color</b>	Blanco, puede tener diferentes matices en función del contenido de las impurezas
<b>Brillo</b>	Arcilloso y perlado. Terroso mate.
<b>Propiedades</b>	Es una designación petrográfica de mezclas de Caolinita, Dickita, Nacrita y silicatos de alúmina gelatinosos puros e hidratados.  Forma parte de la familia de las arcillas y está asociado a los mismos procesos de formación.  Caolinita $Al_2[Si_2O_7](OH)_2$ , la Montmorillonita $(Al_2(OH)_2[Si_4O_{10}])$ , la mica arcillosa fundamentalmente Illita $(K(OH)_2Al_2(Si_3AlO_{10}))$ , y la Clorita, Dickita, Nacrita y silicatos de alúmina. La principal propiedad que tiene la arcilla cerámica es ser fácilmente moldeable al estar húmeda y al ser calentada al expulsar el agua, se convierte en una sustancia dura y permanente.
<b>Usos</b>	Es la materia prima esencial de la porcelana. Se utiliza además como carga en la fabricación del papel.

Fuente: <https://imagen.app.goo.gl/iRcg8dCXmsCpsDZQ8>

El caolín es un silicato de aluminio hidratado ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a

arcillas en las que predomina la mineral caolinita; su peso específico es de 2.61; su dureza es 2; de color blanco, puede tener diversos colores debido a las impurezas; brillo generalmente terroso mate; es higroscópico (absorbe agua); su plasticidad es de baja a moderada.

Otras propiedades importantes son su blancura, su inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión; resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Es compacto, suave al tacto y difícilmente fusible. Tiene gran poder cubriente y absorbente y baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos.

Los caolines de alta calidad son caracterizados por bajos niveles de impurezas como hierro, titanio y minerales de tierras alcalinas. Su blandura es importante en muchas aplicaciones al reducir la abrasión de los equipos de procesos.

### **Procesos**

Básicamente se clasifican en dos procesos de acuerdo a la calidad del caolín: seco y húmedo. El primero es utilizado en caolines con un mayor contenido de sílice y el segundo en caolines con contenidos superiores de alúmina. En el seco sólo se remueve la arena, se clasifica el caolín por tamaño y se seca; en el húmedo se realizan además otros pasos que involucran agua para realizar el lavado obteniendo un producto más fino y de mayor calidad y pureza; este último se usa sólo para el caolín papelerero. Además, se presenta un proceso con tecnología reciente: tecnología estándar.

### **Extracción**

El caolín se explota a cielo abierto y de las minas se transporta en greña, con un contenido de humedad promedio de 10 a 18%, a la planta procesadora.

### **Trituración**

Después de extraer el mineral, se procede a reducir su tamaño por medio de una quebradora de quijada dando por resultado un producto de menor tamaño y casi uniforme.

### **Secado**

El caolín ya triturado es conducido por transportadores de banda para ser en la tolva de alimentación de secadores de tipo rotativo y a contra corriente. Lo anterior es con el fin de eliminar la humedad.

### **Molienda**

El caolín seco cae a un transportador de banda que lo lleva a la tolva de alimentación del molino de rodillos para reducir su tamaño entre 200 y 325 mallas. El material previamente pulverizado asciende hasta donde se encuentra el clasificador.

### **Clasificación**

En el clasificador, se separa el producto deseado y el sobre tamaño regresa nuevamente a la molienda.

### **Colector**

El caolín seleccionado es transportado en forma neumática a un sistema de colección de caolín, donde se saca una muestra para su control de calidad, determinando su humedad y granulometría, si cumple con las especificaciones se conduce al almacén de producto terminado listo para el mercado, en caso contrario se vuelve a procesar.

### **Micronización**

En el caso que el mineral esté dirigido a la industria papelera u otras que requieran una mayor finura, será necesario que pase por el proceso de micronización donde el mineral es pulverizado a diferentes mallas superiores a 325, al pasar por los molinos micronizadores de donde se obtendrá un producto mínimo de 400 mallas o más fino.

### **Envase y embarque**

Los productos obtenidos de la micronización serán depositados en tolvas para su envasado y posteriormente se procederá a su embarque.

## **2.14.2 Usos**

- En Papel

Como carga y recubrimiento del papel. En el acabado de papel de arte, tapiz y en papel corrugado. Reduce la porosidad y da suavidad y brillo a la superficie. Contribuye a la recepción de tinta en papel para escritura e impresión. Proporciona alta brillantez y opacidad con el mínimo recubrimiento resultando un peso extra ligero.

- Refractarios

A causa de su elevada temperatura de fusión es adecuado para la elaboración de refractarios. En la elaboración de perfiles, bloques y ladrillos refractarios, así como en ladrillos de alta alúmina. En la elaboración de cemento refractario y resistente a los ácidos. En cajas de arcilla refractaria para cocer alfarería fina.

- Cerámica

En la fabricación de sanitarios, comedores, porcelana eléctrica y tejas de alto grado, vajillas, objetos de baño, refractarios y cajas de arcilla refractaria para cocer alfarería fina. Las arcillas cerámicas ofrecen buenas perspectivas para usarse en convertidores catalíticos.

- Vidrio

En la formulación de placas de vidrio.

- Pinturas

En la elaboración de pigmentos de extensión para pinturas y en la fabricación de tintas. Se usa como dilatador por su inercia química, suave fluidez, facilidad de dispersión y por no ser abrasivo. En pinturas de agua con liga de aceite, a base de silicato y al temple; en pinturas para moldes de fundición; en pigmentos para el color ultramarino. Da suavidad y brillo a la superficie, mejora la durabilidad de la misma y reduce la cantidad de pigmento necesario. También proporciona resistencia a la corrosión y al intemperismo y un acabado mate.

- Plásticos

Es usado como relleno en hules, plásticos y auxiliar en procesos de filtración. En revestimientos plásticos para ductos y tejas plásticas. Se mezcla bien con oleoresinas en plásticos y mejora la rigidez y dureza del mismo. Proporciona suavidad, estabilidad

dimensional, resistencia al ataque químico y mejora las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de los plásticos.

- Agroquímicos

Forma parte de los componentes de insecticidas y pesticidas. En virtud de su alta adherencia y baja segregación es el ideal recubrimiento de abonos y fertilizantes.

- Farmacéutica

En la elaboración de medicamentos por ser químicamente inerte y libre de bacterias. (No se tiene en México este tipo de caolín)

- Cosméticos

Es uno de los principales componentes de los cosméticos. Absorbe humedad, mejora las bases blancas para colores, se adhiere a la piel y tiene textura suave.

- Material eléctrico

Es usado en la fabricación de cable eléctrico, en recubrimientos y aislantes eléctricos. Da resistencia térmica.

- Caucho

Debido a su consistencia es excelente para reforzar la dureza mecánica y resistencia a la abrasión del caucho, así como para hacerlo más rígido.

- Hule

En la industria del hule es usado como carga y por su resistencia a la humedad y ataque químico. Mezcla bien con el hule, le incrementa la dureza y durabilidad. Agrega fuerza y resistencia a la abrasión y rigidez.

- Metales

En ruedas abrasivas, para soldar cubiertas en varillas y en material de adherencia en fundición

- Química

En la elaboración de productos como sulfato de aluminio, alúmina y alumbre; en catalizadores y absorbentes; en el acabado de textiles; en jabón, recubrimientos, curtiduría y productos de asbesto; en ruedas abrasivas, como material de adherencia en fundición y para soldar cubiertas en varillas. Por su contenido de alúmina y sílice se utiliza en la producción de aditivos de cemento y fibra de vidrio.

- Forraje

Para forraje se usa molido entre 60 y 80.

### **2.15 El caolín en Bolivia**

La COMIBOL proyecta operaciones mayores a futuro. Un estudio inicial estableció la existencia de yacimientos de Caolín en el cerro conocido como "La Colorada", ubicado dentro del radio urbano de la ciudad de Oruro. En este sentido la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL), inició con las primeras operaciones de explotación con una proyección que a futuro pueda constituirse como una de las minas más importantes de la región.

El cerro "La Colorada" se encuentra ubicado al Noroeste de la ciudad de Oruro, en él se logró evidenciar la existencia de caolín que es un mineral no metálico, que puede ser empleado en distintos rubros.

En esa tarea es que la COMIBOL regional Oruro, lleva adelante un estudio que pueda dar a conocer proyecciones del tiempo de vida que pueda tener este yacimiento, y el porcentaje en cuanto a ley para su cotización.

"Estamos haciendo un estudio y paralelamente la producción, es un mineral no metálico, entonces este material estamos vendiendo a Santa Cruz. Estamos trabajando con la empresa Fritabol y tenemos mercado para este mineral que obviamente tenemos

acá en este sector de la ciudad", informó el gerente regional de la COMIBOL, Florencio Choque.

La extensión del yacimiento abarca aproximadamente 66 hectáreas en gran parte del cerro "La Colorada" hasta el sector de "Itos" en la zona Sur, sin embargo, estudios complementarios podrán dar a conocer de la magnitud de este yacimiento ubicado dentro el radio de la ciudad de Oruro.

Este es un inicio para emprender operaciones con el empleo de mayor maquinaria desde la COMIBOL, que desde agosto que se inició la explotación hasta la fecha, se tuvo una producción de 300 a 400 metros cúbicos de este mineral con mercado en el oriente del país.

"Este mineral mayormente se lo utiliza en cerámica, en pintura, en papel, en vidrio, en químicos y farmacéuticos, incluso accesorios eléctricos y computadoras, más o menos y según estudios son algo más de 23 usos que se le puede dar a este mineral", afirmó Pedro Cruz, técnico encargado de este proyecto de la COMIBOL.

Son cinco trabajadores que al momento están al frente de las operaciones en la explotación a cielo abierto, concluyendo los estudios complementarios se podrá realizar proyecciones y en mayores dimensiones, de manera que pueda constituirse como un nuevo campo de la minería que genere ingresos económicos al departamento. Cruz, manifestó que tiene planificado intensificar la explotación, para lo cual elaboró un nuevo plan, que tiene el objetivo de implementar nuevos equipos (retroexcavadoras) y maquinaria que pueda perforar mayor profundidad para producir mayor tonelaje, ya que las condiciones técnicas del yacimiento se prestan para abrir nuevos frentes de arranque.

El caolín, se utiliza para la fabricación de pinturas, porcelanas, como cosmético para las máscaras faciales y otros.

### **2.15.1 Precio del caolín en el mercado boliviano**

El precio generalmente se rige por la demanda; las industrias consumidoras o los intermediarios fijan el precio, tomando ventaja de los apoyos que prestan a los ejidos

relativos a la maquinaria para la explotación y estudios sobre el comportamiento del yacimiento e identificación de las diferentes calidades del mineral.

Una variable que impacta al precio del mineral a pesar de ser barato en su explotación son los energéticos en la fase de transformación o procesamiento, principalmente en el secado y molido.

La Colorada es un proyecto que recientemente COMIBOL explota, perforan con barrenas de 2,40 metros, y para sus actividades utilizan retroexcavadoras, compresoras portátiles, además de explosivos en los que utilizan detonadores eléctricos.

Actualmente La Colorada produce 200 Tn/día y acumulan su producción en depósitos que se encuentran a dos kilómetros aproximadamente del sector de explotación.

En el yacimiento minero La Colorada, el caolín tiene 16 por ciento de alúmina, o sea cuanto más contenido de alúmina tiene el caolín, mayor es el precio de la tonelada, generalmente el precio de venta está entre 700 a 750 \$us/tn, también existen otros sectores aledaños a la Colorada que contienen de 30 a 40 por ciento de alúmina. El caolín es comercializado en el mercado nacional (Faboce y Gladimar) y también es exportado a Brasil.

**CAPÍTULO III**  
**APLICACIÓN PRACTICAS**

## **CAPÍTULO III**

### **APLICACIÓN PRACTICAS**

#### **3.1 Planteamiento de la investigación**

En este capítulo se desarrollará la etapa experimental o aplicación práctica de la investigación a realizar, el cual se llevará a cabo en dos etapas.

La primera corresponde a la selección y caracterización de los materiales de aporte a la investigación (agregados y cemento asfáltico), así también se realizará dosificación y caracterización de la mezcla asfáltica a utilizar para la confección de las probetas cilíndricas.

La segunda etapa contemplará el diseño de las distintas probetas en laboratorio, para la realización de los ensayos de resistencia a la deformación plástica, estabilidad, densidad y huecos de las mezclas bituminosas compactadas (para la determinación el porcentaje óptimo del caolín).

Los materiales a ser usados en el presente trabajo deberán cumplir con las especificaciones de las normas ASTM y AASHTO. Para realizar los diferentes ensayos de laboratorio necesarios para elaborar el presente proyecto se hará uso de materiales existentes en el departamento de Tarija, los mismos que se ajustan dentro de las normativas vigentes.

#### **3.2 Procedencia de los materiales**

##### **3.2.1 Agregados pétreos**

El material pétreo a ser usado en este proyecto será de 3 canteras diferentes de la ciudad de Tarija, la primera se encuentra ubicada en la comunidad de San Mateo desemboque del río Sella km 6, donde se encuentra la planta de áridos (chancadora) “Garzón”, la segunda ubicada en la comunidad de Santa Ana desemboque del río Santa Ana y la tercera cantera es la de SEDECA ubicada en la localidad de Charaja.

**Figura 3.1.** Ubicación de la planta de áridos “Garzón”



Fuente: Google earth.

**Figura3.2.** Chancadora para la provisión de material



Fuente: Elaboración propia.

**Coordenadas geográficas**

-21°28'14.94"S de latitud sur

-64°45'3.15"W de longitud oeste

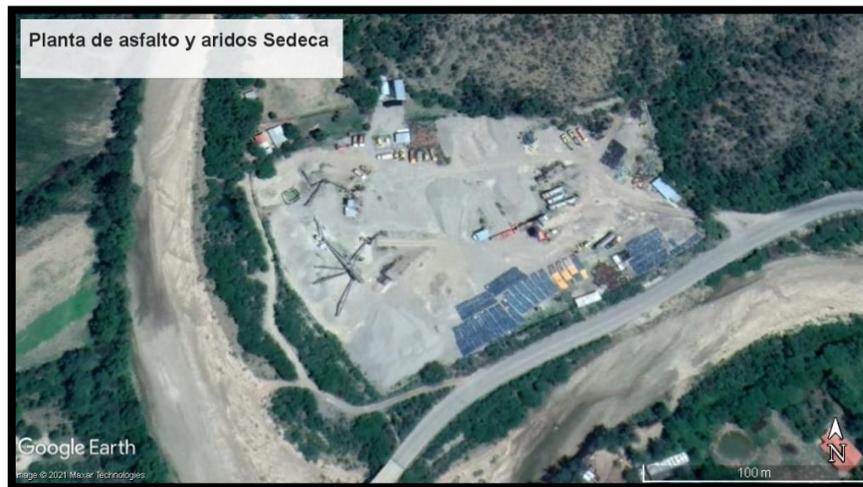
**Coordenadas UTM**

Norte, Este

X=318589.6

Y= 7624729.6

**Figura3.3.** Chancadora de SEDECA



Fuente: Google Earth.

**Coordenadas geográficas**

-21°46'54.60"S de latitud sur

-64°46'10.55"W de longitud oeste

**Coordenadas UTM**

Norte, Este

X=317041.4

Y= 7590272.1

**Figura3.4.** Chancadora de Santa Ana



Fuente: Google Earth.

### Coordenadas geográficas

-21°37'21.65"S de latitud sur

-64°38'34.30"W de longitud oeste

### Coordenadas UTM

Norte, Este

X=329960.5

Y=7608037.6

### 3.2.2 Cemento asfáltico

El betún como cemento asfáltico Betupen Plus C.A. 85 – 100 proveniente del Brasil, fue proporcionado por SEDECA (servicio departamental de caminos).

**Tabla 3.1.** Especificaciones del cemento asfáltico 85-100

STRATURA ASFALTOS BETUPEN PLUS (CA 85/100)					
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PRODUCTO	Limites	Método	Reproductibilidad	Encontradas	
Penetración a 25 °C 100g	85-100	AASHTO T-49	dmm	91	
Viscosidad Saybolt a 135°C	85 min.	AASHTO T-201	2 %	120	
Ensayo de la mancha (T-102)	Negativo	AASHTO T-102	ND	negativo	
Punto de ablandamiento (T-53)	43 a 46	AASHTO T-53	3 °C	45	
Ductilidad a 25 °C cm (T-51)	100 min.	AASHTO T-51	NBR	>100	
Viscosidad de brookfield a 135 °C, Cp	214 min.	AASHTO T-316	ND	290	
Viscosidad de brookfield a 150 °C, Cp	97 min.	AASHTO T-316	ND	152	
Viscosidad de brookfield a 177 °C, Cp	28 a 114	AASHTO T-316	ND	58	
Temperatura de mistura °C	Indicativo	Calculo	ND	141 a 147	
Temperatura de compactación °C	Indicativo	Calculo	ND	130 a 136	
Índice de penetración	1.5 a 0.5	Calculo/ Calculo	ND	-1.1	
Punto de inflamación C.O.C (T-48)	232 min.	AASHTO T-46	ND	>235	
Solubilidad (T-44)	99 min.	AASHTO T-44	0.26 %	99.9	
Densidad a 25 °C (T-228)	0.99 min	AASHTO T-228	0.005	1.012	
<b>ENSAYO SOBRE EL RESIDUO DE PELÍCULA DELGADA 32 MM, 163 °C (AASHTO T-240)</b>					
Pérdida de masa (T-240)	1.0 máx.	AASHTO T-240	NBR	0.41	
Penetración del residuo	50 min.	Calculo	ND	55	
Perdida por calentamiento (T-179)	1 min.	AASHTO T-179	dmm	0.42	
Densidad a 25 °C (T-228)	1 a 1.05	AASHTO T-228	0.005	1	

Fuente: The asphalt Instute, Manual de Asfaltos.

El betún como ligante asfáltico Betupen S C.A. 60 – 70 proveniente del Brasil, fue proporcionado por SEDECA (servicio departamental de caminos).

**Tabla 3.2.** Especificaciones del cemento asfáltico 60-70

<b>STRATURA ASFALTOS BETUPEN S (CA 60-70)</b>					
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PRODUCTO</b>	Especificaciones	Método	UNIDAD	RESULTADOS	
Penetración Muestra Original (100g. 5s. 25°C)	60-70	AASHTO T-49 ASTM D5	0.1 mm	63	
Gravedad específica (25°C/25°C)	1.00-1.050	AASHTO T 228 ASTM D70	g/cm	1.036	
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	85 min	AASHTO T-72 ASTM D88	Seg	174	
Punto de inflamación copa abierta de cleveland	232.22 min	AASHTO T-48 STM D92	°C	>232.22	
Ductilidad Muestra original 25°C 5cm/min	100 mín.	AASHTO T-51 ASTM D113	cm	>100	
Punto de reblandecimiento A&B Anillo bola	45-57	AASHTO T-53 ASTM D36	°C	47	
Película delgada en horno 183°C 5 hr 3.2 mm Perd/cal	0.8 máx	AASHTO T-179 ASTM D1154	%	-0.197	
Ductilidad del residuo 25 °C 5cm/mín	50mín	AASHTO T-51 ASTM D113	cm	>50	
Penetración de residuo (100g 5s 25 C)	52 mín	AASHTO T- 49 ASTM D5	%	62	
Solubilidad en benceno	99.0 mín	AASHTO T-44 ASTM D2042	%	99	
Aumento punto de reblandamíneto del residuoA&B	8máx	AASHTO T53 ASTM D36	°C	4.3	

Fuente: The asphalt Instute, Manual de Asfaltos.

### 3.3 Ensayos de caracterización de los materiales

#### 3.3.1 Caracterización de los agregados

##### 3.3.1.1 Análisis granulométrico de los agregados (documento referencial ASTM E40 C136 AASHTO T27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

## Objetivo

Tiene por objetivo obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar y graficar su respectiva curva granulométrica para establecer la distribución de tamaños de los agregados, los cuales deben estar dentro de las especificaciones establecidas.

**Figura 3.5.** Materiales para ser tamizado



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.6.** Tamizado mediante los tamices normalizados ASTM



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de agregados de chancadora Garzón

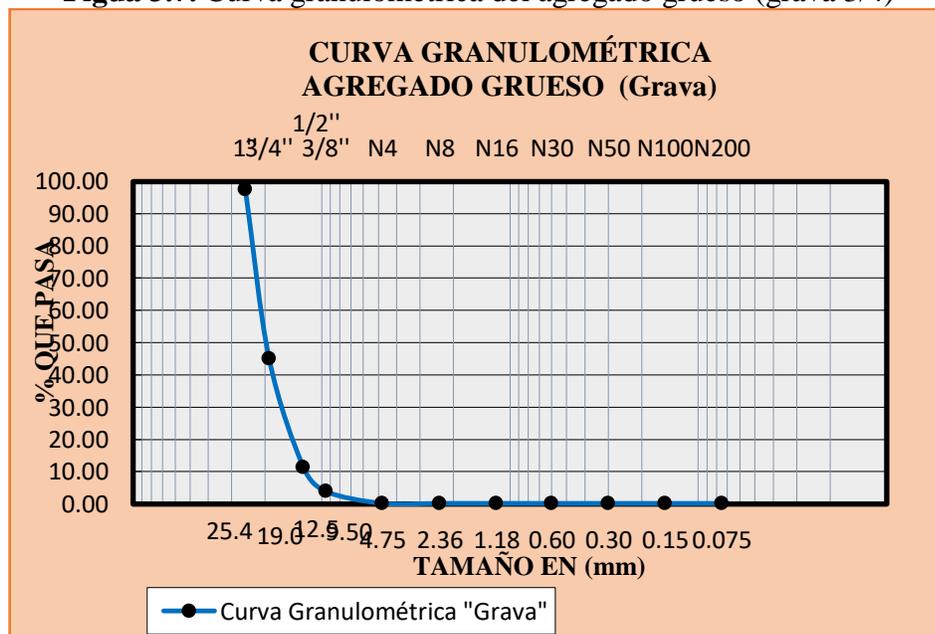
### Granulometría agregado grueso (grava)

**Tabla 3.3.** Resultados de la granulometría del agregado grueso (grava 3/4)

Peso Total		5000 g			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	120.00	120.00	2.40	97.60
3/4"	19.0	2625.40	2745.40	54.91	45.09
1/2"	12.5	1682.70	4428.10	88.56	11.44
3/8"	9.50	376.20	4804.30	96.09	3.91
N°4	4.75	187.30	4991.60	99.83	0.17
N°8	2.36	0.10	4991.70	99.83	0.17
N°16	1.18	0.20	4991.90	99.84	0.16
N°30	0.60	0.10	4992.00	99.84	0.16
N°50	0.30	0.12	4992.12	99.84	0.16
N°100	0.15	0.10	4992.22	99.84	0.16
N°200	0.075	0.20	4992.42	99.85	0.15
BASE	-	7.50	4999.92	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.7.** Curva granulométrica del agregado grueso (grava 3/4)



Fuente: Elaboración propia.

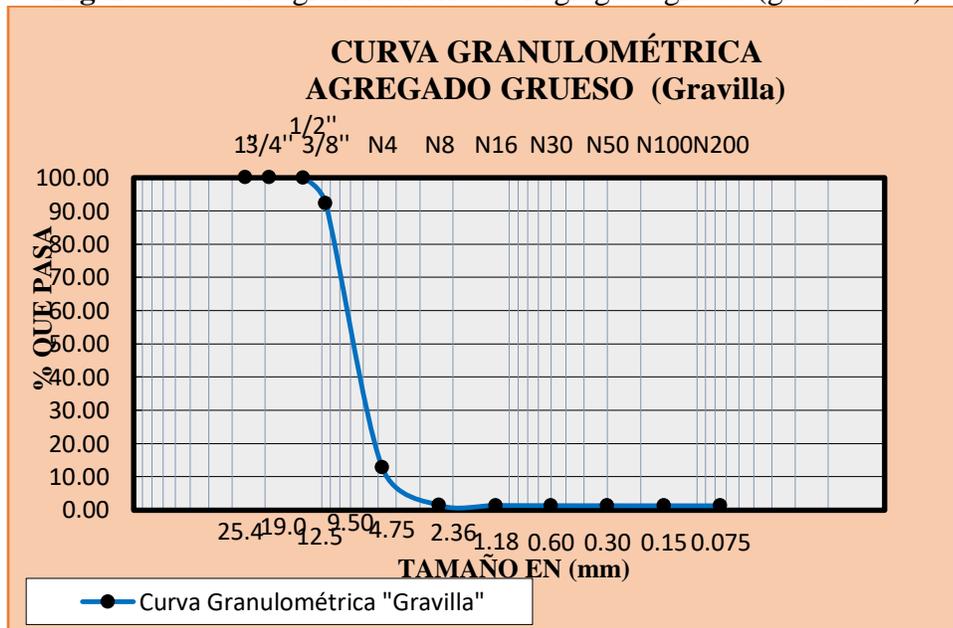
**Granulometría agregado grueso (gravilla 3/8)**

**Tabla 3.4.** Resultados del análisis granulométrico de la gravilla

Peso Total			5000 g		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	6.30	6.30	0.13	99.87
3/8"	9.50	380.00	386.30	7.73	92.27
N°4	4.75	3971.20	4357.50	87.15	12.85
N°8	2.36	571.10	4928.60	98.57	1.43
N°16	1.18	4.20	4932.80	98.66	1.34
N°30	0.60	2.40	4935.20	98.70	1.30
N°50	0.30	1.20	4936.40	98.73	1.27
N°100	0.15	0.50	4936.90	98.74	1.26
N°200	0.075	0.12	4937.02	98.74	1.26
BASE	-	62.80	4999.82	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.8.** Curva granulométrica del agregado grueso (gravilla 3/8)



Fuente: Elaboración propia.

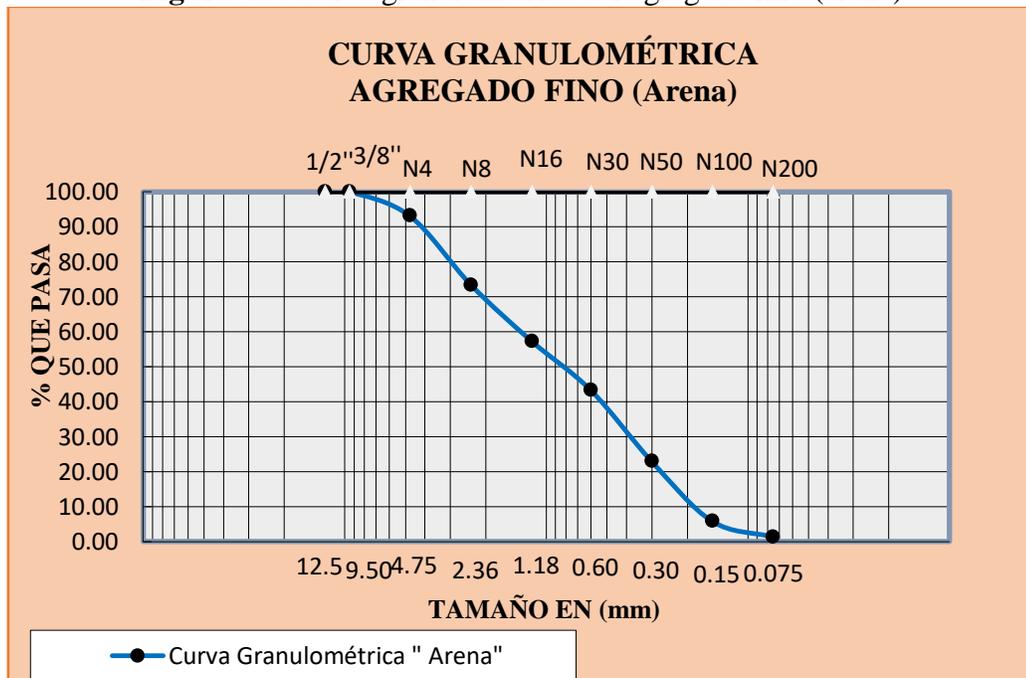
### Granulometría agregado fino (arena)

**Tabla 3.5.** Resultados del análisis granulométrico del agregado fino (arena)

Peso Total			2000 g		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
N°4	4.75	137.70	137.70	6.89	<b>93.12</b>
N°8	2.36	395.10	532.80	26.64	<b>73.36</b>
N°16	1.18	321.70	854.50	42.73	<b>57.28</b>
N°30	0.60	280.60	1135.10	56.76	<b>43.25</b>
N°50	0.30	405.70	1540.80	77.04	<b>22.96</b>
N°100	0.15	343.10	1883.90	94.20	<b>5.80</b>
N°200	0.075	89.20	1973.10	98.66	<b>1.35</b>
BASE	-	26.60	1999.70	99.99	<b>0.02</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.9.** Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de agregados de SEDECA

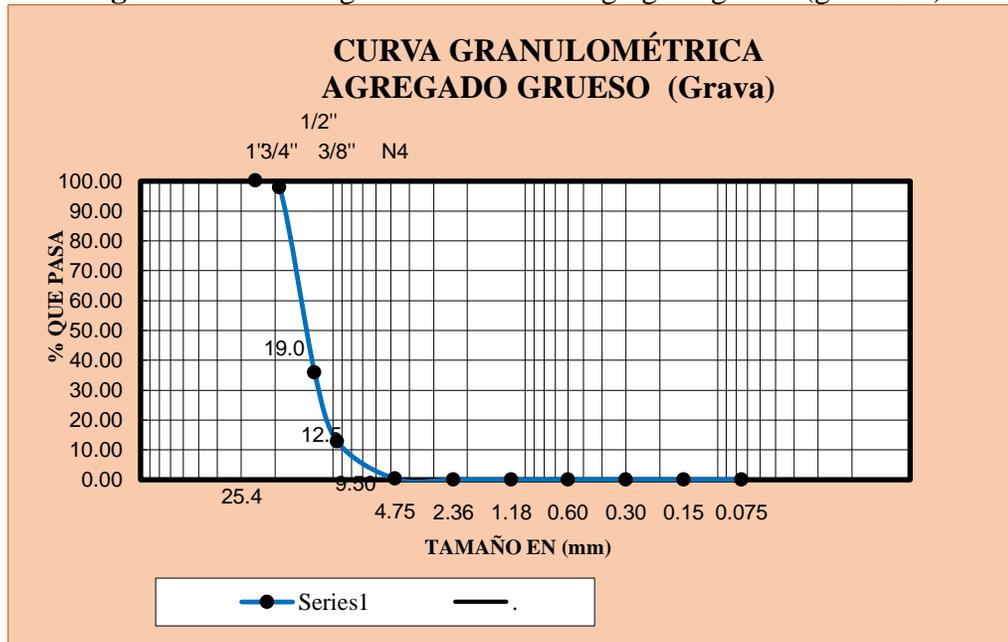
### Granulometría agregado grueso (grava)

**Tabla 3.6.** Resultados de la granulometría del agregado grueso (grava 3/4)

Peso Total		3000 g			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	67.50	67.50	2.25	97.75
1/2"	12.5	1856.20	1923.70	64.12	35.88
3/8"	9.50	695.70	2619.40	87.31	12.69
N°4	4.75	373.10	2992.50	99.75	0.25
N°8	2.36	7.50	3000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.0	3000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.0	3000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.0	3000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.0	3000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.0	3000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.0	3000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.10.** Curva granulométrica del agregado grueso (grava 3/4)



Fuente: Elaboración propia.

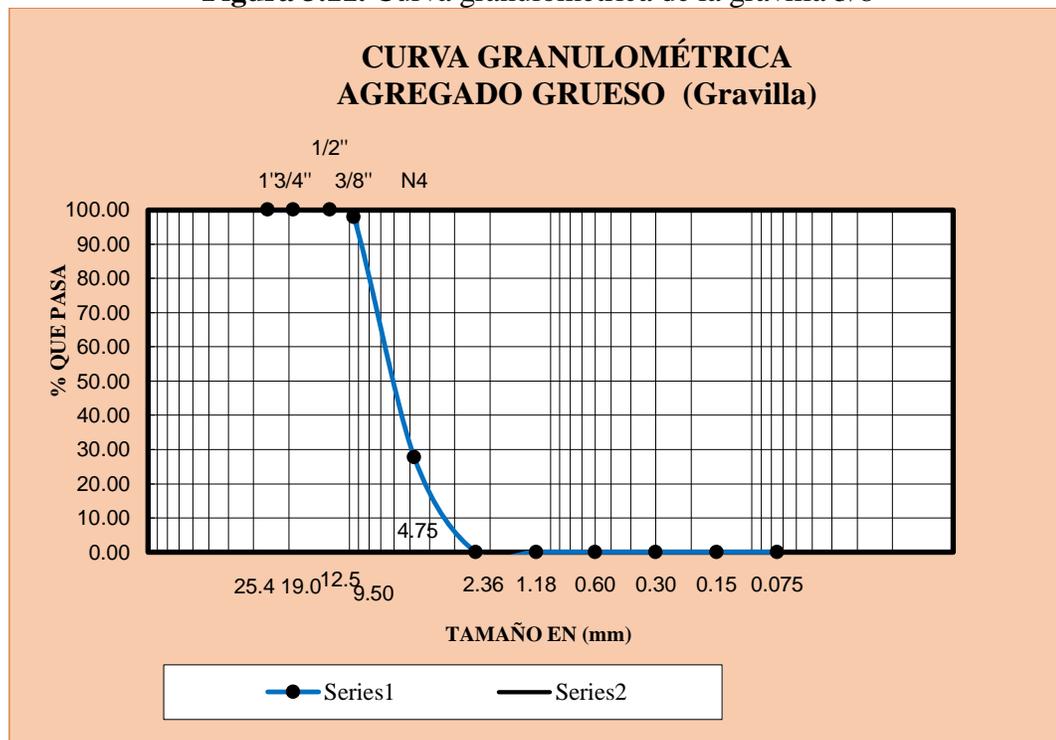
## Granulometría agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.7.** Resultados del análisis granulométrico de la gravilla 3/8

Peso Total			3000 g		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	64.70	64.70	2.16	97.84
Nº4	4.75	2106.80	2171.50	72.38	27.62
Nº8	2.36	828.50	3000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	3000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	3000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.11.** Curva granulométrica de la gravilla 3/8



Fuente: Elaboración propia.

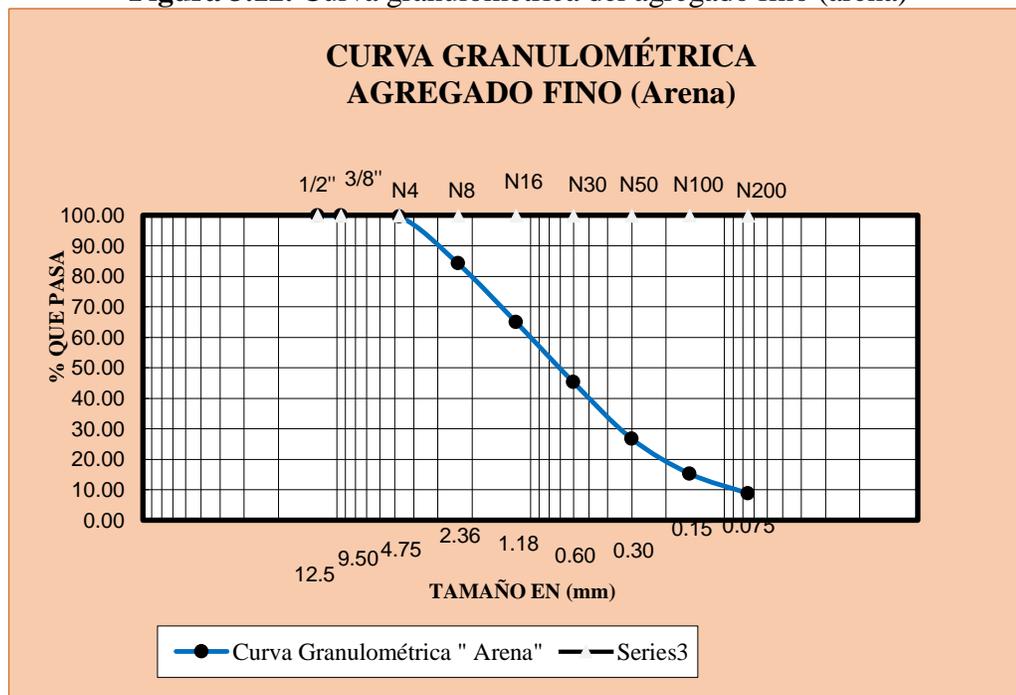
## Granulometría agregado fino (arena)

**Tabla 3.8.** Resultados del análisis granulométrico del agregado fino (Arena)

Peso Total		2000 g			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	7.40	7.40	0.37	99.63
Nº8	2.36	307.80	315.20	15.76	84.24
Nº16	1.18	387.00	702.20	35.11	64.89
Nº30	0.60	391.50	1093.70	54.69	45.32
Nº50	0.30	371.20	1464.90	73.25	26.76
Nº100	0.15	230.60	1695.50	84.78	15.23
Nº200	0.075	129.00	1824.50	91.23	8.78
BASE	-	175.00	1999.50	99.98	0.02

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.12.** Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de agregados de chancadora Santa Ana

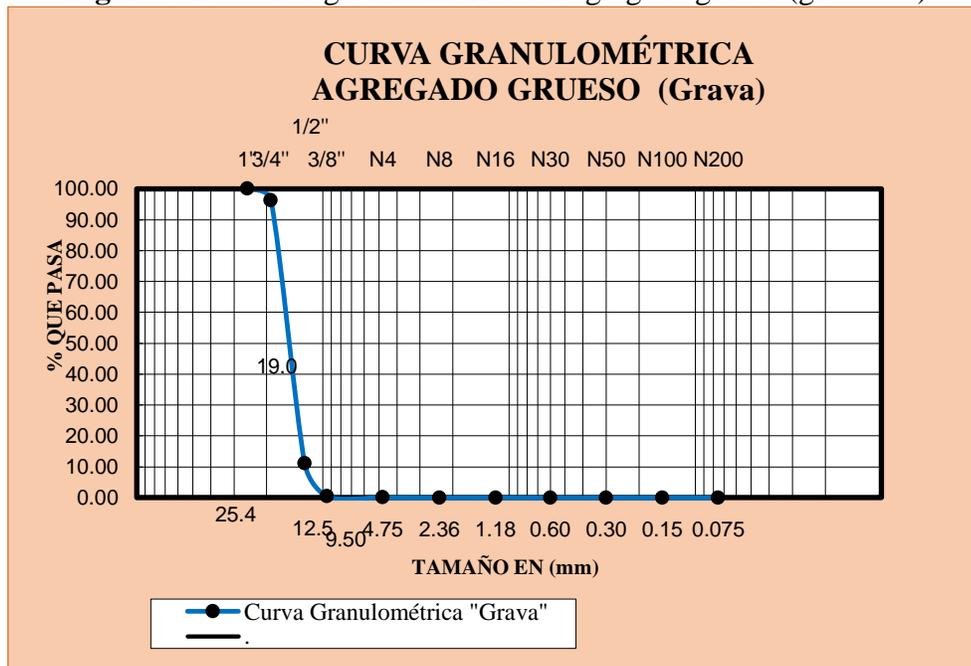
### Granulometría agregado grueso (grava)

**Tabla 3.9.** Resultados de la granulometría del agregado grueso (grava 3/4)

Peso Total		3000 g			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	109.90	109.90	3.66	96.34
1/2"	12.5	2557.40	2667.30	88.91	11.09
3/8"	9.50	318.90	2986.20	99.54	0.46
N°4	4.75	11.80	2998.00	99.93	0.07
N°8	2.36	2.00	3000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	3000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	3000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	3000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	3000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	3000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	3000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.13.** Curva granulométrica del agregado grueso (grava 3/4)



Fuente: Elaboración propia.

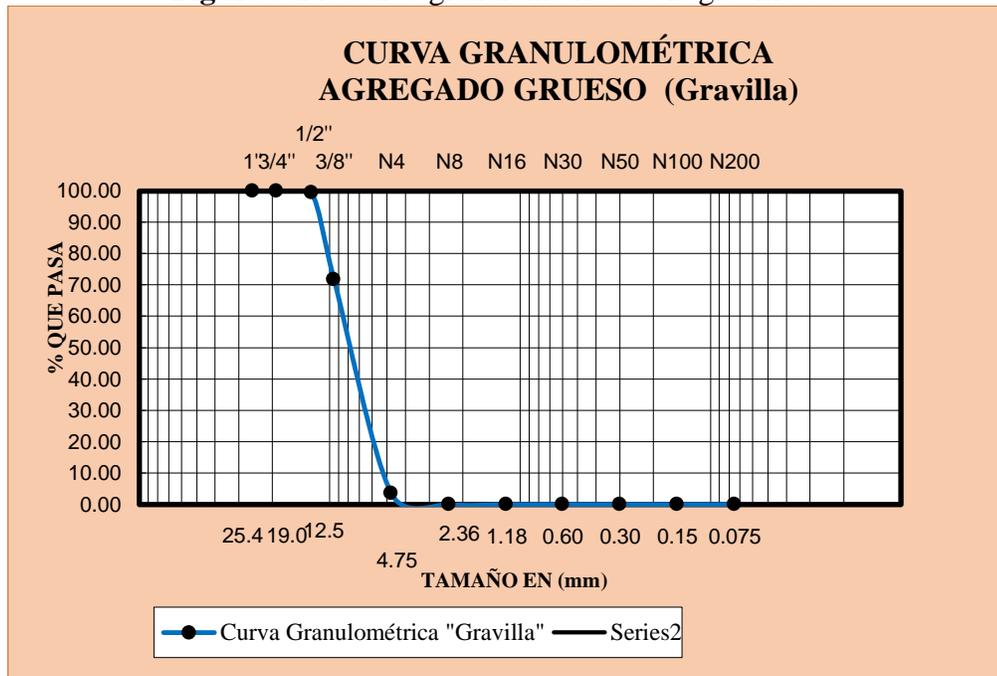
## Granulometría agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.10.** Resultados del análisis granulométrico de la gravilla 3/8

Peso Total			3000g		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	16.20	16.20	0.54	99.46
3/8"	9.50	829.80	846.00	28.20	71.80
Nº4	4.75	2047.80	2893.80	96.46	3.54
Nº8	2.36	106.20	3000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	3000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	3000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	3000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.14.** Curva granulométrica de la gravilla 3/8



Fuente: Elaboración propia.

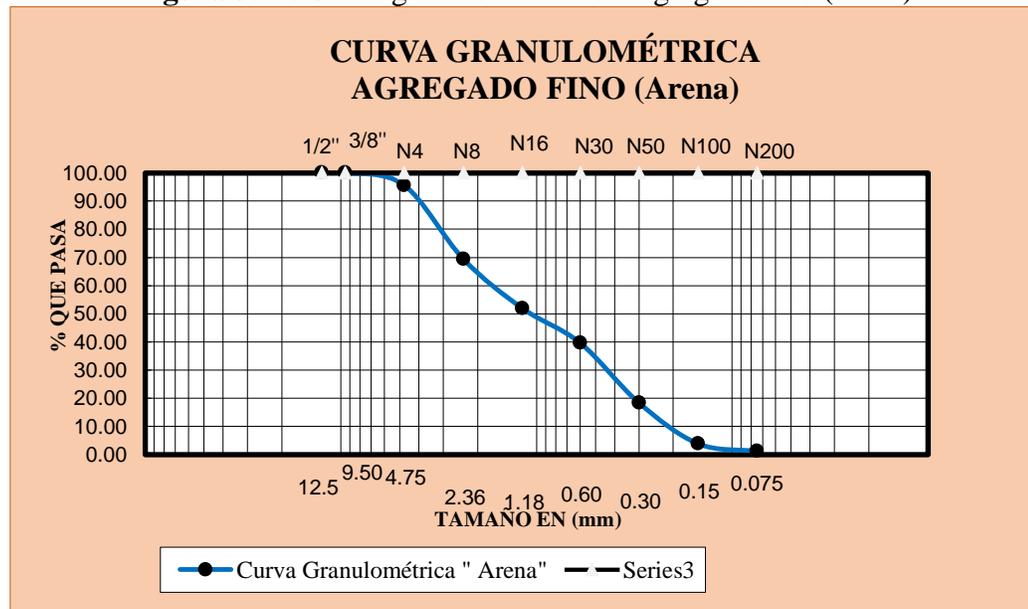
## Granulometría agregado fino (arena)

**Tabla 3.11.** Resultados del análisis granulométrico del agregado fino (Arena)

Peso Total			2000 g		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	88.10	88.10	4.41	95.60
N°8	2.36	526.10	614.20	30.71	69.29
N°16	1.18	348.80	963.00	48.15	51.85
N°30	0.60	244.10	1207.10	60.36	39.65
N°50	0.30	426.10	1633.20	81.66	18.34
N°100	0.15	289.50	1922.70	96.14	3.87
N°200	0.075	54.40	1977.10	98.86	1.15
BASE	-	22.30	1999.40	99.97	0.03

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.15.** Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.2 Peso específico y absorción del agregado grueso (documento referencial ASTM C127, AASHTO T85)

Este método de ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico a “granel” y el peso específico aparente del agregado grueso como ser la grava y la gravilla, y el porcentaje de absorción del agregado grueso.

#### Resumen del método

Prioramente se realizará la preparación de la muestra pesando porciones de 5000 gde agregado, tanto de la grava como de la gravilla en estado seco, se sumergirá el material retenido en el tamiz N° 4 con la cantidad especificada durante 24 horas para quitar las impurezas y el material fino del agregado, después del periodo de inmersión se secará la muestra con un paño con el fin de eliminar el agua superficial, se pesará y se asignará como B, se vuelve a sumergir y se determina el peso sumergido, se designará como C.

Se seca entonces la muestra en horno a una temperatura de 110°C, y se determina el peso seco, designado como A, con cuyos datos se realizará el cálculo del peso específico.

**Figura 3.16.** Muestra sumergida por 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.17.** Obtención del peso sumergido de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

**Resultados del ensayo de banco de agregados de chancadora Garzón**

**Peso específico agregado grueso (grava)**

**Tabla 3.12.** Resultados del peso específico del agregado grueso (grava)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.54	2.59	2.66	1.77
2	2.57	2.61	2.69	1.76
3	2.55	2.59	2.67	1.78
<b>PROM.</b>	<b>2.55</b>	<b>2.60</b>	<b>2.67</b>	<b>1.77</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Peso específico agregado grueso (gravilla)**

**Tabla 3.13.** Resultados de peso específico del agregado grueso (gravilla)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.50	2.59	2.73	3.37
2	2.51	2.60	2.74	3.39
3	2.51	2.59	2.74	3.37
<b>PROM.</b>	<b>2.51</b>	<b>2.59</b>	<b>2.74</b>	<b>3.38</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de banco de agregados de SEDECA

### Peso específico agregado grueso (grava)

**Tabla 3.14.** Resultados del peso específico del agregado grueso (grava)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.62	2.65	2.72	1.44
2	2.61	2.65	2.71	1.49
3	2.61	2.65	2.72	1.47
<b>PROM.</b>	<b>2.61</b>	<b>2.65</b>	<b>2.72</b>	<b>1.47</b>

Fuente: Elaboración propia.

### Peso específico agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.15.** Resultados de peso específico del agregado grueso (gravilla)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.59	2.65	2.75	2.20
2	2.59	2.65	2.75	2.23
3	2.59	2.65	2.75	2.21
<b>PROM.</b>	<b>2.59</b>	<b>2.65</b>	<b>2.75</b>	<b>2.21</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de banco de agregados de la chancadora de Santa Ana

### Peso específico agregado grueso (grava)

**Tabla 3.16.** Resultados del peso específico del agregado grueso (grava)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.61	2.66	2.75	1.92
2	2.60	2.65	2.74	1.92
3	2.61	2.66	2.75	1.92
<b>PROM.</b>	<b>2.61</b>	<b>2.66</b>	<b>2.75</b>	<b>1.92</b>

Fuente: Elaboración propia.

### Peso específico agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.17.** Resultados de peso específico del agregado grueso (gravilla)

	Peso específico a granel (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.51	2.59	2.73	3.21
2	2.52	2.60	2.74	3.18
3	2.52	2.60	2.74	3.18
<b>PROM.</b>	<b>2.52</b>	<b>2.60</b>	<b>2.74</b>	<b>3.19</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.3 Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C128, AASHTO T84)

Este método tiene como objetivo determinar el peso específico aparente y peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino.

#### Resumen del método

Se pesa aproximadamente 1000 g de material, y se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, transcurrido ese tiempo se seca el material hasta alcanzar la condición de saturado con superficie seca, el cual se verifica cuando el material se desmorona al quitar el cono en el que la muestra fue colocada y compactada. De esta condición se extrae 500g de muestra y se coloca en un matraz que se llena con agua y es pesado, luego la misma se seca al horno, y se determina el peso seco.

**Figura 3.18.** Material sumergido por un tiempo de 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.19.** Muestra con humedad superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo

#### Agregado de Chancadora Garzón

**Tabla 3.18.** Resultados del peso específico del agregado fino (arena)

	P. E. a granel (g/cm <sup>3</sup> )	P. E. saturado con superficie seca (g/cm <sup>3</sup> )	P. E. aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.61	2.68	2.80	2.58
2	2.60	2.66	2.78	2.36
3	2.62	2.68	2.80	2.46
<b>PROM.</b>	<b>2.61</b>	<b>2.67</b>	<b>2.79</b>	<b>2.47</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### Agregado de SEDECA

**Tabla 3.19.** Resultados del peso específico del agregado fino (arena)

	P. E. a granel (g/cm <sup>3</sup> )	P. E. saturado con sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	P. E. aparente (g/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.38	2.42	2.49	1.68
2	2.39	2.45	2.54	2.34
3	2.63	2.68	2.78	2.06
<b>PROM.</b>	<b>2.47</b>	<b>2.52</b>	<b>2.60</b>	<b>2.03</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Agregado chancadora de Santa Ana

**Tabla 3.20.** Resultados del peso específico del agregado fino (arena)

	<b>P. E. a granel (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P. E. saturado con sueroficie seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P. E. aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de absorcion</b>
1	2.48	2.51	2.56	1.32
2	2.64	2.68	2.75	1.46
3	2.64	2.68	2.75	1.42
<b>PROM.</b>	<b>2.59</b>	<b>2.62</b>	<b>2.69</b>	<b>1.40</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.4 Peso unitario de los agregados gruesos y finos (ASTM C 29M-97, AASHTO T-27)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados gruesos y finos.

#### Resumen del método

En este ensayo se realizará para peso suelto y compactado, el peso suelto se determina llenando el recipiente con el agregado hasta rebosar, se enrasa el excedente de material y se pesa.

Para el peso compactado se realiza en tres capas, para ello se llena la tercera parte del recipiente con el agregado, se apisona con una barra metálica, mediante 25 golpes, esto se realiza con las dos capas faltantes.

Finalmente, se llena el recipiente con la última capa hasta rebosar se compacta con 25 golpes y se enrasa el excedente y se procede a pesar determinando con ello el peso unitario compactado.

**Figura 3.20.** Peso unitario del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.21.** Peso unitario del agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.22.** Peso unitario del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de chancadora Garzón

### Peso unitario de agregado grueso (grava)

**Tabla 3.21.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (grava)

Peso unitario suelto (g/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (g/cm <sup>3</sup> )
1.40	1.51

Fuente: Elaboración propia.

### Peso unitario de agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.22.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (gravilla)

Peso unitario suelto (g/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (g/cm <sup>3</sup> )
1.41	1.54

Fuente: Elaboración propia.

### Peso unitario de agregado fino (arena)

**Tabla 3.23.** Peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena)

Peso unitario suelto (g/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (g/cm <sup>3</sup> )
1.48	1.72

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de SEDECA

### Peso unitario de agregado grueso (grava)

**Tabla 3.24.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (grava)

Peso unitario suelto (g/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (g/cm <sup>3</sup> )
1.48	1.50

Fuente: Elaboración propia.

### **Peso unitario de agregado grueso (gravilla)**

**Tabla 3.25.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (gravilla)

<b>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso unitario compactado (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1.38	1.50

Fuente: Elaboración propia.

### **Peso unitario de agregado fino (arena)**

**Tabla 3.26.** Peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena)

<b>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso unitario compactado (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1.67	1.72

Fuente: Elaboración propia.

### **Resultados del ensayo de chancadora de Santa Ana**

#### **Peso unitario de agregado grueso (grava)**

**Tabla 3.27.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (grava)

<b>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso unitario compactado (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1.45	1.54

Fuente: Elaboración propia.

### **Peso unitario de agregado grueso (gravilla)**

**Tabla 3.28.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (gravilla)

<b>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso unitario compactado (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1.36	1.52

Fuente: Elaboración propia.

### **Peso unitario de agregado fino (arena)**

**Tabla 3.29.** Peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena)

<b>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso unitario compactado (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1.50	1.68

Fuente: Elaboración propia.

#### **3.3.1.5 Equivalente de arena (ASTM D2419, AASHTO T176)**

Este método establece un procedimiento rápido para determinar la calidad 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.

#### **Resumen del método**

Se vierte en la probeta de ensayo, la solución química hasta una altura de 4 pulgadas, luego se vierte en la misma aproximadamente 150 g de material preparado, y se deja reposar por 10 mín, transcurrido ese tiempo se agita la probeta en forma horizontal durante 30 segundos para alcanzar en ese intervalo de tiempo 90 ciclos. A continuación se coloca el irrigador dentro de la probeta y se procede a llenar con la solución química hasta alcanzar una altura aproximada de 38 cm. Se dejará reposar por un tiempo de 20 mín, al término de ese tiempo se procederá a leer el nivel superior de la suspensión de arcilla (lectura de arcilla), y el nivel de arena (lectura de arena) con el dispositivo que consta de un disco, varilla y sobrepeso.

**Figura 3.23.** Medición del nivel de arena



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo chancadora Garzón

**Tabla 3.30.** Resultados de equivalencia de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10.1	10.80	93.52
2	10.9	11.50	94.78
3	11.4	12.00	95.00
<b>Promedio</b>			<b>94.43</b>

Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo de SEDECA

**Tabla 3.31.** Resultados de equivalencia de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9	14.10	63.83
2	8.9	13.1	67.94
3	9.3	12.60	73.81
<b>Promedio</b>			<b>68.53</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo chancadora Santa Ana

**Tabla 3.32.** Resultados de equivalencia de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10.8	11.80	91.53
2	10.6	11.9	89.08
3	10.6	11.80	89.83
		<b>Promedio</b>	<b>90.14</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.6 Ensayo de desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles (ASTM C131, AASHTO T96)

Este ensayo es para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, plano de debilitamiento, plano de cristalización, forma de las partículas, cuyo objetivo es determinar la dureza de los materiales pétreos de las diferentes chancadoras que se emplearan en mezclas asfálticas.

#### Resumen del método

Se tamizará el material de acuerdo a la Tabla 3.33, y se mezclarán las cantidades de acuerdo al método indicado. La muestra preparada se introducirá a la máquina de los ángeles junto a con las esferas de metálicas de acuerdo al tipo de gradación del material a ser analizado, se asegurará la máquina de desgaste y se procederá a dar 500 revoluciones.

Finalizado el tiempo de rotación se saca el material y se tamiza en la malla N°12, el material retenido se lava y se seca al horno a una temperatura constante de 110 ° C, luego se pesa la muestra seca.

**Figura 3.24.** Preparación de material para el ensayo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.25.** Descripción de desgaste dentro de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.33.** Peso del agregado y número de esferas para agregados gruesos

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±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500

Fuente: Norma ASTM, C131.

## Resultados del ensayo chancadora Garzón

**Tabla 3.34.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (grava)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A	5000	3842.70	23.15	35% Máx
B				35% Máx
C				35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.35.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Máx
B				35% Máx
C	5000	4166.10	16.68	35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo de SEDECA

**Tabla 3.36.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (grava)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Máx
B	5000	3828.6	23.43	35% Máx
C				35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.37.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Máx
B				35% Máx
C	5000	3864.6	22.71	35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo chancadora Santa Ana

**Tabla 3.38.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (grava)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Máx
B	5000	3808.7	23.83	35% Máx
C				35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.39.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Máx
B				35% Máx
C	5000	3321.3	33.57	35% Máx
D				35% Máx

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2 Caracterización del cemento asfáltico

#### 3.3.2.1 Ensayo de penetración de materiales bituminosos (documento referencial ASTM D5, AASHTO T49-97)

Este ensayo determina la dureza o consistencia relativa, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente a una muestra de asfalto a condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo.

Si no se mencionan específicamente otras condiciones, se determina la penetración normal a 25° C.

#### Resumen del método

Se fundirá la muestra y se enfriará la muestra en un baño hasta una temperatura determinada, la penetración será realizada con una aguja cargada con 100g y la carga se aplica durante 5 segundos. La unidad de penetración es la décima de milímetro.

**Figura 3.26.** Realización de la penetración de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

**Resultados del ensayo para cemento asfáltico 85-100**

**Tabla 3.40.** Resultados del ensayo de penetración

Promedio	Especificaciones	
	Min	Máx
92	85	100

Fuente: Elaboración propia.

**Resultados del ensayo para cemento asfáltico 60-70**

**Tabla 3.41.** Resultados del ensayo de penetración

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
81	60	70

Fuente: Elaboración propia.

### **3.3.2.2 Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos (ASTM D113, AASHTO T51-00)**

Este método de ensayo determina la ductilidad de un asfalto como la longitud, medida en cm, a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se tracciona a la velocidad y temperatura especificadas.

A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de  $25 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ .

#### **Resumen del método**

Se calentará la muestra y se verterá en el molde hasta llenarlo, luego se dejará enfriar hasta la temperatura especificada de  $25^{\circ}\text{C}$ , una vez enfriado se procederá a enrazar con el fin de quitar el material excedente del molde. La ductilidad será la medida en centímetros de la distancia a la cual se alargará antes de romper cuando se tira de un extremo del espécimen a una velocidad constante especificada.

**Figura 3.27.** Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo cemento asfáltico 85-100

**Tabla 3.42.** Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
109 cm	100 cm	-

Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo cemento asfáltico 60-70

**Tabla 3.43.** Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
103 cm	100 cm	-

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.2.3 Ensayo de punto de inflamación mediante el vaso abierto de Cleveland (ASTM D22, AASHTO T48)

Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, creando un destello en presencia de una llama abierta.

##### Resumen del método

El vaso del ensayo se llena hasta un nivel especificado con la muestra. La temperatura de la muestra es aumentada rápidamente al principio y entonces a una proporción lenta constante a medida que el punto de destello se aproxima, en intervalos especificados una llama pequeña se pasará por encima del vaso.

Para determinar el punto de inflamación, se continúa con el ensayo hasta que la aplicación de la llama ocasiona que el aceite se incendie y se quemé durante por lo menos 5 segundos.

**Figura 3.28.** Realización del ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo cemento asfáltico 85-100

**Tabla 3.44.** Resultados del ensayo de punto de inflamación

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
288 °C	232 °C	-

Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo cemento asfáltico 60-70

**Tabla 3.45.** Resultados del ensayo de punto de inflamación

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
285 °C	232.22 °C	-

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2.4 Ensayo para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D36-89, AASHTO T53-92)

El punto de ablandamiento es otra medida de consistencia y se determina usualmente con el aparato del anillo y bola. Se establece entonces un punto de ablandamiento, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado y fluidez.

#### Resumen del método

Este ensayo consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de dimensiones normalizadas, para luego dejar enfriar a la temperatura ambiente por cuatro horas. Sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso específicos. Una vez lista, se suspende la muestra sobre un baño de agua y se calienta el baño de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. esta temperatura es el punto de ablandamiento.

**Figura 3.29.** Realización del ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados del ensayo cemento asfáltico 85-100

**Tabla 3.46.** Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
47 °C	43 °C	53 °C

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo cemento asfáltico 60-70

Tabla 3.47. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
43 °C	45 °C	57 °C

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2.5 Ensayo para determinar la gravedad específica (ASTM D70-76, AASHTO T228-93)

#### Objetivo

Este método de ensayo describe los procedimientos que deben seguirse paso a paso para la determinación de la gravedad específica o densidad relativa de los materiales bituminosos (cemento asfáltico 85-100), que es de consistencia sólida, semisólida.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas.

Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro.

Calcule la gravedad específica al tercer decimal más cercano como sigue a continuación con la siguiente fórmula.

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

Donde:

A = Masa del picnómetro (más el tapón), en g.

B = Masa del picnómetro lleno con agua, en g.

C = Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto, en g.

D = Masa del picnómetro más el asfalto más agua, en g.

**Figura 3.30.** Picnómetros utilizados para determinar el peso específico



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.31.** Determinación del peso del picnómetro + C.A. + agua



Fuente: Elaboración propia.

### Resultados del ensayo cemento asfáltico 85-100

**Tabla 3.48.** Resultados del ensayo de gravedad específica

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
1.006	1	1.05

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo cemento asfáltico 60-70

**Tabla 3.49.** Resultados del ensayo de gravedad específica

Promedio	Especificaciones	
	Mín	Máx
<b>1.010</b>	1	1.05

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.50.** Resumen de los ensayos del cemento asfáltico 85-100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promed.	Especificaciones	
						Mín.	Máx
Peso Picnómetro	grs.	33.8	34.1	32.9			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	81.25	81.3	78.5			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	63.55	62.6	61.1			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	81.55	81.6	78.7			
Peso Específico	grs./c m <sup>3</sup>	<b>1.007</b>	<b>1.008</b>	<b>1.004</b>	<b>1.006</b>	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	280	290	295	<b>288</b>	232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	115	105	107	<b>109</b>	100	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lect. N°1		100	99	91		
	Lect. N°2		92	93	85		
	Lect. N°3		87	90	87		
	Prom.	0.1mm	93	94	88	<b>92</b>	85
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	-	-	-	-	250	-
Ensayo de la mancha					No se realizó	negativo	
Solvente gasolina standart					No se realizó	negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol					No se realizó	negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol					No se realizó	negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.					No se realizó		
* Pérdida en masa	%						1
* Penetración del residuo, penetración original	%				No se realizó	47	
Índice de susceptibilidad térmica					No se realizó	-1	1
Punto de ablandamiento	°C	48.0	47.0	45.0	<b>47</b>	42	53

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.51.** Resumen de los ensayos del cemento asfáltico 60-70

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	35.1	36.8	33.9			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	86	88.1	85.7			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	64.2	66.1	63.8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	86.2	88.1	86.6			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1.004</b>	<b>0.997</b>	<b>1.028</b>	<b>1.010</b>	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	275	285	295	<b>285</b>	232.22	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	96	108	105	<b>103</b>	100	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	85	76	76			
	Lectura N°2	89	80	75			
	Lectura N°3	90	78	76			
	Promedio	mm	88	78	76	<b>81</b>	60
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	-	-	-	-	250	-
Ensayo de la mancha				No se realizó		NEGATIVO	
Solvente gasolina standart				No se realizó		NEGATIVO	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizó		NEGATIVO	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizó		NEGATIVO	
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.				No se realizó			
* Pérdida en masa	%	0.125	0.125	0.125	<b>0.125</b>	0	1
* Penetración del residuo, penetración original	%			No se realizó		47	
Indice de susceptibilidad térmica				No se realizó		-1	1
Punto de ablandamiento	°C	44.0	42.0	43.0	<b>43</b>	42	53

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 Ensayo del hidrómetro para la granulometría del Caolín ASTM D422

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños. El hidrómetro se usa para determinar el

porcentaje de partículas de suelo u otro material suelto dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2.00 mm (N 10). Cuando se requieren más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz número 75 (N 200).

### **Objetivo**

Determinar el tamaño de partículas basándose en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido.

### **Procedimiento**

Se pesa 80 gramos de caolín seco, se lo vierte a un plato pequeño donde se procede a mezclar con un agente dispersante que es el silicato de sodio, se mezcla bien con la ayuda de una espátula y se lo deja reposar por una noche, posteriormente se debe vaciar la muestra a una probeta de 1000 ml. y se la debe llenar con agua hasta llegar a los 1000 ml, se procede a batir la probeta con el material para la dispersión de las partículas, se debe colocar la probeta en una superficie plana y se procede a medir la temperatura del agua y luego se procede a realizar el ensayo con el hidrómetro lecturando la profundidad y el tiempo transcurrido para cada lectura y la temperatura de cada lectura, este procedimiento se lo debe realizar hasta que el hidrómetro marque cero y se asienten todas las partículas.

Para empeorar el ensayo se debe empezar cada 2 minutos, posteriormente cada 5 minutos y luego cada 20 a 30 minutos y si es necesario cada 24 hrs.

Se debe realizar una corrección por temperatura y por menisco de la lectura del hidrómetro una vez llenado con agua a la hora de realizar los cálculos, esto se lo hace a través de tablas.

**Figura 3.32.** Preparación del caolín con defloculante



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.33.** Vaciado del caolín a la probeta



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.34.** Lectura del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.52.** Valores de profundidad efectiva basados en hidrómetros y cilindros de sedimentación dados

Hidrómetro 151 H		Hidrómetro 152 H			
Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)
1.000	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.1	32	11.1
1.002	15.8	2	16.0	33	10.9
1.003	15.5	3	15.8	34	10.7
1.004	15.2	4	15.6	35	10.6
1.005	15.0	5	15.5	36	10.4
1.006	14.7	6	15.3	37	10.2
1.007	14.4	7	15.2	38	10.1
1.008	14.2	8	15.0	39	9.9
1.009	13.9	9	14.8	40	9.7
1.010	13.7	10	14.7	41	9.6
1.011	13.4	11	14.5	42	9.4
1.012	13.1	12	14.3	43	9.2
1.013	12.9	13	14.2	44	9.1
1.014	12.6	14	14.0	45	8.9
1.015	12.3	15	13.8	46	8.8
1.016	12.1	16	13.7	47	8.6
1.017	11.8	17	13.5	48	8.4
1.018	11.5	18	13.3	49	8.3
1.019	11.3	19	13.2	50	8.1
1.020	11.0	20	13.0	51	7.9
1.021	10.7	21	12.9	52	7.8
1.022	10.5	22	12.7	53	7.6
1.023	10.2	23	12.5	54	7.4
1.024	10.0	24	12.4	55	7.3
1.025	9.7	25	12.2	56	7.1
1.026	9.4	26	12.0	57	7.0
1.027	9.2	27	11.9	58	6.8
1.028	8.9	28	11.7	59	6.6
1.029	8.6	29	11.5	60	6.5
1.030	8.4	30	11.4		
1.031	8.1				
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				
1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales de la Administradora Boliviana de carreteras.

### Resultados del ensayo

Modelo Hidróm.: **152 H**

Peso específico: **2.60** g/cm<sup>3</sup>

Peso suelo seco: **80 gr**

Factor (a) = **1.01**

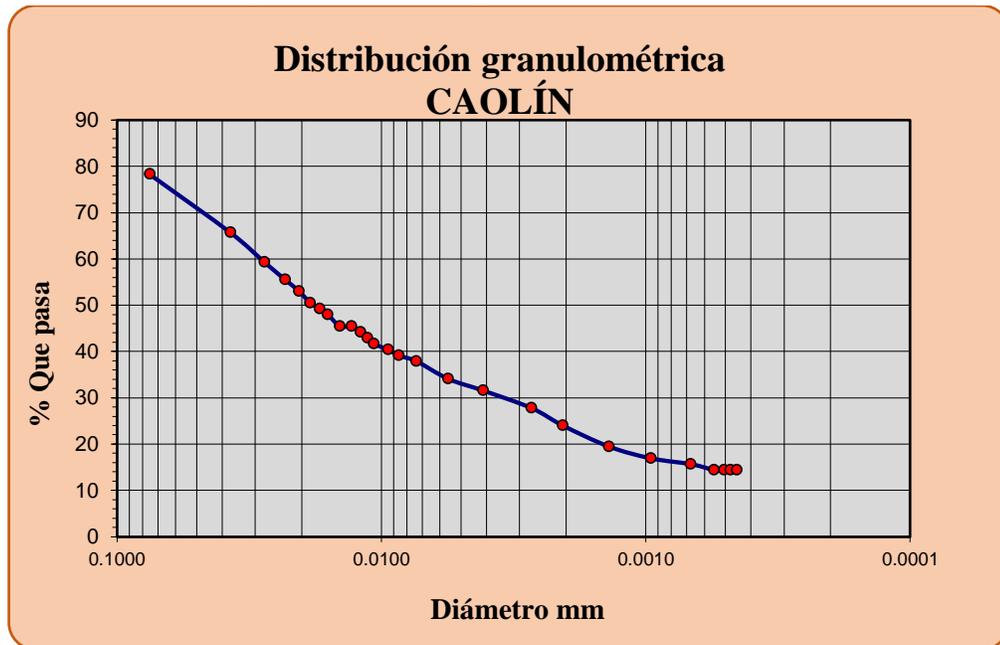
Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.53.** Hidrómetro del Caolín

Hora de lectura	Tiempo transc. Mín.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
09:53	0	24	60	61	6.40	0.013	0	1.00	62.00	0.075	78.28
09:54	1	24	50	51	7.90	0.013	7.900	1.00	52.00	0.0371	65.65
09:55	2	24	45	46	8.80	0.013	4.400	1.00	47.00	0.0277	59.34
09:56	3	24	42	43	9.20	0.013	3.067	1.00	44.00	0.0231	55.55
09:57	4	24	40	41	9.60	0.013	2.400	1.00	42.00	0.0204	53.03
09:58	5	24	38	39	9.90	0.013	1.980	1.00	40.00	0.0186	50.50
09:59	6	24	37	38	10.10	0.013	1.683	1.00	39.00	0.0171	49.24
10:00	7	24	36	37	10.20	0.013	1.457	1.00	38.00	0.0159	47.98
10:02	9	24	34	35	10.60	0.013	1.178	1.00	36.00	0.0143	45.45
10:04	11	24	34	35	10.60	0.013	0.964	1.00	36.00	0.0130	45.45
10:06	13	24	33	34	10.70	0.013	0.823	1.00	35.00	0.0120	44.19
10:08	15	24	32	33	10.90	0.013	0.727	1.00	34.00	0.0113	42.93
10:10	17	24	31	32	11.10	0.013	0.653	1.00	33.00	0.0107	41.66
10:15	22	24	30	31	11.20	0.013	0.509	1.00	32.00	0.0094	40.40
10:20	27	24	29	30	11.40	0.013	0.422	1.00	31.00	0.0086	39.14
10:30	37	24	28	29	11.50	0.013	0.311	1.00	30.00	0.0074	37.88
11:00	67	24	25	26	12.00	0.013	0.179	1.00	27.00	0.0056	34.09
12:00	127	24	23	24	12.40	0.013	0.098	1.00	25.00	0.0041	31.56
15:00	307	24	20	21	12.90	0.013	0.042	1.00	22.00	0.0027	27.78
19:00	547	24	17	18	13.30	0.013	0.024	1.00	19.00	0.0021	23.99
08:00	1327	22	14	15	13.80	0.014	0.010	0.40	15.40	0.0014	19.44
09:00	2827	22	12	13	14.20	0.014	0.005	0.40	13.40	0.0010	16.92
09:00	5707	22	11	12	14.30	0.014	0.003	0.40	12.40	0.0007	15.66
11:00	8707	22	10	11	14.50	0.014	0.002	0.40	11.40	0.0006	14.39
14:00	10327	22	10	11	14.50	0.014	0.001	0.40	11.40	0.0005	14.39
10:00	11527	22	10	11	14.50	0.014	0.001	0.40	11.40	0.0005	14.39
10:00	12967	22	10	11	14.50	0.014	0.001	0.40	11.40	0.0005	14.39

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.35.** Curva granulométrica del Caolín



Fuente: Elaboración propia.

### **3.4 Elaboración de la mezcla asfáltica**

La mezcla asfáltica que se utilizará será una mezcla asfáltica densa elaborada en caliente. La misma que se construirán siguiendo el método Marshall, dicho método está descrito a continuación.

#### **3.4.1 Diseño de la mezcla asfáltica siguiendo el método Marshall**

El método Marshall, sólo se aplica a mezclas asfálticas elaboradas en caliente, de pavimentación, también usa muestras normalizadas de pruebas (probetas o briquetas) de 63,5mm (2.5in) de espesor por 101,6mm (4in) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes tipos de asfaltos, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado.

Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados.

El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

### **3.4.2 Procedimiento para la realización del diseño Marshall de la mezcla asfáltica**

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente para calcular en contenido óptimo de cemento asfáltico, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2.54 cm (1 pulgada), el diámetro del molde Marshall será de 101.6 mm (4 pulgadas).

#### **3.4.2.1 Descripción de los instrumentos utilizados**

**Molde de compactación.-** Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101,6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"), la placa de base plana y el collar debe ser intercambiables.

**Martillo de compactación.-** Con base plana circular de apisonado de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457,2 mm (18").

**Extractor de muestras de asfaltos.-** Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm y 12.7 mm (1/2") de espesor.

**Soporte para molde o porta molde.-** Dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

**Mordaza.-** Consiste de dos semicilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado que sirve para facilitar su fácil limpieza. El segmento

inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven como guía.

**Medidor de deformación.-** Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro.

Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo de acero se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm

**Prensa.-** Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min.

**Medidor de Estabilidad.-** La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,001 mm

**Discos de Papel Filtrante.-** De 4 pulgadas, colocada en la base interior del molde para evitar que la mezcla se adhiera a la base del molde.

**Horno.-** Capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5°F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.

**Baño.-** El baño de agua con 150 mm (6”) de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$  ( $140^{\circ} \pm 1,8^{\circ} \text{F}$ ), deberá tener un falso fondo el cual debe estar debidamente perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2”) sobre el fondo del tanque.

**Recipientes.-** Sirve para calentar los agregados y para mezclar tanto el asfalto y agregado.

**Tamices.-** 25 mm (1”), 19.0 mm (3/4”), 12,5 mm (1/2”), 9.5 mm (3/8”), 4.75 mm (N° 4), 2.36 mm (N° 8), 1.18 mm (N° 16), 0.60 mm (N° 30), 0.3 mm (N° 50), 0.15 mm (N° 100) y 0.075 mm (N° 200).

**Termómetros blindados.-** De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0.2°C (68°F a 158°F + 0.4°F).

**Balanza.-** Para pesar agregado y asfalto de 5 kg de capacidad y con una sensibilidad de 1 g. Para pesar probetas compactadas de 2 kg de capacidad y sensibilidad de la misma.

#### **3.4.2.2 Preparación de la mezcla asfáltica (construcción de las briquetas)**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto según el contenido mínimo del cemento asfáltico a utilizar.

El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previamente realizada con los diferentes agregados de la mezcla.

Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final.

La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación.

El número de golpes del martillo (35, 50 o 75 golpes) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada.

Los golpes se deben realizar a ambas caras de las briquetas para tener una superficie uniformemente compactada.

Terminado de realizar la compactación de las briquetas se debe esperar un margen de 2 horas para pasar a desmoldar.

### **3.4.3 Gradación de los agregados para el diseño de mezclas asfálticas densas siguiendo el método Marshall**

Para la elaboración de una mezcla densa o cerrada, la granulometría de las distintas fracciones de áridos constituyentes de la mezcla (incluyendo el filler de aporte) deben estar comprendidas en función de dos parámetros.

El tamaño máximo nominal del agregado y el de las franjas granulométricas de control (superior e inferior).

Estas franjas de control son puntos de cumplimiento obligado para la curva granulométrica.

**Tabla 3.54.** Graduación de los agregados y franjas granulométricas de control para mezclas asfálticas densas

Tamiz	Mezcla densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; finos y filler) si se requiere							Porcentaje en peso		
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37,5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25,0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19,0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½" (12,5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9,5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4,75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2,36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1,18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: Secretaria de comunicaciones y transportes (SCT), Instituto Mexicano del transporte, 2004.

En base a los parámetros de granulometría exigidos en la tabla 3.54, con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de agregados (grava, gravilla, arena) para cumplir con los requisitos planteadas, ya que casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con estos requisitos granulométricos.

**Tabla 3.55.** Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas de chancadora Garzón

		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Grava	Gravilla	Arena	Filler	TOTAL					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	al	al	al	al	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Especificaciones	
		a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	25.00	30.00	40.00	5.00	100.00				Mínimo	Máximo
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	100.00	100	100
1"	25.4	120.00	0.00	0.00	0.00	30.00	0.00	0.00	0.00	30.00	30.00	0.60	99.40	90	100
3/4"	19.0	2625.40	0.00	0.00	0.00	656.35	0.00	0.00	0.00	656.35	686.35	13.73	86.27	-	-
1/2"	12.5	1682.70	6.30	0.00	0.00	420.68	1.89	0.00	0.00	422.57	1108.92	22.18	77.82	56	80
3/8"	9.50	376.20	380.00	0.00	0.00	94.05	114.00	0.00	0.00	208.05	1316.97	26.34	73.66	-	-
Nº4	4.75	187.30	3971.20	344.25	0.00	46.83	1191.36	137.70	0.00	1375.89	2692.85	53.86	46.14	29	59
Nº8	2.36	0.10	571.10	987.75	0.00	0.03	171.33	395.10	0.00	566.46	3259.31	65.19	34.81	19	45
Nº16	1.18	0.20	4.20	804.25	0.00	0.05	1.26	321.70	0.00	323.01	3582.32	71.65	28.35	-	-
Nº30	0.60	0.10	2.40	701.50	0.00	0.03	0.72	280.60	0.00	281.35	3863.66	77.28	22.72	-	-
Nº50	0.30	0.12	1.20	1014.25	0.00	0.03	0.36	405.70	0.00	406.09	4269.75	85.40	14.60	5	17
Nº100	0.15	0.10	0.50	857.75	0.00	0.03	0.15	343.10	0.00	343.28	4613.03	92.27	7.73	-	-
Nº200	0.075	0.20	0.12	223.00	0.00	0.05	0.04	89.20	0.00	89.29	4702.31	94.05	5.95	1	7
BASE	-	7.50	62.80	66.50	5000.00	1.88	18.84	26.60	250.00	297.32	4999.63	100.00	0.00	-	-
<b>SUMA</b>		4999.9	4999.8	4999.3	5000.0	1249.98	1499.95	1999.70		4999.6					
<b>PÉRDIDAS</b>		0.1	0.2	0.8	0.0										

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.56.** Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas de SEDECA

		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Grava	Gravilla	Arena	Filler	TOTAL				Especificaciones	
Tamices	tamaño	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	al	al	al	al	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa	Especificaciones	
	(mm)	a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	25.00	30.00	45.00	0.00	100.00			del total	Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	112.50	0.00	0.00	0.00	28.13	0.00	0.00	0.00	28.13	28.13	0.56	99.44	90	100
1/2"	12.5	3093.67	0.00	0.00	0.00	773.42	0.00	0.00	0.00	773.42	801.54	16.03	83.97	-	-
3/8"	9.50	1159.50	107.83	0.00	0.00	289.88	32.35	0.00	0.00	322.23	1123.77	22.48	77.52	56	80
Nº4	4.75	621.83	3511.33	18.50	0.00	155.46	1053.40	8.33	0.00	1217.18	2340.95	46.82	53.18	35	65
Nº8	2.36	12.50	1380.83	769.50	0.00	3.13	414.25	346.28	0.00	763.65	3104.60	62.10	37.90	23	49
Nº16	1.18	0.00	0.00	967.50	0.00	0.00	0.00	435.38	0.00	435.38	3539.98	70.81	29.19	-	-
Nº30	0.60	0.00	0.00	978.75	0.00	0.00	0.00	440.44	0.00	440.44	3980.41	79.62	20.38	-	-
Nº50	0.30	0.00	0.00	928.00	0.00	0.00	0.00	417.60	0.00	417.60	4398.01	87.97	12.03	5	19
Nº100	0.15	0.00	0.00	576.50	0.00	0.00	0.00	259.43	0.00	259.43	4657.44	93.16	6.84	-	-
Nº200	0.075	0.00	0.00	322.50	0.00	0.00	0.00	145.13	0.00	145.13	4802.56	96.06	3.94	2	8
BASE	-	0.00	0.00	437.50	5000.00	0.00	0.00	196.88	0.00	196.88	4999.44	100.00	0.00	-	-
<b>SUMA</b>		5000.0	5000.0	4998.8	5000.0	1250.00	1500.00	2249.44		4999.4					
<b>PÉRDIDAS</b>		0.0	0.0	1.3	0.0										

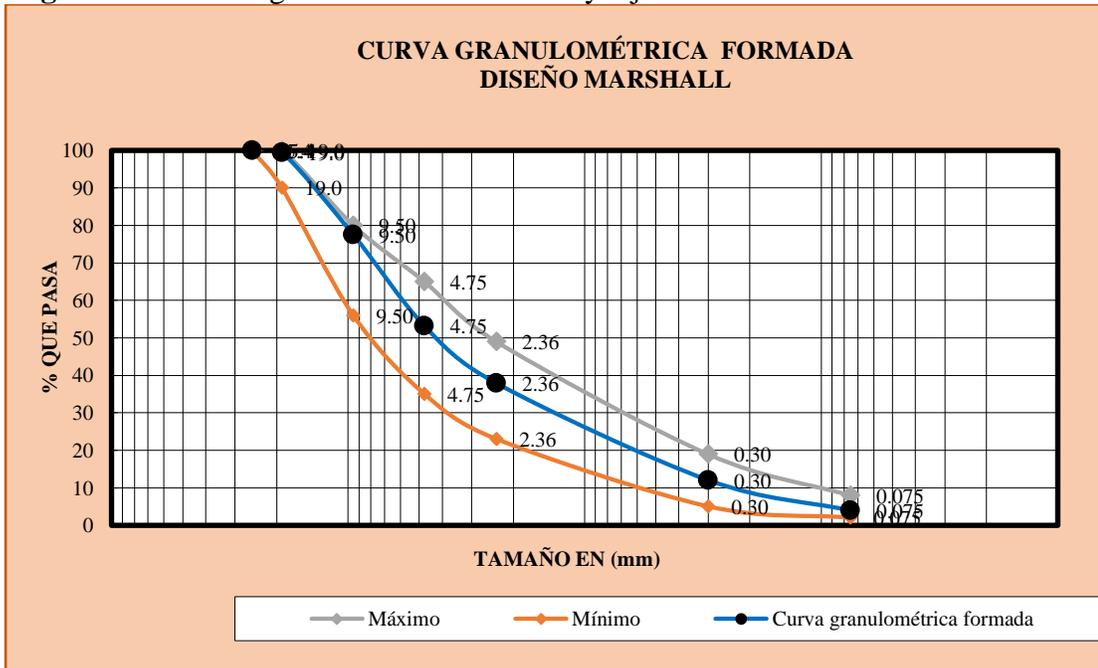
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.57.** Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas de chancadora Santa Ana

		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Grava	Gravilla	Arena	Filler	TOTAL					
Tamices	tamaño	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	al	al	al	al	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa	Especificaciones	
	(mm)	a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	a 5000 gr	25.00	30.00	40.00	5.00	100.00			del total	Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	183.17	0.00	0.00	0.00	45.79	0.00	0.00	0.00	45.79	45.79	0.92	99.08	90	100
1/2"	12.5	4262.33	27.00	0.00	0.00	1065.58	8.10	0.00	0.00	1073.68	1119.48	22.39	77.61	-	-
3/8"	9.50	531.50	1383.00	0.00	0.00	132.88	414.90	0.00	0.00	547.78	1667.25	33.35	66.65	56	80
Nº4	4.75	19.67	3413.00	220.25	0.00	4.92	1023.90	88.10	0.00	1116.92	2784.17	55.69	44.31	35	65
Nº8	2.36	3.33	177.00	1315.25	0.00	0.83	53.10	526.10	0.00	580.03	3364.20	67.29	32.71	23	49
Nº16	1.18	0.00	0.00	872.00	0.00	0.00	0.00	348.80	0.00	348.80	3713.00	74.27	25.73	-	-
Nº30	0.60	0.00	0.00	610.25	0.00	0.00	0.00	244.10	0.00	244.10	3957.10	79.15	20.85	-	-
Nº50	0.30	0.00	0.00	1065.25	0.00	0.00	0.00	426.10	0.00	426.10	4383.20	87.67	12.33	5	19
Nº100	0.15	0.00	0.00	723.75	0.00	0.00	0.00	289.50	0.00	289.50	4672.70	93.47	6.53	-	-
Nº200	0.075	0.00	0.00	136.00	0.00	0.00	0.00	54.40	0.00	54.40	4727.10	94.55	5.45	2	8
BASE	-	0.00	0.00	55.75	5000.00	0.00	0.00	22.30	250.00	272.30	4999.40	100.00	0.00	-	-
<b>SUMA</b>		5000.0	5000.0	4998.5	5000.0	1250.00	1500.00	1999.40		4999.4					
<b>PÉRDIDAS</b>		0.0	0.0	1.5	0.0										

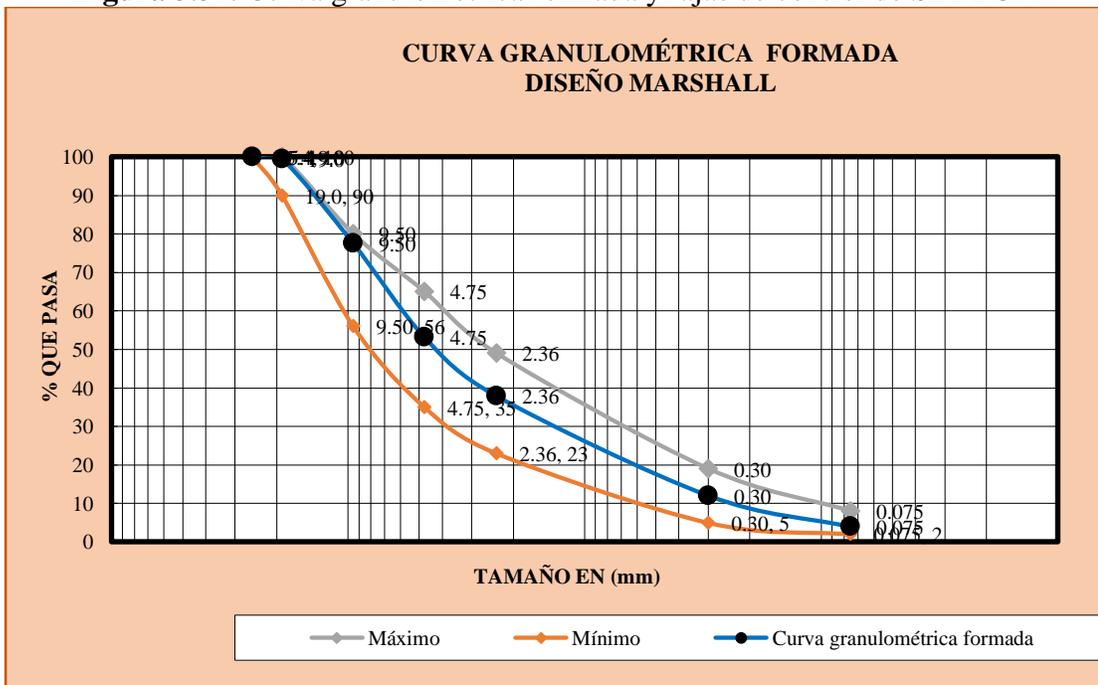
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.36.** Curva granulométrica formada y fajas de control de chancadora Garzón



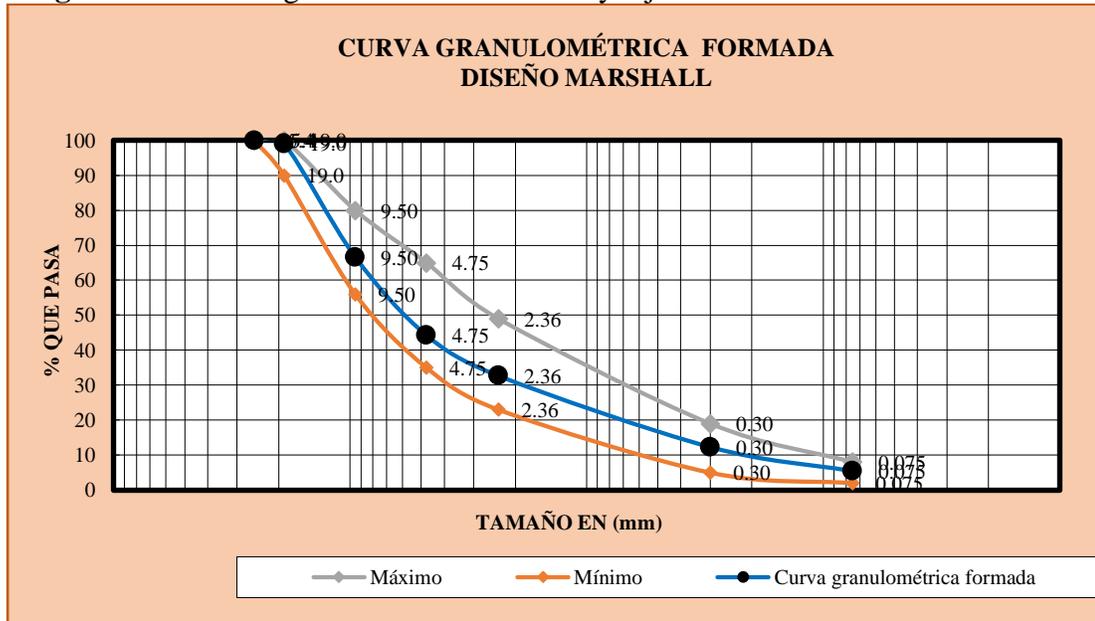
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.37.** Curva granulométrica formada y fajas de control de SEDECA



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.38.** Curva granulométrica formada y fajas de control de chanc. Santa Ana



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Procedimiento del ensayo realizado en laboratorio

#### 3.5.1 Dosificación de la mezcla en función a la cantidad de cemento asfáltico

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizará el análisis de 5 porcentajes de asfalto con incrementos de 0,5%, para la mezcla con los agregados. Para ello se elaborará 3 briquetas con 75 golpes por lado con el martillo de compactación por cada porcentaje de asfalto.

La experiencia ha demostrado que las mezclas de agregados y cemento asfáltico de 1200 gramos de peso, permiten obtener muestras compactadas de  $2,5 \pm 0,01$  pulgadas de altura. Por lo tanto, para elaborar cada probeta se mezclarán las cantidades necesarias de cada fracción de agregado y asfalto para alcanzar dicho peso.

#### 3.5.2 Contenido óptimo de cemento asfáltico

El cemento asfáltico interviene en las mezclas asfálticas en proporciones diferentes según el tipo de formulación, generalmente este valor oscila entre el 3% y el 10 % sobre la masa de los agregados pétreos. Generalmente los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su antigua clasificación de acuerdo al ensayo de penetración, como

aquéllos de penetración intermedia (60/70 y 85/100) y actualmente también tienen un uso generalizado los asfaltos modificados. Según ensayos realizados anteriormente para un asfalto 85-100 y un 60-70 el contenido óptimo oscila entre 4.5 y 7%, pariremos del 4.5% con intervalos de 0.5% mayores a 5 y menores a 5.

### 3.5.2.1 Contenido óptimo de cemento asfáltico 85-100

Se determinó el contenido óptimo para cada una de las 3 canteras de agregados con las que se trabajó la investigación las cuales detallaremos a continuación.

**Tabla 3.58.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para chancadora Garzón

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Peso de filler (gr)	57.30	57.00	56.70	56.40	56.10	55.80
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.59.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para agregados SEDECA

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	515.70	513.00	510.30	507.60	504.90	502.20
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.60.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para chancadora Santa Ana

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Filler (gr)	57.30	57.00	56.70	56.40	56.10	55.80
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2.2 Contenido óptimo de cemento asfáltico 60-70

Se determinó el contenido óptimo para cada una de las 3 canteras de agregados con las que se trabajó la investigación las cuales detallaremos a continuación.

**Tabla 3.61.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para chancadora Garzón

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Filler	57.30	57.00	56.70	56.40	56.10	55.80
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.62.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para agregados SEDECA

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	515.70	513.00	510.30	507.60	504.90	502.20
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.63.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para chancadora Santa Ana

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
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)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	458.40	456.00	453.60	451.20	448.80	446.40
Filler (gr)	57.30	57.00	56.70	56.40	56.10	55.80
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinada las cantidades necesarias de agregado para cada porcentaje de cemento asfáltico se procede a realizar la mezcla como se indica a continuación:

En una bandeja deberá colocarse la cantidad indicada de cada fracción de agregado a una temperatura especificada (de 110 a 120 °C), seguidamente se añade la cantidad calculada de cemento asfáltico previamente calentada a una temperatura especificada, hasta completar el peso total de una briqueta para un porcentaje determinado. Seguidamente se realiza el mezclado hasta obtener una mezcla homogénea, a una temperatura no inferior de 140°C.

**Figura 3.39.** Colocación de cantidades de agregados y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.40.** Mezcla preparada



Fuente: Elaboración propia.

### **3.5.3 Proceso de compactación de las muestras**

Para la compactación, primeramente se calienta los moldes colocándolos en un horno de 100 a 150 °C por unos 30 minutos. Una vez retiradas los moldes del horno se vierte la mezcla en los moldes Marshall, en tres capas, dando ciertas varilladas para el acomodo de la mezcla y se procede a la compactación dando 75 golpes con el martillo,

en la cara superior, luego se le da la vuelta y se aplica otros 75 golpes, dando como resultado un total de 150 golpes.

**Figura 3.41.** Martillo para compactación



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.42.** Compactación de la muestra, dando 75 golpes por cara



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la compactación, se deja reposar el espécimen por un tiempo aproximado de 1 a 2 horas, para luego ser extraídas del molde.

**Figura 3.43.** Extracción de las briquetas de los moldes



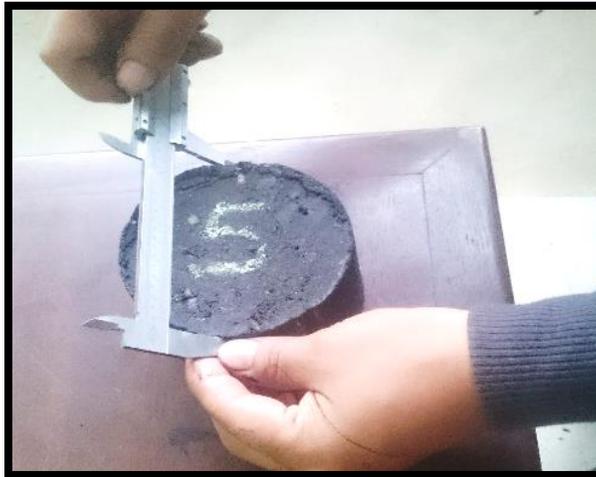
Fuente: Elaboración propia.

### **3.5.4 Caracterización de las mezclas compactas para la determinación del contenido óptimo de asfalto**

La máquina de ensayo Marshall, está diseñada para aplicar cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de un anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para ensayo de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo.

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de 4 alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

**Figura 3.44.** Determinación de las dimensiones de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

#### **3.5.4.1 Determinación de la densidad de los especímenes**

Para la determinación de la densidad, se determina la masa en el aire del espécimen compactado ( $W_s$ ), enseguida se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 3 minutos a una temperatura de 25°C, y se determina la masa en el agua ( $W_h$ ), se saca del agua, se seca con la ayuda de una toalla, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seco ( $W_{ss}$ ), y se determina la masa para esta condición.

**Figura 3.45.** Determinación del peso de la briqueta en estado seco



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.46.** Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.47.** Determinación del peso saturado superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.4.2 Determinación de la estabilidad y fluencia

Antes del ensayo para determinar la estabilidad y fluencia, se sumerge las briquetas en baño de agua a  $60\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$  ( $140 \pm 1.8\text{ °F}$ ) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos. Transcurrido el tiempo se retiran del baño de agua, se secan y se colocan a entre las mordazas del equipo para la aplicación de la carga y determinar la estabilidad y la fluencia de cada briqueta.

**Figura 3.48.** Briquetas sumergidas en baño maría a  $60\text{ °C}$



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.49.** Determinación de la estabilidad y fluencia de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo Marshall para cemento asfáltico 85-100

**Tabla 3.64.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de chancadora Garzón

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	2111.875	5.40
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.458	5.75
Vacíos de la mezcla (%)	4.385	6.50
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.88</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.65.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de agregados SEDECA

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	4182.71	5.33
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	5.80
Vacíos de la mezcla Mín (%)	2.97	6.19
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.77</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.66.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de chancadora Santa Ana

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	2487.75	5.78
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.33	5.60
Vacíos de la mezcla Mín (%)	3.00	6.22
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.87</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del ensayo Marshall para cemento asfáltico 60-70

**Tabla 3.67.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de chancadora Garzón

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	2968.77	5.79
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	5.74
Vacíos de la mezcla Mín (%)	3.80	6.08
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.87</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.68.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de agregados SEDECA

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	4020.41	5.55
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.33	5.77
Vacíos de la mezcla Mín (%)	4.21	6.38
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.90</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.69.** Contenido óptimo de cemento asfáltico de chancadora Santa Ana

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	2882.14	5.76
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.35	5.73
Vacíos de la mezcla Mín (%)	4.10	6.32
<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio =</b>	<b>5.94</b>

Fuente: Elaboración propia.

### **3.6 Desarrollo de los ensayos con incorporación de caolín en las mezclas asfáltica utilizando método Marshall**

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto para cada tipo de agregado mineral y tipo de cemento asfáltico, es necesario determinar el porcentaje óptimo de caolín que deben utilizarse para obtener los mejores resultados al modificar la mezcla.

Como primer paso, es importante obtener material del caolín que pase el tamiz #200, tomar una muestra y someter está a un ensayo de granulometría.

Para la sustitución del filler por el caolín, se realizó la misma en porcentajes de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%, en relación al peso del llenante mineral que pasa el tamiz #200

Para realizar está parte del ensayo, al ser una investigación, es necesario realizar 3 briquetas con el mismo porcentaje de sustitución de caolín, teniendo un total de 18 briquetas de cada tipo de asfalto 85-100 y 70-60.

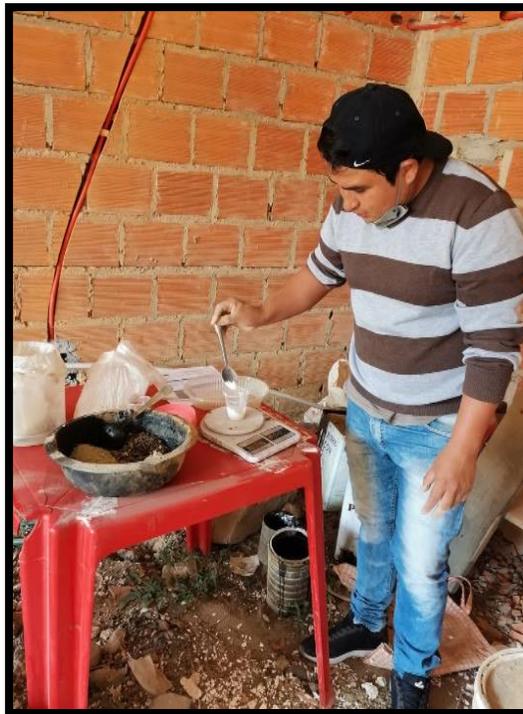
El tratamiento del agregado fue el mismo que el explicado anteriormente para la mezcla convencional, ya que se dejó el material pétreo en un horno a temperatura de mezcla.

Para la colocación del asfalto, se sigue el mismo procedimiento que la mezcla original, con la excepción, que ahora todas las briquetas llevan el mismo porcentaje de asfalto (% óptimo C.A.).

En cuanto a la mezcla para las briquetas, la porción de caolín se va agregada en el momento que se va pesando la llenante mineral, variando el porcentaje del filler al introducir el porcentaje de caolín.

La fabricación de la briqueta (colocación de la mezcla en los moldes y su compactación con 75 golpes) es la misma que para la mezcla convencional, al igual que el proceso de desmolde, pesaje y ensayo en la máquina Marshall para la determinación de la estabilidad y flujo de cada briqueta.

**Figura 3.50.** Determinación de la estabilidad y fluencia de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.51.** Determinación de la estabilidad y fluencia de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

### **3.6.1 Elaboración de briquetas con incorporación de caolín a las mezclas asfálticas convencional con cemento asfáltico 85-100**

Elaboración de briquetas con incorporación de caolín a las mezclas asfálticas convenciones para un cemento asfáltico 85-100.

Para la elaboración de las briquetas con incorporación de caolín se utilizó agregados de la chancadora Garzón (San Mateo), chancadora Santa Ana (Santa Ana) y de la planta de SEDECA (Charaja).

Jugando con la variación de filler y caolín y manteniendo el porcentaje óptimo obtenido de la mezcla convencional calculada anteriormente.

Se desarrolló primeramente briquetas con 0% de caolín y 5% de filler, 1% caolín y 4% de filler, 2% caolín y 3% filler, 3% caolín y 2% filler, 4% caolín y 1% filler, 5% caolín y 0% filler.

**Tabla 3.70.** Cantidad de caolín y llenante mineral para cada probeta para chancadora Garzón (San Mateo)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.88%	5.88%	5.88%	5.88%	5.88%	5.88%
Porcentaje de agregado (%)	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	70.56	70.56	70.56	70.56	70.56	70.56
Peso de grava (gr)	282.36	282.36	282.36	282.36	282.36	282.36
Peso de gravilla (gr)	338.83	338.83	338.83	338.83	338.83	338.83
Peso de arena (gr)	451.78	451.78	451.78	451.78	451.78	451.78
Peso de filler (gr)	56.47	45.18	33.88	22.59	11.29	0.00
Peso de caolín (gr)	0.00	11.29	22.59	33.88	45.18	56.47
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.71.** Cantidad de caolín y llenante mineral para cada probeta para agregado de la planta SEDECA (Charaja)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.77%	5.77%	5.77%	5.77%	5.77%	5.77%
Porcentaje de agregado (%)	94.23%	94.23%	94.23%	94.23%	94.23%	94.23%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	69.24	69.24	69.24	69.24	69.24	69.24
Peso de grava (gr)	282.7	282.7	282.7	282.7	282.7	282.7
Peso de gravilla (gr)	339.2	339.2	339.2	339.2	339.2	339.2
Peso de arena (gr)	508.8	497.5	486.2	474.9	463.6	452.3
Peso del caolín (gr)	0.00	11.31	22.62	33.92	45.23	56.54
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.72.** Cantidad de caolín y llenante mineral para chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%
Porcentaje de agregado (%)	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	70	70	70	70	70	70
Peso de grava (gr)	282.39	282.39	282.39	282.39	282.39	282.39
Peso de gravilla (gr)	338.87	338.87	338.87	338.87	338.87	338.87
Peso de arena (gr)	451.82	451.82	451.82	451.82	451.82	451.82
Peso de filler (gr)	56.48	45.18	33.89	22.59	11.30	0.00
Peso de caolín (gr)	0.00	11.30	22.59	33.89	45.18	56.48
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2 Elaboración de briquetas con incorporación de caolín a las mezclas asfálticas convencional con cemento asfáltico 60-70

Para la elaboración de las briquetas con incorporación de caolín se utilizó agregados de la chancadora Garzón (San Mateo), planta de SEDECA (Charaja) y chancadora Santa Ana (Santa Ana).

Jugando con la variación de filler y caolín y manteniendo el porcentaje óptimo obtenido de la mezcla convencional calculada anteriormente.

**Tabla 3.73.** Cantidad de caolín y de llenante mineral para cada probeta para chancadora Garzón (San Mateo)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%	5.87%
Porcentaje de agregado (%)	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	70.44	70.44	70.44	70.44	70.44	70.44
Peso de grava (gr)	282.39	282.39	282.39	282.39	282.39	282.39
Peso de gravilla (gr)	338.87	338.87	338.87	338.87	338.87	338.87
Peso de arena (gr)	451.82	451.82	451.82	451.82	451.82	451.82
Peso de filler (gr)	56.48	45.18	33.89	22.59	11.30	0.00
Peso de caolín (gr)	0.00	11.30	22.59	33.89	45.18	56.48
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.74.** Cantidad de caolín y llenante mineral para cada probeta para agregados de la planta de SEDECA (Charaja)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.90%	5.90%	5.90%	5.90%	5.90%	5.90%
Porcentaje de agregado (%)	94.10%	94.10%	94.10%	94.10%	94.10%	94.10%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	71	71	71	71	71	71
Peso de grava (gr)	282.3	282.3	282.3	282.3	282.3	282.3
Peso de gravilla (gr)	338.8	338.8	338.8	338.8	338.8	338.8
Peso de arena (gr)	508.1	496.8	485.6	474.3	463.0	451.7
Peso de caolín (gr)	0	11.3	22.6	33.9	45.2	56.5
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.75.** Cantidad de caolín y llenante mineral para cada probeta para chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Descripción	Porcentaje de caolín (%)					
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
Porcentaje de cemento Asfáltico óptimo (%)	5.94%	5.94%	5.94%	5.94%	5.94%	5.94%
Porcentaje de agregado (%)	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%	94.1%
Peso de cemento asfáltico óptimo (%)	71	71	71	71	71	71
Peso de grava (gr)	282.18	282.18	282.18	282.18	282.18	282.18
Peso de gravilla (gr)	338.62	338.62	338.62	338.62	338.62	338.62
Peso de arena (gr)	451.49	451.49	451.49	451.49	451.49	451.49
Peso de filler (gr)	56.44	45.15	33.86	22.57	11.29	0.00
Peso de caolín (gr)	0.00	11.29	22.57	33.86	45.15	56.44
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7 Desarrollo de los ensayos

#### 3.7.1 Resultados de las mezclas modificadas con caolín mediante el método Marshall para un cemento asfáltico 85-100

Una vez realizado los porcentajes de cantidad de caolín y los de filler q serán introducidos en la mezcla modificada, se procede a realizar las briquetas, se desarrollarán 18 briquetas jugando con el porcentaje de caolín y el filler introducido en cada briqueta.

**Tabla 3.76.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la chancadora Garzón (San Mateo)

MARSHALL																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	7.19	5.88	6.25	1300.1	1301.2	770	531.2	2.45	2.46	2.48	1.14	15.50	92.64	958	2561.4811	0.825	2113.2219	2112.52	13	14.000
2	7.11			1280.2	1281.2	761	520.2	2.46						945	2526.4747	0.838	2116.1752		15	
3	7.15			1289.3	1290.1	766	524.1	2.46						950	2539.9387	0.830	2108.1491		14	
4	7.08	5.88	6.25	1297.2	1302.5	778	524.5	2.47	2.461	2.48	0.96	15.34	93.76	958	2561.4811	0.843	2159.5847	2134.32	13	13.667
5	7.12			1297.1	1298.3	766	532.3	2.44						940	2513.0107	0.836	2100.1231		14	
6	7.18			1299.8	1300.8	775	525.8	2.47						970	2593.7947	0.826	2143.2526		14	
7	7.02	5.88	6.25	1300.2	1301.2	758	543.2	2.39	2.465	2.48	0.80	15.20	94.76	930	2486.0827	0.854	2124.1091	2150.31	13	13.333
8	6.89			1312.2	1313.4	755	500.0	2.62						900	2405.2987	0.879	2113.7765		13	
9	6.93			1305.2	1306.3	757	549.3	2.38						950	2539.9387	0.871	2213.0486		14	
10	7.00	5.88	6.25	1299.8	1300.8	775	525.8	2.47	2.468	2.48	0.67	15.09	95.56	930	2486.0827	0.858	2133.3076	2160.2	13	13.000
11	7.04			1297.1	1298.3	780	518.3	2.50						945	2526.4747	0.851	2149.272		13	
12	7.01			1298.2	1304.5	770	534.5	2.43						960	2566.8667	0.856	2198.008		13	
13	6.99	5.88	6.25	1298.3	1300.3	770	530.3	2.45	2.47	2.48	0.66	15.09	95.60	850	2270.6587	0.860	1952.7665	2150.95	13	12.333
14	6.83			1296.0	1298.1	760	538.1	2.41						980	2620.7227	0.890	2332.4432		12	
15	7.12			1279.0	1280.1	778	502.1	2.55						970	2593.7947	0.836	2167.6342		12	
16	7.17	5.88	6.25	1302.5	1305.1	775	530.1	2.46	2.47	2.48	0.68	15.10	95.50	950	2539.9387	0.828	2101.7993	2131.85	12	11.333
17	7.05			1305.8	1307.2	780	527.2	2.48						1000	2674.5787	0.849	2270.1824		11	
18	7.09			1301.3	1302.1	775	527.1	2.47						900	2405.2987	0.841	2023.5778		11	
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	75						1800	8	
				máximo						5	-	82						-	16	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.77.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la plata de SEDECA (Charaja)

N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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.MI.(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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	6.17	5.77	6.12	1170.0	1168.5	675	493.5	2.37	2.36	2.44	3.47	16.98	79.57	1450	3886.3387	1.049	4076.7693	4121.22	15	15.000
2	6.40			1181.4	1182.1	681	501.1	2.36						1540	4128.6907	0.988	4077.0821		16	
3	6.20			1165.1	1166.1	668	498.1	2.34						1510	4047.9067	1.040	4209.823		14	
4	6.32	5.77	6.12	1191.5	1192.1	694	498.1	2.39	2.398	2.44	1.76	15.50	88.67	1495	4007.5147	1.008	4039.5748	3938.69	15	15.333
5	6.31			1190.3	1192.0	696	496.0	2.40						1480	3967.1227	1.011	4010.7611		15	
6	6.31			1189.2	1190.3	695	495.3	2.40						1390	3724.7707	1.011	3765.7432		16	
7	6.21	5.77	6.12	1184.3	1185.4	698	487.4	2.43	2.414	2.44	1.08	14.92	92.76	1300	3482.4187	1.037	3611.2682	3797.42	16	16.333
8	6.14			1180.3	1181.2	695	500.0	2.36						1350	3617.0587	1.059	3830.4652		16	
9	6.16			1175.2	1176.3	697	479.3	2.45						1400	3751.6987	1.053	3950.5388		17	
10	6.09	5.77	6.12	1171.3	1171.8	681	490.8	2.39	2.409	2.44	1.31	15.12	91.36	1228	3288.5371	1.074	3531.8889	3575.11	17	17.000
11	6.20			1196.9	1197.3	706	491.3	2.44						1246	3337.0075	1.040	3470.4878		16	
12	6.21			1190.5	1191.4	696	495.4	2.40						1340	3590.1307	1.037	3722.9656		18	
13	6.59	5.77	6.12	1280.6	1281.2	753	528.2	2.42	2.38	2.44	2.43	16.08	84.91	1378	3692.4571	0.945	3489.372	3492.09	17	17.667
14	6.47			1240.1	1241.8	730	511.8	2.42						1302	3487.8043	0.970	3383.1702		18	
15	6.48			1235.0	1236.8	699	537.8	2.30						1390	3724.7707	0.968	3603.7157		18	
16	6.17	5.77	6.12	1180.3	1180.6	685	495.6	2.38	2.34	2.44	4.20	17.60	76.14	1252	3353.1643	1.049	3517.4694	3399.65	19	18.667
17	6.11			1169.3	1169.8	670	499.8	2.34						1246	3337.0075	1.068	3563.924		18	
18	6.14			1160.2	1161.0	655	506.0	2.29						1100	2943.8587	1.059	3117.5464		19	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	75						1800	8
				máximo									5	-	82					

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.78.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)

MARSHALL																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	6.28	5.87	6.24	1182.1	1183.5	673	510.5	2.32	2.32	2.47	5.95	19.50	69.50	920	2459.1547	1.019	2505.8787	2429.84	14	14.333
2	6.19			1180.1	1181.2	668	513.2	2.30						835	2230.2667	1.043	2326.1682		14	
3	6.29			1181.1	1182.1	680	502.1	2.35						905	2418.7627	1.016	2457.4629		15	
4	6.27	5.87	6.24	1184.6	1185.5	678	507.5	2.33	2.367	2.47	4.14	17.95	76.94	990	2647.6507	1.021	2703.2514	2647.51	14	14.000
5	6.23			1179.6	1180.7	684	496.7	2.37						975	2607.2587	1.032	2690.691		14	
6	6.48			1183.2	1184.6	690	494.6	2.39						985	2634.1867	0.968	2548.5757		14	
7	6.34	5.87	6.24	1174.8	1175.0	685	490.0	2.40	2.409	2.47	2.44	16.50	85.22	995	2661.1147	1.003	2669.0981	2717.37	13	13.333
8	6.12			1173.9	1174.8	686	488.8	2.40						998	2669.1931	1.065	2842.6907		13	
9	6.46			1170.1	1171.9	690	481.9	2.43						1015	2714.9707	0.973	2640.309		14	
10	6.18	5.87	6.24	1169.2	1170.8	691	479.8	2.44	2.429	2.47	1.61	15.79	89.79	1000	2674.5787	1.046	2797.6093	2801.62	12	12.667
11	6.16			1165.4	1166.8	685	481.8	2.42						1050	2809.2187	1.053	2958.1073		13	
12	6.19			1176.5	1177.6	694	483.6	2.43						950	2539.9387	1.043	2649.1561		13	
13	6.21	5.87	6.24	1183.5	1184.6	690	494.6	2.39	2.42	2.47	1.93	16.06	87.98	950	2539.9387	1.037	2633.9165	2799.41	12	12.333
14	6.21			1177.6	1178.8	695	483.8	2.43						1110	2970.7867	1.037	3080.7058		12	
15	6.26			1180.5	1182.2	698	484.2	2.44						980	2620.7227	1.024	2683.6201		13	
16	6.23	5.87	6.24	1165.2	1166.7	696	470.7	2.48	2.41	2.47	2.57	16.61	84.51	971	2596.4875	1.032	2679.5751	2705.15	11	11.333
17	6.25			1160.5	1161.8	676	485.8	2.39						992	2653.0363	1.027	2724.6683		12	
18	6.26			1163.1	1164.3	670	494.3	2.35						990	2647.6507	1.024	2711.1943		11	
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	75					1800		8	
				máximo						5	-	82						-		16

Fuente: Elaboración propia.

### **3.7.2 Resultados de las mezclas modificadas con caolín mediante el método**

#### **Marshall para un cemento asfáltico 60-70**

Para la sustitución del filler por el caolín, se realizó la misma en porcentajes de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%, en relación al peso de la llenante mineral que debe pasar necesariamente por el tamiz #200.

Para realizar esta parte del ensayo, al ser una investigación, es necesario realizar 3 briquetas con cada porcentaje de sustitución con caolín, teniendo un total de 18 briquetas de cada tipo de asfalto 85-100 y 70-60.

El tratamiento del agregado fue el mismo que el explicado anteriormente para la mezcla normal, ya que se dejó el material pétreo en un horno a temperatura de mezcla.

Para la colocación del asfalto, se sigue el mismo procedimiento que la mezcla original, con la excepción, que ahora todas las briquetas llevarán el mismo porcentaje de cemento asfáltico óptimo.

En cuanto a la mezcla para las briquetas, la porción de caolín se va agregada en el momento que se va pesando la llenante mineral, variando el porcentaje del filler al introducir el porcentaje de caolín.

Una vez realizado los porcentajes de caolín y los de filler q serán introducidos en la mezcla se procede a realizar las briquetas modificadas con caolín, se desarrollarán 18 briquetas variando el porcentaje de caolín introducido en cada briqueta

El procedimiento será el mismo q para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se ira jugando con el porcentaje de filler y el porcentaje de caolín, reduciendo el porcentaje de filler y aumenta el caolín.

**Tabla 3.79.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la chancadora Garzón (San Mateo)

MARSHALL																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	6.71			1277.0	1278.0	746	532.0	2.40					1260	3374.7067	0.920	3104.7302		13		
2	6.17	5.87	6.24	1220.1	1221.1	680	541.1	2.25	2.36	2.49	5.09	18.81	72.94	1073	2871.1531	1.049	3011.8396	2919.24	14	13.333
3	6.40			1275.1	1276.1	750	526.1	2.42						1000	2674.5787	0.988	2641.1465		13	
4	6.25			1170.1	1170.4	685	485.4	2.41						1090	2916.9307	1.027	2995.6878		13	
5	6.20	5.87	6.24	1179.6	1179.9	688	491.9	2.40	2.385	2.49	4.06	17.93	77.35	1100	2943.8587	1.040	3061.6131	2980.79	13	12.667
6	6.25			1179.6	1180.6	678	502.6	2.35						1050	2809.2187	1.027	2885.0676		12	
7	6.21			1170.3	1170.5	686	484.5	2.42						1095	2930.3947	1.037	3038.8193		12	
8	6.36	5.87	6.24	1190.9	1191.8	693	500.0	2.38	2.395	2.49	3.68	17.60	79.11	1100	2943.8587	0.998	2936.4991	3020.15	13	12.667
9	6.31			1190.9	1191.9	693	498.9	2.39						1140	3051.5707	1.011	3085.138		13	
10	6.18			1183.0	1183.8	690	493.8	2.40						1040	2782.2907	1.046	2910.2761		12	
11	6.22	5.87	6.24	1167.3	1167.8	680	487.8	2.39	2.400	2.49	3.45	17.40	80.19	1050	2809.2187	1.035	2907.5414	3047.01	12	12.000
12	6.19			1167.3	1168.8	685	483.8	2.41						1190	3186.2107	1.043	3323.2178		12	
13	6.17			1147.2	1147.7	668	479.7	2.39						1008	2696.1211	1.049	2828.2311		12	
14	6.22	5.87	6.24	1185.8	1186.0	691	495.0	2.40	2.40	2.49	3.58	17.52	79.55	1160	3105.4267	1.035	3214.1167	3031.71	12	12.000
15	6.21			1145.2	1146.3	670	476.3	2.40						1100	2943.8587	1.037	3052.7815		12	
16	6.19			1178.0	1178.7	689	489.7	2.41						1050	2809.2187	1.043	2930.0151		12	
17	6.15	5.87	6.24	1175.7	1176.4	684	492.4	2.39	2.39	2.49	4.00	17.88	77.63	1130	3024.6427	1.056	3194.0227	3006.74	11	11.667
18	6.18			1175.7	1176.7	680	496.7	2.37						1035	2768.8267	1.046	2896.1927		12	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	75					1800	8	
				máximo							5	-	82					-	16	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.80.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la plata de SEDECA (Charaja)

MARSHALL																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	6.51	5.90	6.27	1187.0	1188.5	682	506.5	2.34	2.33	2.44	4.42	18.03	75.47	1580	4236.4027	0.960	4066.9466	4027.21	14	14.333
2	6.50			1177.2	1178.5	670	508.5	2.32						1500	4020.9787	0.963	3870.192		14	
3	6.51			1184.1	1185.5	677	508.5	2.33						1610	4317.1867	0.960	4144.4993		15	
4	6.36	5.90	6.27	1189.2	1191.5	685	506.5	2.35	2.344	2.44	3.81	17.51	78.23	1450	3886.3387	0.998	3876.6229	3924.54	14	14.667
5	6.53			1185.2	1186.5	678	508.5	2.33						1500	4020.9787	0.956	3845.2619		15	
6	6.45			1187.2	1188.5	684	504.5	2.35						1550	4155.6187	0.975	4051.7283		15	
7	6.45	5.90	6.27	1179.6	1181.0	676	505.0	2.34	2.357	2.44	3.28	17.05	80.78	1450	3886.3387	0.975	3789.1803	3780.03	15	15.333
8	6.44			1180.4	1181.3	675	500.0	2.36						1500	4020.9787	0.978	3930.5067		16	
9	6.49			1185.0	1186.1	687	499.1	2.37						1400	3751.6987	0.965	3620.3893		15	
10	6.47	5.90	6.27	1189.4	1190.2	690	500.2	2.38	2.362	2.44	3.06	16.87	81.84	1380	3697.8427	0.970	3586.9074	3586.44	17	16.000
11	6.47			1191.1	1191.9	687	504.9	2.36						1400	3751.6987	0.970	3639.1478		15	
12	6.50			1190.1	1191.5	685	506.5	2.35						1370	3670.9147	0.963	3533.2554		16	
13	6.30	5.90	6.27	1194.3	1194.3	691	503.3	2.37	2.36	2.44	3.20	16.99	81.14	1310	3509.3467	1.013	3554.9682	3431.46	17	16.667
14	6.27			1172.1	1172.3	677	495.3	2.37						1280	3428.5627	1.021	3500.5625		16	
15	6.32			1170.3	1171.8	671	500.8	2.34						1200	3213.1387	1.008	3238.8438		17	
16	6.37	5.90	6.27	1193.1	1194.5	690	504.5	2.36	2.34	2.44	3.78	17.48	78.39	1120	2997.7147	0.995	2982.7261	3038.72	18	17.667
17	6.27			1191.8	1192.1	687	505.1	2.36						1100	2943.8587	1.021	3005.6798		17	
18	6.29			1179.2	1180.5	670	510.5	2.31						1150	3078.4987	1.016	3127.7547		18	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	75					1800	8	
				máximo									5	-	82					-

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.81.** Resultado del método Marshall con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica con agregados de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)

MARSHALL																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briquetas			Volumen	Densidad Briquetas			% 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
		%	%	g	g	g	cc	g/cm3	g/cm3	g/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulgada
1	6.28	5.94	6.32	1177.9	1178.9	682	496.9	2.37	2.33	2.47	5.53	19.24	71.26	915	2445.6907	1.019	2492.1588	2456.43	14	14.333
2	6.31			1162.4	1164.5	660	504.5	2.30						900	2405.2987	1.011	2431.757		14	
3	6.31			1160.1	1162.0	662	500.0	2.32						905	2418.7627	1.011	2445.3691		15	
4	6.37	5.94	6.32	1189.1	1190.3	685	505.3	2.35	2.350	2.47	4.80	18.62	74.21	920	2459.1547	0.995	2446.8589	2459.09	15	14.667
5	6.26			1188.9	1189.6	684	505.6	2.35						915	2445.6907	1.024	2504.3873		15	
6	6.34			1184.1	1185.2	680	505.2	2.34						905	2418.7627	1.003	2426.019		14	
7	6.35	5.94	6.32	1180.5	1181.6	682	499.6	2.36	2.358	2.47	4.45	18.32	75.69	865	2311.0507	1.000	2311.0507	2461.21	15	15.000
8	6.27			1172.0	1173.5	676	497.5	2.36						943	2521.0891	1.021	2574.032		14	
9	6.39			1172.0	1173.5	676	497.5	2.36						944	2523.7819	0.990	2498.5441		16	
10	6.31	5.94	6.32	1179.9	1180.9	682	498.9	2.37	2.361	2.47	4.35	18.23	76.15	910	2432.2267	1.011	2458.9812	2459.4	15	15.667
11	6.19			1178.4	1179.0	680	499.0	2.36						895	2391.8347	1.043	2494.6836		16	
12	6.32			1180.2	1182.0	681	501.0	2.36						900	2405.2987	1.008	2424.5411		16	
13	6.33	5.94	6.32	1181.3	1182.6	681	501.6	2.36	2.36	2.47	4.38	18.26	76.02	920	2459.1547	1.005	2471.4505	2454.41	17	16.333
14	6.37			1192.1	1192.8	688	504.8	2.36						922	2464.5403	0.995	2452.2176		16	
15	6.36			1183.1	1184.6	684	500.6	2.36						915	2445.6907	0.998	2439.5765		16	
16	6.25	5.94	6.32	1169.5	1170.0	677	493.0	2.37	2.36	2.47	4.56	18.41	75.24	906	2421.4555	1.027	2486.8348	2445.85	18	17.333
17	6.21			1170.6	1171.1	678	493.1	2.37						858	2292.2011	1.037	2377.0126		17	
18	6.18			1162.1	1163.8	663	500.8	2.32						885	2364.9067	1.046	2473.6924		17	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	75					1800	8	
				máximo									5	-	82					-

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8 Resumen de los resultados obtenidos del método Marshall para mezclas asfáltica modificada con caolín, con cemento asfáltico 85-100

Los valores presentados en las tablas son los promedios de los ensayos realizados.

Al analizar los datos obtenidos se determinará el porcentaje óptimo del Caolín para cada ensayo, se hará un ensayo para cada banco del agregado mineral.

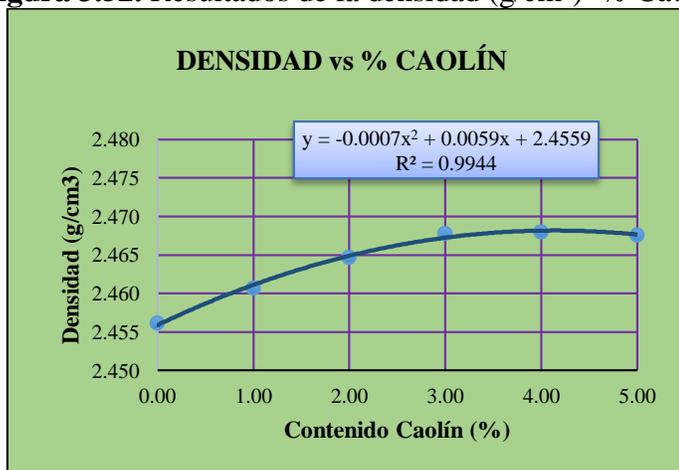
Chancadora Garzón (San Mateo), agregado de procedencia de la planta de SEDECA (charaja) y chancadora Santa Ana (Santa Ana).

**Tabla 3.82.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la chancadora Garzón (San Mateo)

Resumen de datos							
Contenido de caolín (%)	Contenido óptimo c.a. (%)	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulgada)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.00	5.88	2.456	2112.52	14.00	1.14	92.64	15.50
1.00	5.88	2.461	2134.32	13.67	0.96	93.76	15.34
2.00	5.88	2.465	2150.31	13.33	0.80	94.76	15.20
3.00	5.88	2.468	2160.20	13.00	0.67	95.56	15.09
4.00	5.88	2.468	2150.95	12.33	0.66	95.60	15.09
5.00	5.88	2.468	2131.85	11.33	0.68	95.50	15.10

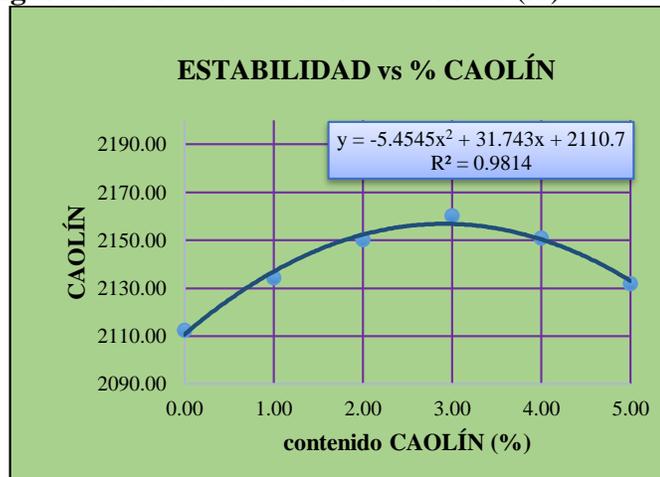
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.52.** Resultados de la densidad (g/cm<sup>3</sup>) -% Caolín



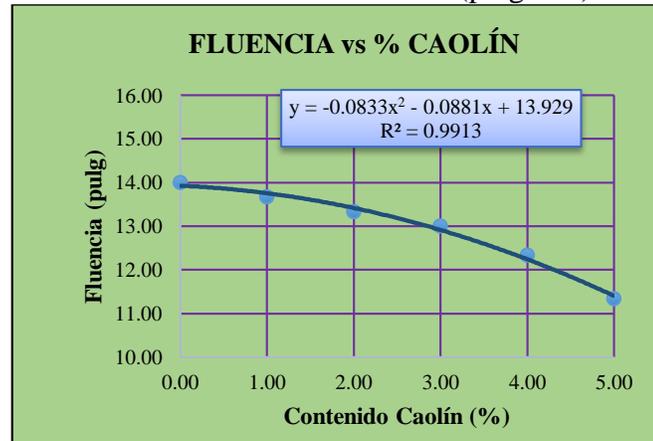
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.53.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



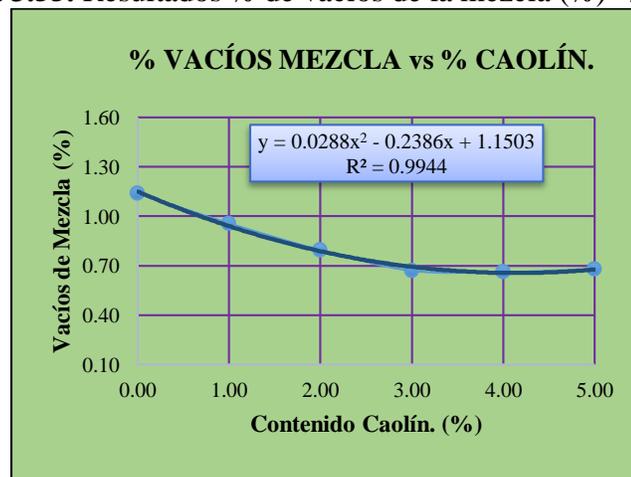
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.54.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



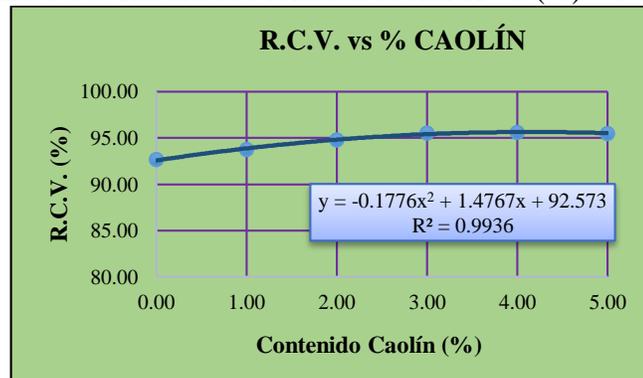
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.55.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



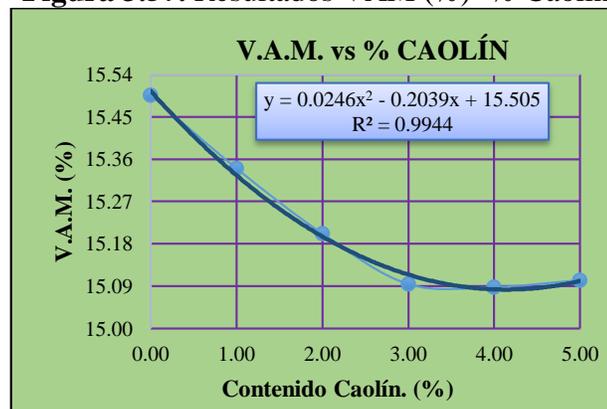
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.56.** Resultados relación caolín RVC (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.57.** Resultados VAM (%) -% Caolín



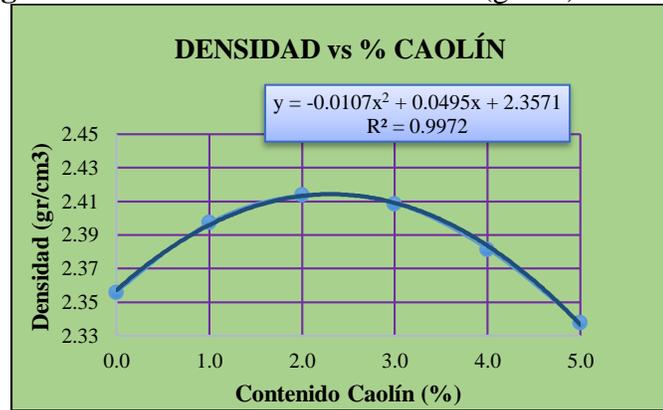
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.83.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la planta de SEDECA (Charaja)

Resumen de datos							
Contenido de caolín (%)	Contenido óptimo de c.a. (%)	Densidad promedio (g/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.0	5.77	2.36	4121.22	15.00	3.47	79.57	16.98
1.0	5.77	2.40	3938.69	15.33	1.76	88.67	15.50
2.0	5.77	2.41	3797.42	16.33	1.08	92.76	14.92
3.0	5.77	2.41	3575.11	17.00	1.31	91.36	15.12
4.0	5.77	2.38	3492.09	17.67	2.43	84.91	16.08
5.0	5.77	2.34	3399.65	18.67	4.20	76.14	17.60

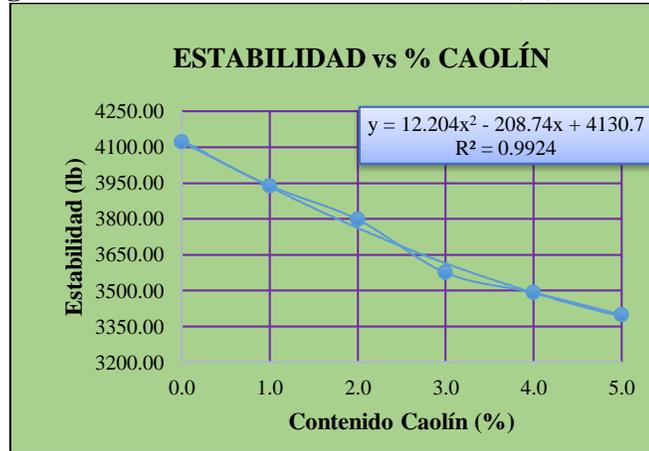
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.58.** Resultados de la densidad (g/cm<sup>3</sup>) -% Caolín



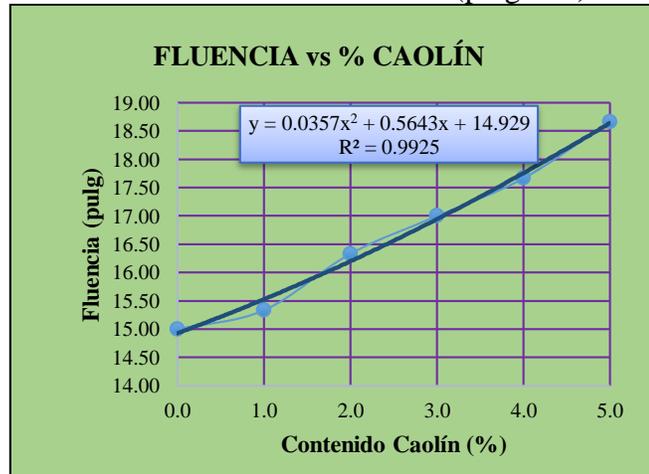
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.59.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



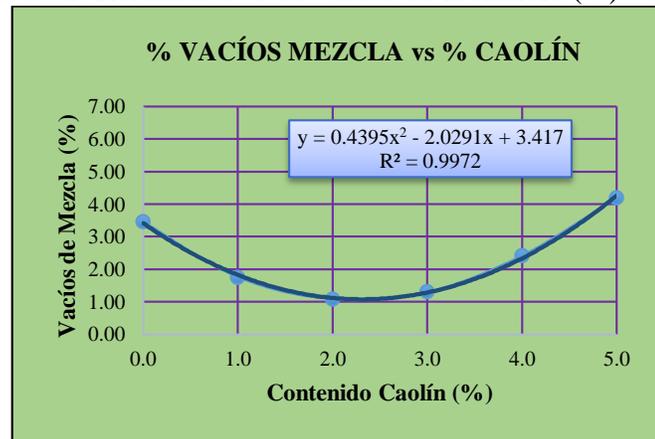
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.60.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



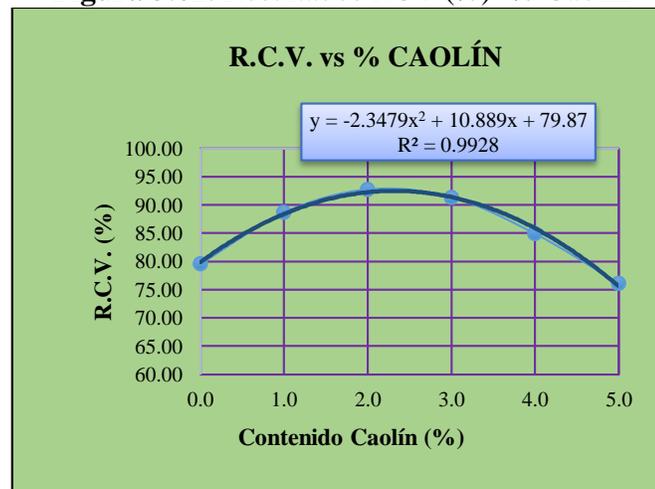
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.61.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



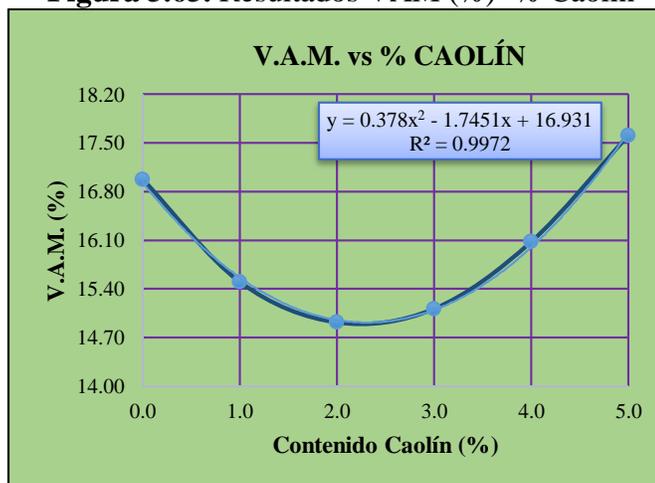
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.62.** Resultados RCV (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.63.** Resultados VAM (%) -% Caolín



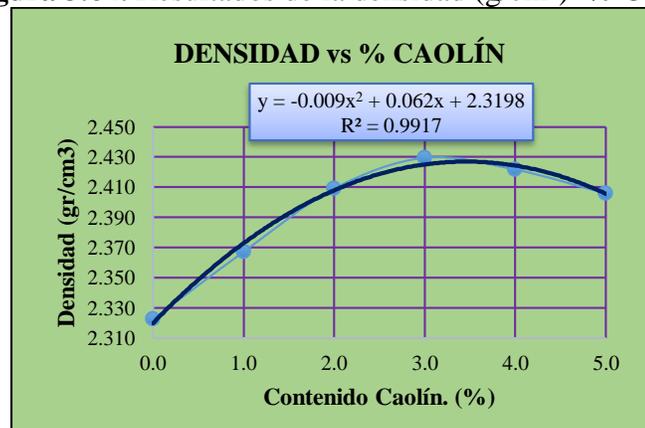
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.84.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Resumen de datos							
Contenido caolín (%)	Contenido óptimo de c.a. (%)	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.0	5.87	2.322	2429.84	14.33	5.95	69.50	19.50
1.0	5.87	2.367	2647.51	14.00	4.14	76.94	17.95
2.0	5.87	2.409	2717.37	13.33	2.44	85.22	16.50
3.0	5.87	2.429	2801.62	12.67	1.61	89.79	15.79
4.0	5.87	2.422	2799.41	12.33	1.93	87.98	16.06
5.0	5.87	2.406	2705.15	11.33	2.57	84.51	16.61

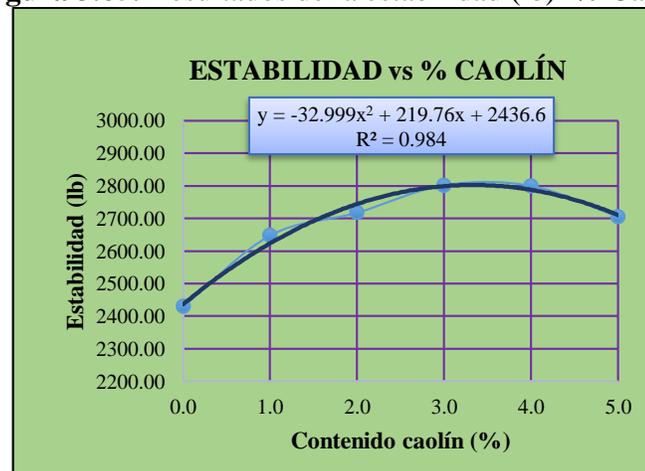
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.64.** Resultados de la densidad (g/cm<sup>3</sup>) -% Caolín



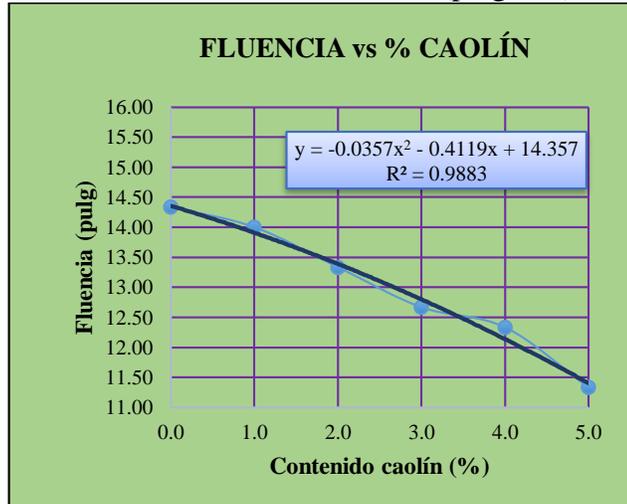
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.65.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



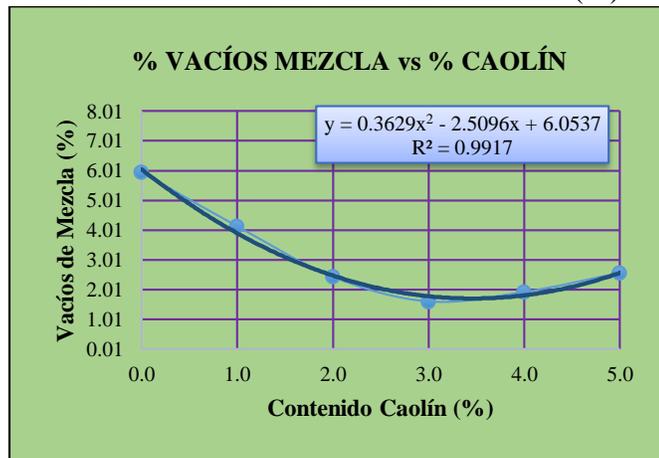
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.66.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



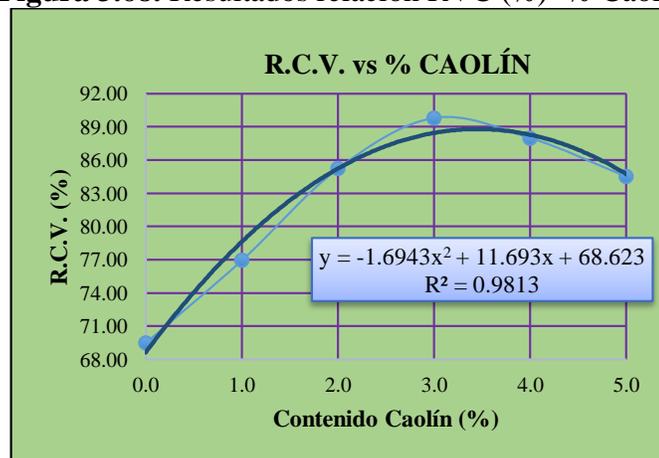
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.67.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



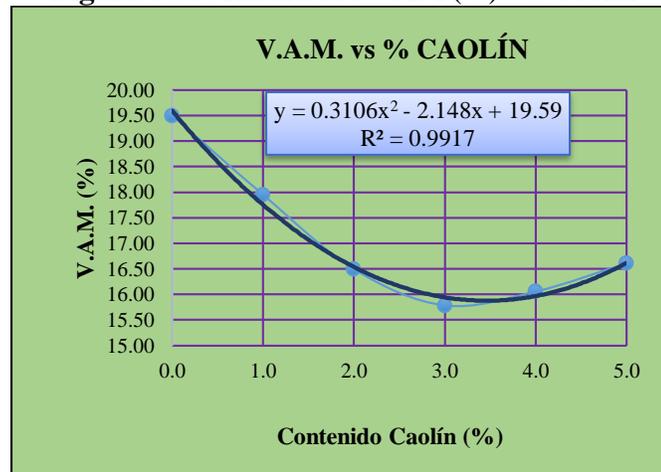
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.68.** Resultados relación RVC (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.69.** Resultados VAM (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

### 3.9 Resumen de los resultados obtenidos del método Marshall para mezclas asfáltica modificada con caolín, con cemento asfáltico 60-70

Los valores presentados en las tablas son los promedios de los ensayos realizados.

Al analizar los datos obtenidos se determinará el porcentaje óptimo del Caolín para cada ensayo, se hará un ensayo para cada banco del agregado mineral.

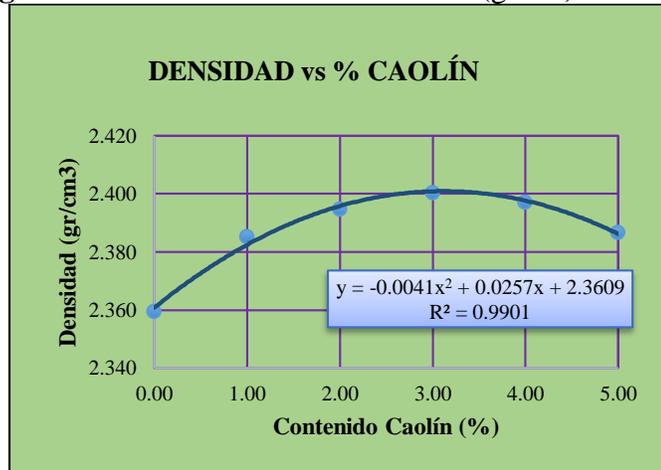
Chancadora Garzón (San Mateo), agregado de procedencia de la planta de SEDECA (charaja) y chancadora Santa Ana (Santa Ana).

**Tabla 3.85.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la chancadora Garzón (San Mateo)

Resumen de datos							
Contenido de caolín (%)	Contenido óptimo del c.a. (%)	Densidad promedio (g/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.00	5.87	2.360	2919.24	13.33	5.09	72.94	18.81
1.00	5.87	2.385	2980.79	12.67	4.06	77.35	17.93
2.00	5.87	2.395	3020.15	12.67	3.68	79.11	17.60
3.00	5.87	2.400	3047.01	12.00	3.45	80.19	17.40
4.00	5.87	2.397	3031.71	12.00	3.58	79.55	17.52
5.00	5.87	2.387	3006.74	11.67	4.00	77.63	17.88

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.70.** Resultados de la densidad (g/cm<sup>3</sup>) -% Caolín



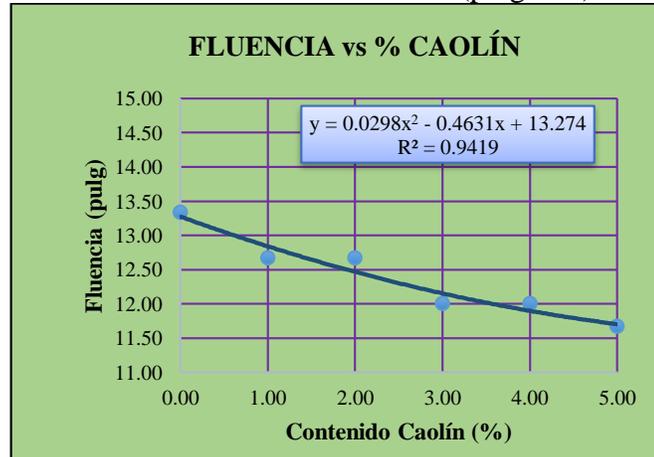
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.71.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



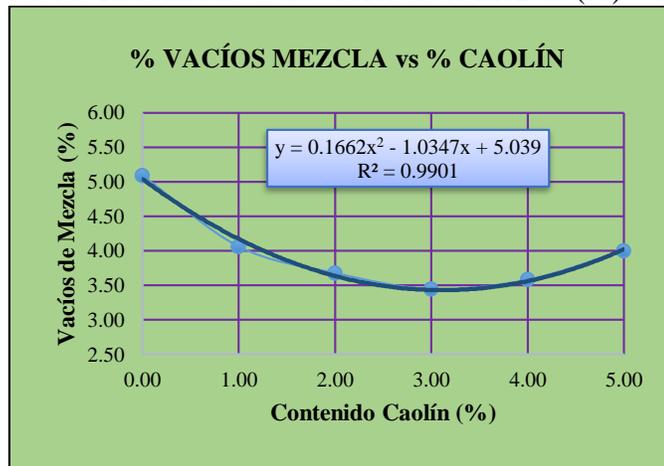
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.72.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



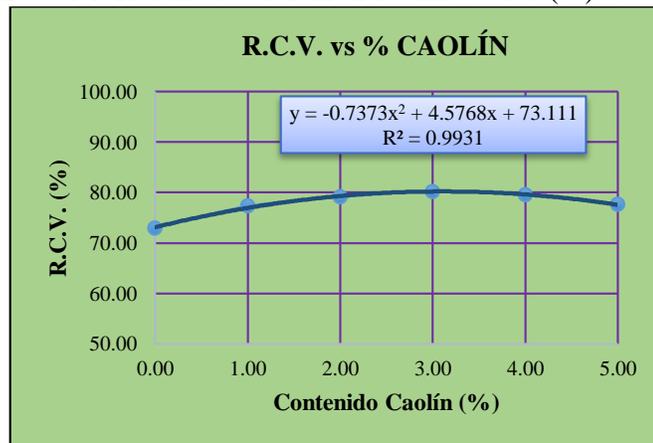
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.73.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



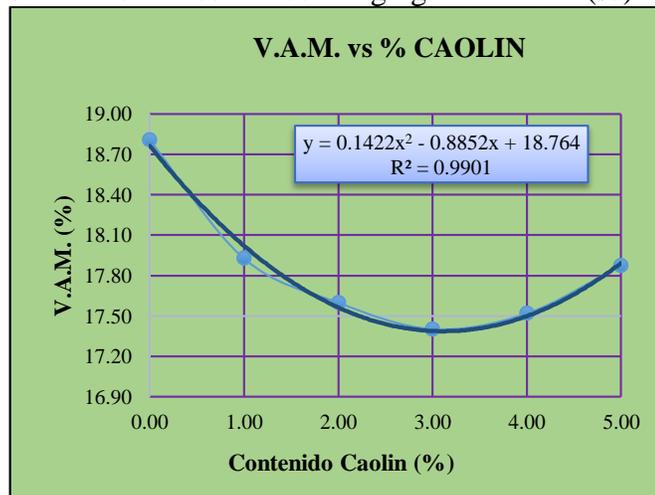
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.74.** Resultados relación caolín vacíos (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.75.** Resultados vacíos de agregado mineral (%) -% Caolín



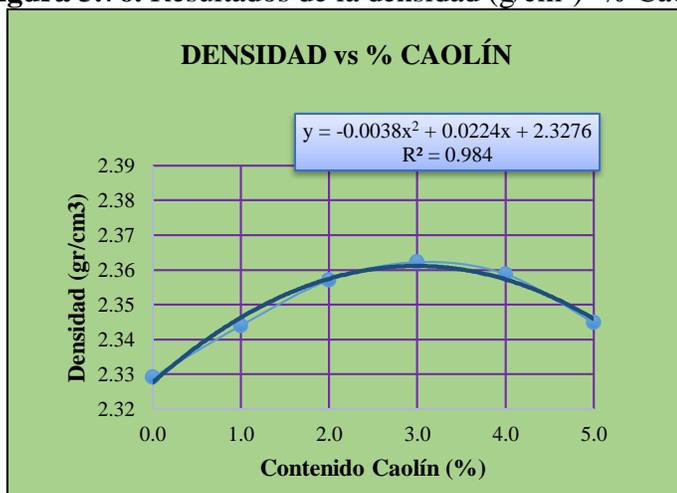
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.86.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la planta de SEDECA (Charaja)

Resumen de datos							
Contenido de caolín (%)	Contenido óptimo de c.a (%)	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.0	5.9	2.33	4027.21	14.33	4.42	75.47	18.03
1.0	5.9	2.34	3924.54	14.67	3.81	78.23	17.51
2.0	5.9	2.36	3780.03	15.33	3.28	80.78	17.05
3.0	5.9	2.36	3586.44	16.00	3.06	81.84	16.87
4.0	5.9	2.36	3431.46	16.67	3.20	81.14	16.99
5.0	5.9	2.34	3038.72	17.67	3.78	78.39	17.48

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.76.** Resultados de la densidad (g/cm<sup>3</sup>) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.77.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



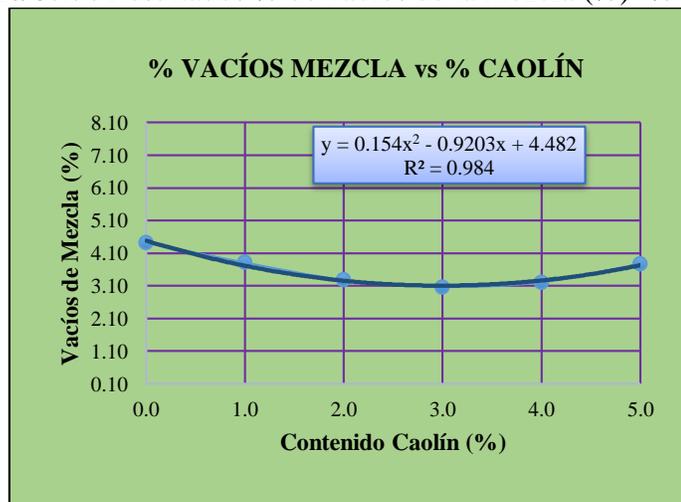
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.78.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



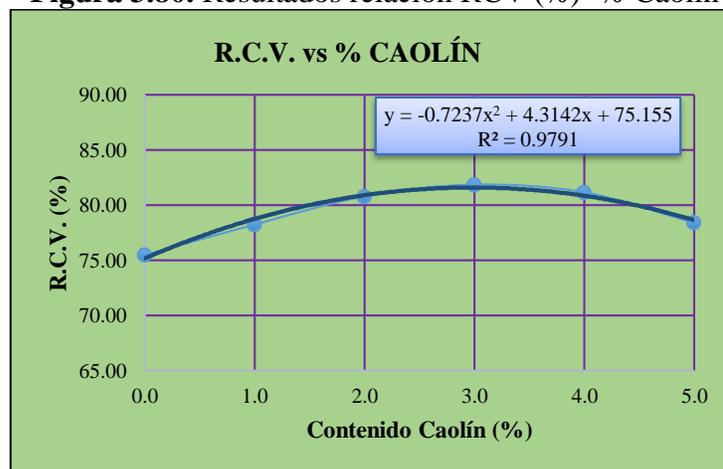
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.79.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



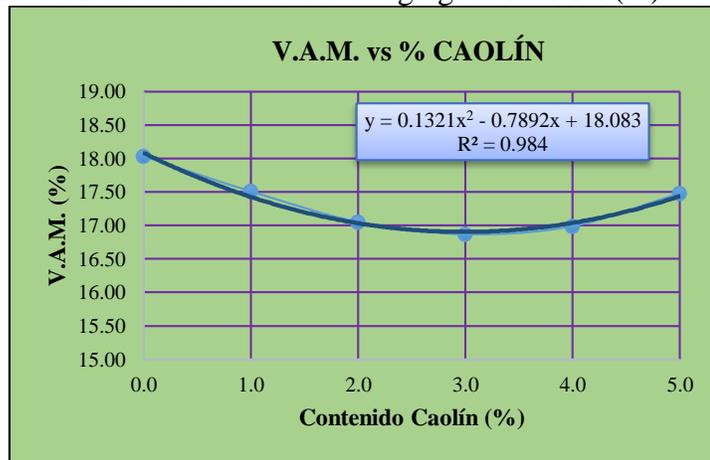
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.80.** Resultados relación RCV (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.81.** Resultados vacíos de agregado mineral (%) -% Caolín



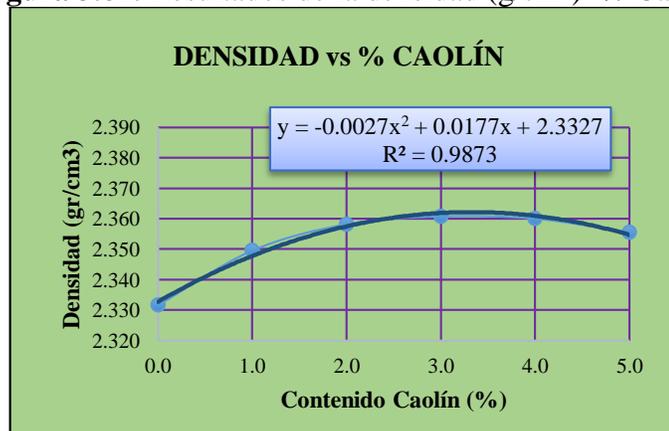
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.87.** Resultados obtenidos del método Marshall utilizando agregados de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Resumen de datos							
Contenido de caolín (%)	Contenido óptimo de c.a (%)	Densidad promedio (g/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.c.v. (relación caolín vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.0	5.94	2.332	2456.43	14.33	5.53	71.26	19.24
1.0	5.94	2.350	2459.09	14.67	4.80	74.21	18.62
2.0	5.94	2.358	2461.21	15.00	4.45	75.69	18.32
3.0	5.94	2.361	2459.40	15.67	4.35	76.15	18.23
4.0	5.94	2.360	2454.41	16.33	4.38	76.02	18.26
5.0	5.94	2.356	2445.85	17.33	4.56	75.24	18.41

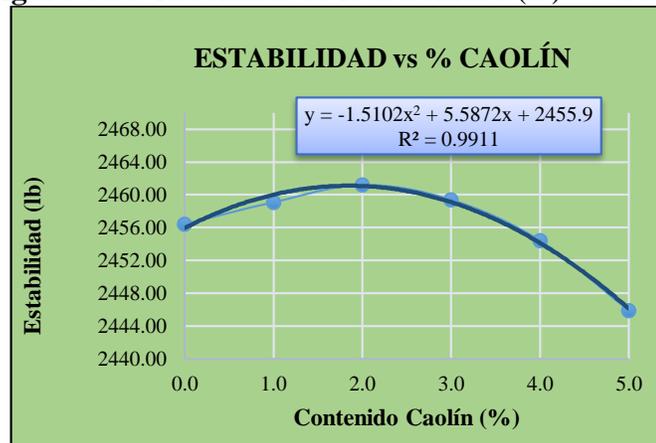
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.82.** Resultados de la densidad (g/cm³) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.83.** Resultados de la estabilidad (lb) -% Caolín



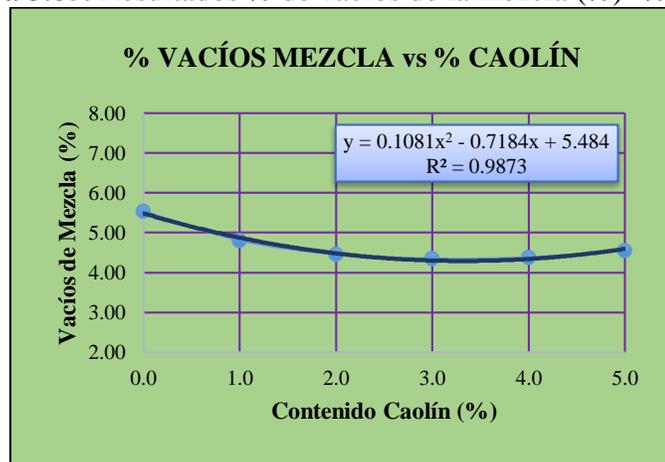
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.84.** Resultados de la Fluencia (pulgadas) -% Caolín



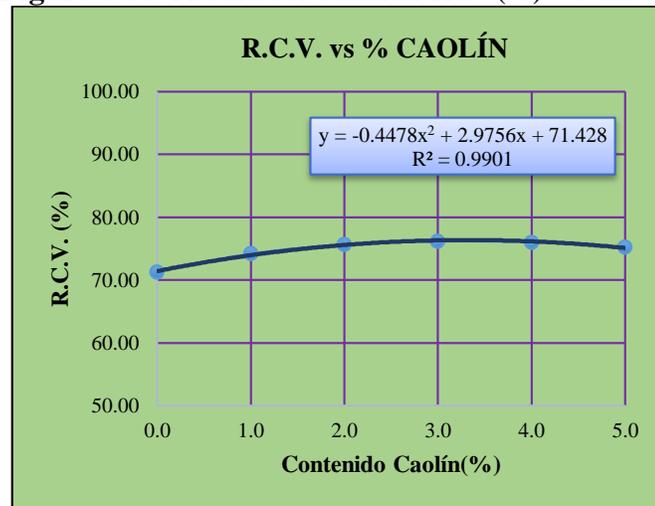
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.85.** Resultados % de vacíos de la mezcla (%) -% Caolín



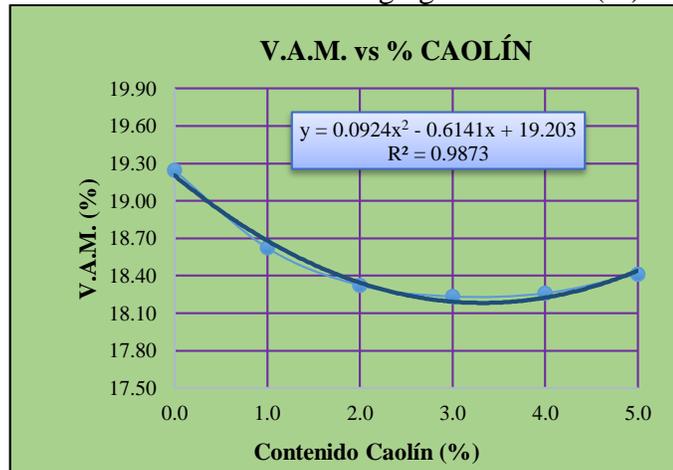
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.86.** Resultados relación RCV(%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.87.** Resultados vacíos de agregado mineral (%) -% Caolín



Fuente: Elaboración propia.

### **3.10 Obtención del porcentaje óptimo de caolín en una mezcla asfáltica modificada, con un óptimo de cemento asfáltico 85-100**

En función de las ecuaciones obtenidas de las gráficas del ensayo Marshall, se aplicará el método de Máximos y Mínimos de una Vértice, descritas anteriormente se pudo obtener el porcentaje óptimo de Caolín y así obtener la estabilidad y fluencia máxima como también la densidad máxima y % de vacíos de la mezcla.

**Tabla 3.88.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada para chancadora Garzón (San Mateo)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de Caolín
<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	2156.88	2.91
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.47	4.21
	Vacíos de la mezcla mín (%)	2.50	4.10
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>3.74</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.89.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada con agregado procedente de SEDECA (Charaja)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de Caolín
<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	4121.22	0.00
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.41	2.31
	Vacíos de la mezcla mín (%)	1.07	2.31
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>2.31</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.90.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada para chancadora Santa Ana (Santa Ana)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de Caolín
<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	2802.48	3.33
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.43	3.44
	Vacíos de la mezcla mín (%)	1.72	3.46
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>3.41</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.11 Obtención del porcentaje óptimo de caolín en una mezcla asfáltica modificada, con un óptimo de cemento asfáltico 60-70

En función de las ecuaciones obtenidas de las gráficas del ensayo Marshall, se aplicará el método de Máximos y Mínimos de una Vértice, descritas anteriormente se pudo obtener el porcentaje óptimo de Caolín y así obtener la estabilidad y fluencia máxima como también la densidad máxima y % de vacíos de la mezcla.

**Tabla 3.91.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada para chancadora Garzón (San Mateo)

<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de Caolín</b>
	Estabilidad Marshall (Lb)	3041.55	3.26
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.40	3.13
	Vacíos de la mezcla mín (%)	3.43	3.11
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>3.17</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.92.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada con agregado procedente de SEDECA (Charaja)

<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de Caolín</b>
	Estabilidad Marshall (Lb)	4044.29	0.00
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.95
	Vacíos de la mezcla mín (%)	3.07	3.07
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>2.01</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.93.** Porcentaje óptimo del Caolín en la mezcla asfáltica modificada para chancadora Santa Ana (Santa Ana)

<b>Determinación del porcentaje óptimo de caolín</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de Caolín</b>
	Estabilidad Marshall (Lb)	2461.07	1.85
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	3.28
	Vacíos de la mezcla mín (%)	4.29	3.32
	<b>% Porcentaje óptimo de Caolín</b>	<b>Promedio =</b>	<b>2.82</b>

Fuente: Elaboración propia.

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de resultados obtenidos

Una vez que se obtienen los resultados de los ensayos realizados para la investigación los cuales son:

Ensayo de Marshall, que evaluará la estabilidad y fluencia, densidad y porcentajes de vacíos de la mezcla. Se elaborarán mezcla asfáltica modificada con caolín (llenante mineral), para determinar el porcentaje óptimo del caolín se utilizaron las ecuaciones de las gráficas obtenidas por el ensayo MARSHALL y aplicando máximos mínimos de un vértice se obtendrán los resultados mecánicos de la mezcla asfáltica modificada y así poder determinar el óptimo de caolín.

Para la aplicación de los ensayos se utilizaron dos tipos de cemento asfálticos que son el Betupen Plus C.A. 85-100 y el Betupen S C.A. 60-70, también se utilizarán tres tipos de agregados procedentes de distintas chancadoras que son chancadora Garzón (San Mateo), material proveniente de la planta de SEDECA (Charaja) y chancadora Santa Ana (Santa Ana). Para así comparar la variación que existe entre el tipo de cemento asfáltico y del tipo de procedencias del agregado mineral.

##### 4.1.1 Ensayo de Marshall

Para el método Marshall se elaboraron tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas que es la determinación de la gravedad específica, Prueba de estabilidad y flujo y análisis de densidad y vacíos

Estas pruebas se realizan siguiendo las especificaciones de la norma de acuerdo con la norma de la ABC, los ensayos se desarrollaron jugando con los porcentajes de caolín y filler para cada briqueta elaborada y así poder determinar el porcentaje óptimo de caolín y también conocer las características volumétricas y mecánicas de cada briqueta

y poder comparar con los resultados obtenidos de mezcla asfálticas convencional y mezclas asfálticas modificada.

#### **4.1.2 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica**

Del capítulo III se tiene los resultados de las características físicas mecánicas mediante la metodología de método Marshall para las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificados con Caolín con un porcentaje de (1%, 2%, 3%, 4% y 5%) de Caolín.

Para obtener los valores representativos mediante el método Marshall (densidad y porcentajes de vacíos, estabilidad y fluencia), se realizó un tratamiento estadístico no probabilístico de las diferentes procedencias de agregados minerales y de los distintos tipos de cementos asfáltico utilizados para cada ensayo.

##### **4.1.2.1 Análisis comparativo del efecto de la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica, mediante el ensayo MARSHALL, entre una mezclas convencional y modificada para un cemento asfálticos C.A. 85-10**

En el capítulo tres se presentan los resultados del ensayo Marshall, referentes a la Estabilidad y Fluencia, densidad y porcentajes de vacíos de mezclas asfálticas convencional como así la mezcla modificada.

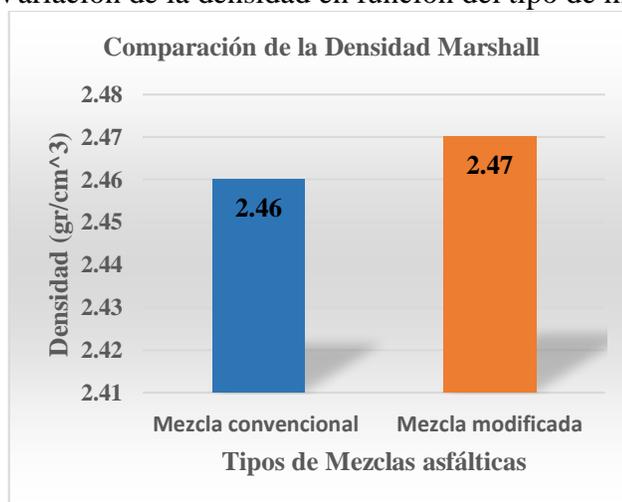
La mezcla modificada con la incorporación de Caolín como llenante mineral, se puede evidenciar en los resultados que en dichos parámetros poseen mejor respuesta, así también en otros casos no presenta mejoras las mezclas asfálticas ante la presencia de Caolín, hay resultados que no cumplen con las especificaciones de la norma.

**Tabla 4.1.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos por el método Marshall para agregados pétreos de chancadora Garzón (San Mateo)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedades de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef. varianza (%)	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual (%)
					Estándar				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.46	2.47	2.47	0.01	0.29	0.005	0.002	0.20
	Mezcla modificada	2.47					0.005	0.002	0.20
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	2111.88	2134.38	2134.38	31.82	1.49	22.500	0.011	1.05
	Mezcla modificada	2156.88					22.500	0.011	1.05
Fluencia (pulgadas)	Mezcla convencional	14.00	13.38	13.38	0.88	6.61	0.625	0.047	4.67
	Mezcla modificada	12.75					0.625	0.047	4.67
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	4.38	3.44	3.44	1.33	38.64	0.940	0.273	27.33
	Mezcla modificada	2.50					0.940	0.273	27.33

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.1.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica

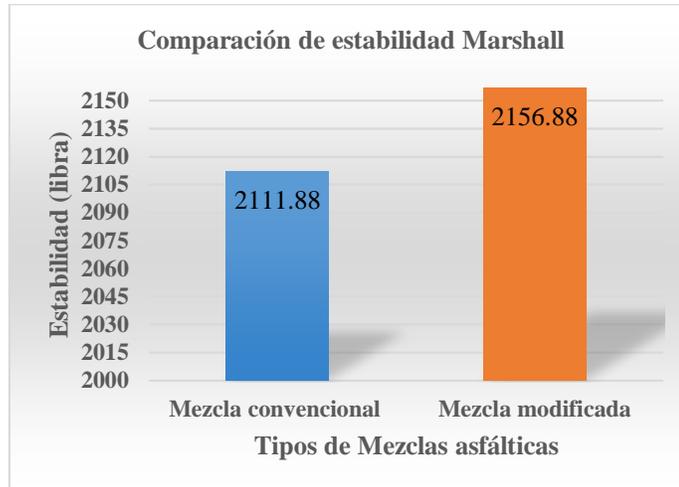


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.1 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 3.74 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.47 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 0.41 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.46 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento mínimo de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla

convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

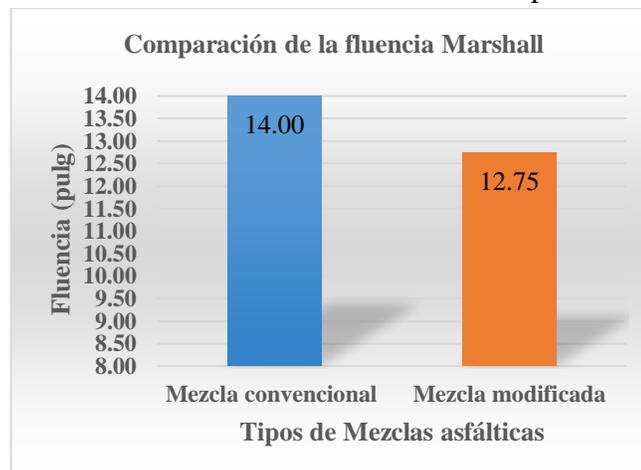
**Figura 4.2.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propi

En la figura 4.2 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 3.74 % de caolín incorporado como llenante mineral, valores numéricos de estabilidad de 2111.88 (libra) para una mezcla convencional y 2156.88 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay un incremento de resistencia a la deformación de 2.13% en comparación con la mezcla convencional. Lo cual es satisfactorio a lo esperado y cumple con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

**Figura 4.3.** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica

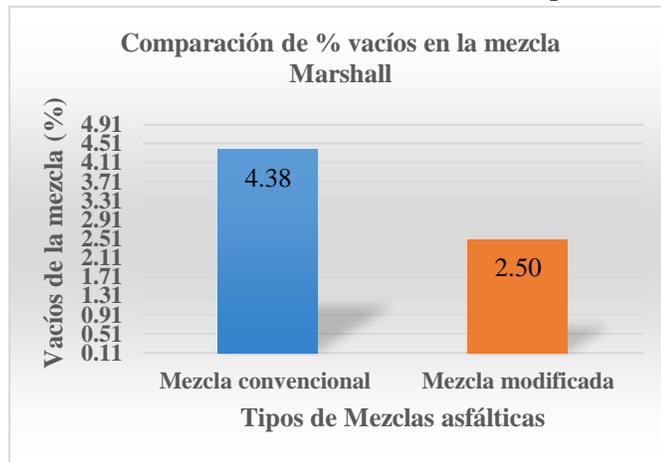


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.3 podemos observar los valores numéricos de fluencia de 14 (pulgadas) de una mezcla convencional y 12.75 (pulgadas) para una mezcla modificada con 3.74 % de caolín incorporado como llenante mineral, en lo cual existió una des varianza de 8.61 % en relación con la mezcla convencional, aunque su Fluencia bajo sigue cumpliendo los parámetros permisibles que es de 8-14 para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

Por otra parte, altos valores de fluencia tienden a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito, por este sentido la fluencia obtenida es la que esperábamos.

**Figura 4.4.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

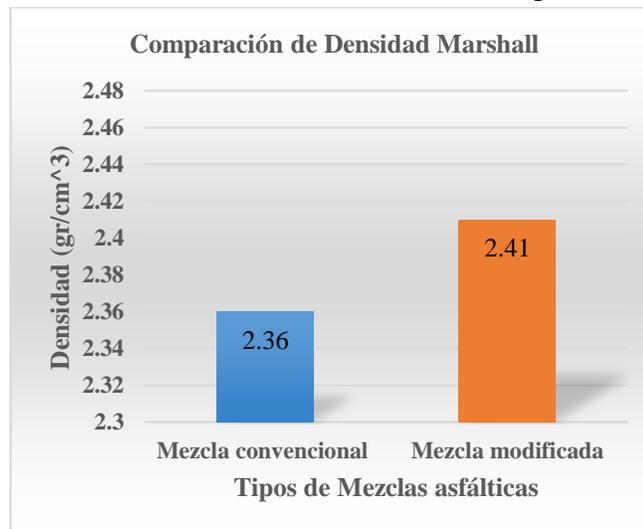
En la figura 4.4 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 4.38% y de 2.5% de una mezcla modificada con 3.74 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos disminuyó en un 75% en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían fuera del rango permisible establecido por el método Marshall

**Tabla 4.2.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos por el método Marshall para agregados pétreos de planta de SEDECA (Charaja)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedades de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef. varianza (%)	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual (%)
					estándar				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.36	2.39	2.39	0.04	1.48	0.02	0.010	1.05
	Mezcla modificada	2.41					0.03	0.010	1.05
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	4182.71	4151.97	4151.97	43.48	1.05	30.74	0.007	0.74
	Mezcla modificada	4121.22					30.74	0.007	0.74
Fluencia (pulg)	Mezcla convencional	15.00	15.90	15.90	1.27	8.00	0.90	0.057	5.66
	Mezcla modificada	16.80					0.90	0.057	5.66
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	2.97	2.02	2.02	1.34	66.51	0.95	0.470	47.03
	Mezcla modificada	1.07					0.95	0.470	47.03

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.5.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica

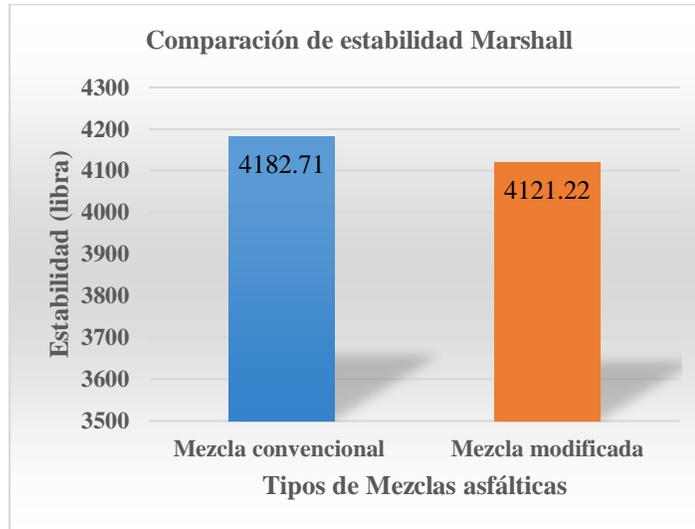


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.5 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 2.31 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.41 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 2.12 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.36 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla

convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

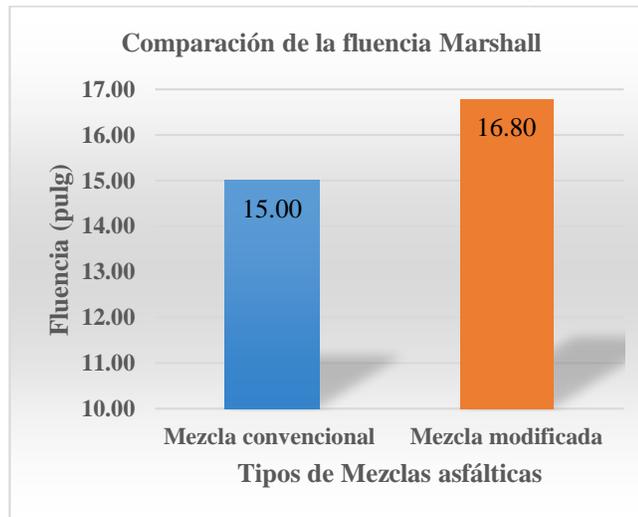
**Figura 4.6.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.6 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 2.31 % de caolín incorporado como llenante mineral, el valor numérico obtenido de estabilidad es de 4182.71 (libra) para una mezcla convencional y 4121.22 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay una disminución mínima de resistencia a la deformación de 1.5 % en comparación con la mezcla convencional. Lo cual no es satisfactorio a lo esperado, pero cumple con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

**Figura 4.7.** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica

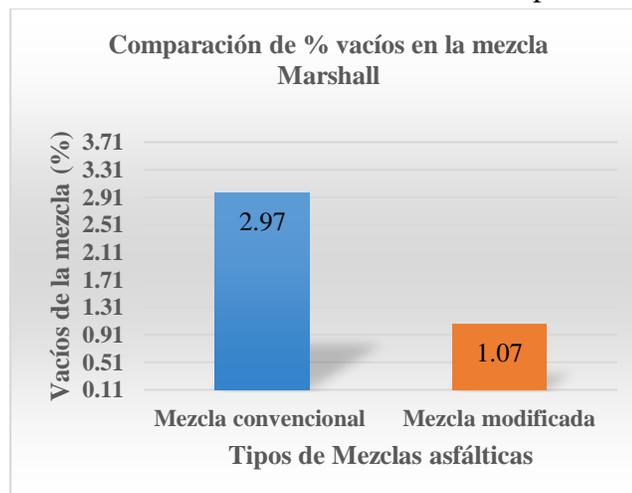


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.7 podemos observar los valores numéricos de fluencia de 15 (pulgadas) de una mezcla convencional y 16.80 (pulgadas) para una mezcla modificada con 2.31 % de caolín incorporado como llenante mineral, en lo cual existió un incremento de 10 % en relación con la mezcla convencional, Su Fluencia incremento y está fuera de los parámetros permisibles que es de 8-14 para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

Por otra parte, altos valores de fluencia tienden a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito, por este sentido la fluencia obtenida no es la que esperábamos.

**Figura 4.8.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

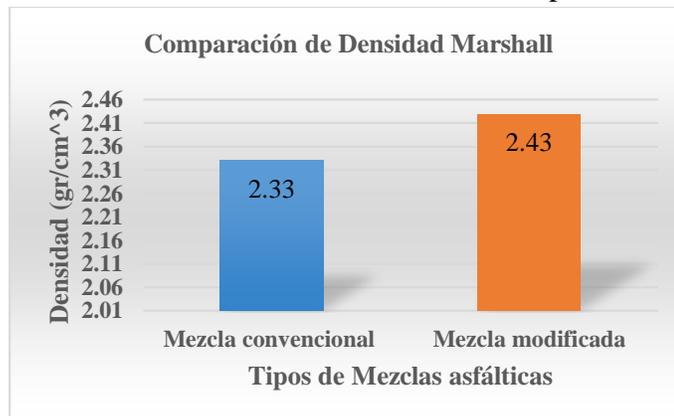
En la figura 4.8 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 2.97% y de 1.07% de una mezcla modificada con 3.74 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos disminuyó en un 64% en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían fuera del rango permisible establecido por el método Marshall.

**Tabla 4.3.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos por el método Marshall para agregados pétreos de chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedades de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef varian. (%)	Error Abs.	Error Relat.	Error porcentual (%)
					Stand				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.33	2.38	2.38	0.07	2.97	0.05	0.02	2.10
	Mezcla modificada	2.43					0.05	0.02	2.10
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	2487.75	2645.12	2645.12	222.55	8.41	157.37	0.06	5.95
	Mezcla modificada	2802.48					157.37	0.06	5.95
Fluencia (pulg)	Mezcla convencional	14.33	13.39	13.39	1.33	9.93	0.94	0.07	7.02
	Mezcla modificada	12.45					0.94	0.07	7.02
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	3.00	2.36	2.36	0.91	38.35	0.64	0.27	27.12
	Mezcla modificada	1.72					0.64	0.27	27.12

Fuente: Elaboración propia.

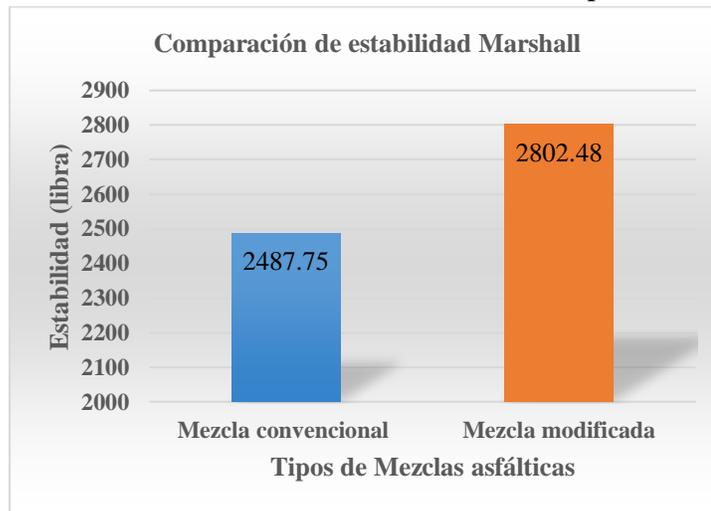
**Figura 4.9.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.9 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 2.82 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.43 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 4.30 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.33 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

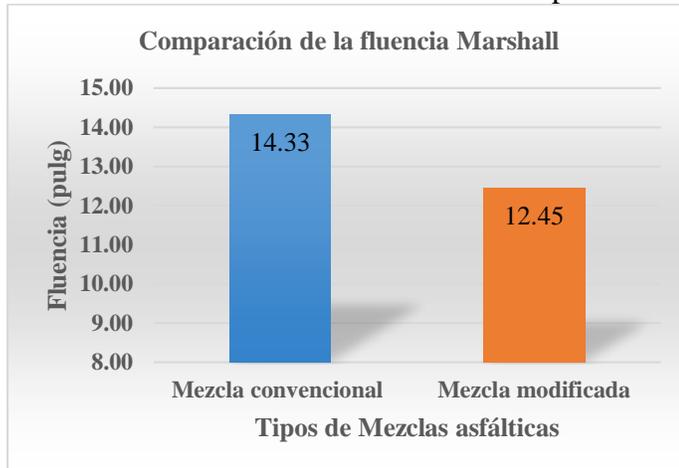
**Figura 4.10.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.10 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 2.82 % de caolín incorporado como llenante mineral, el valor numérico obtenido de estabilidad es de 2487.75 (libra) para una mezcla convencional y 2802.48 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay un incremento de resistencia a la deformación de 12.65 % en comparación con la mezcla convencional. Lo cual es satisfactorio a lo esperado y cumple con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

**Figura 4.11.** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica

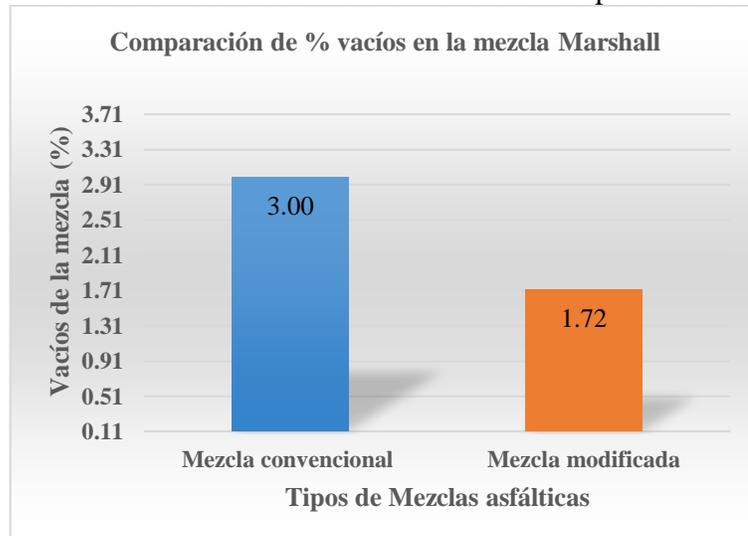


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.11 podemos observar los valores numéricos de fluencia de 14.33 (pulgadas) de una mezcla convencional y 12.45 (pulgadas) para una mezcla modificada con 2.82 % de caolín incorporado como llenante mineral, en lo cual existió un incremento de 15 % en relación con la mezcla convencional su Fluencia disminuyo y sigue dentro de los parámetros permisibles que es de 8-14 para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

Por otra parte, altos valores de fluencia tienden a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito, por este sentido la fluencia obtenida no es la que esperábamos.

**Figura 4.12.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica

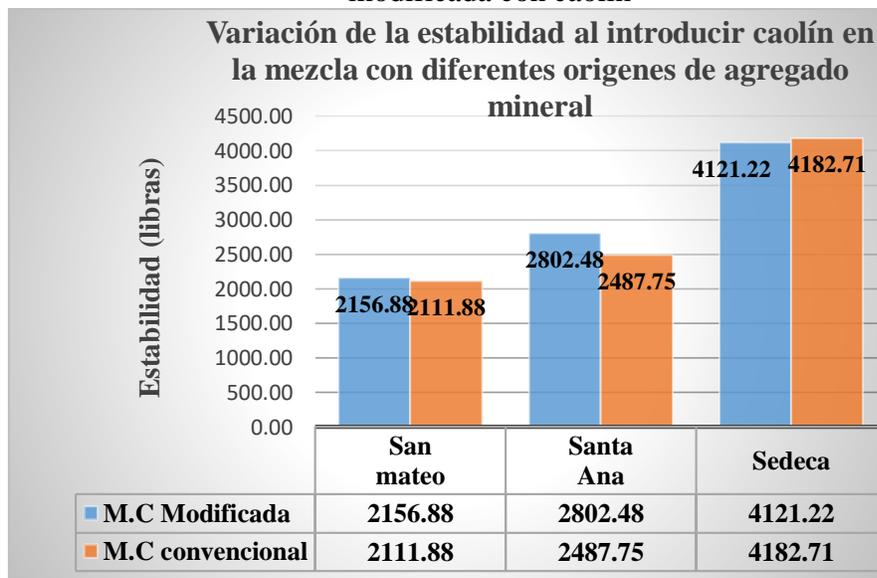


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.12 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 3% y de 1.72% de una mezcla modificada con 2.82 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos disminuyó en un 74.42 % en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían fuera del rango permisible establecido por el método Marshall.

#### 4.1.2.2 Análisis comparativo de la estabilidad y % de vacíos de la mezcla modificada con caolín y la mezcla convencional, con diferentes orígenes de agregado mineral y con asfalto Betupen Plus (C.A 85-100)

**Figura 4.13.** Comparación de la estabilidad de una mezcla convencional y una modificada con caolín



Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas.

En la figura 4.13 podemos apreciar como varía la estabilidad en función del tipo de agregado mineral empleado en la mezcla asfáltica, podemos ver que la mezcla con agregado de San Mateo presenta un incremento en su propiedad mecánica de 2111.88 a 2156.88(lbr). Al introducir CAOLÍN a la mezcla y lo mismo podemos decir de la

mezcla con agregado Santa Ana mejora sus propiedades mecánicas de 2487.75 a 2802.48 (lbr) a diferencia de la mezcla con agregado SEDECA que al introducir caolín no presenta mejoras en su propiedad mecánica.

Por otra parte, valores obtenidos de la mezcla convencional nos dice que el que mejor se comporta en sus propiedades mecánicas de la mezcla es la mezcla con agregado SEDECA que nos da 4121.22 lib. y no así con las mezclas con agregado Santa Ana (2802.48lib.) y San Mateo (2156.88lib.).

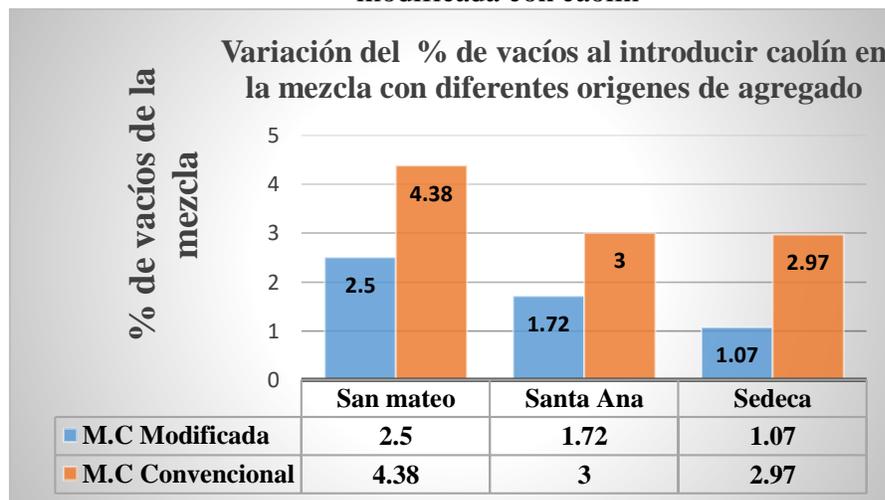
**Tabla 4.4.** pruebas adicionales a los agregados

Pruebas	Procedencia del agregado			Especificación
	San Mateo	Sedeca	Santa Ana	
Equivalente de la arena	94.43	68.53	90.14	<b>50 % MIN</b>
Desgaste de los ángeles grava	23.15	23.43	23.83	<b>35 MÁX</b>
Desgaste de los ángeles gravilla	16.68	22.71	33.57	<b>35 MÁX</b>

Fuente: Elaboración propia. la

En conclusión, podemos decir que el material de SEDECA es el más óptimo ya que sus propiedades del agregado son mejores que los de Santa Ana y San Mateo como podemos ver en la tabla 4.4. Al ser un material bueno no presenta mejoras en sus propiedades mecánicas de la mezcla al introducir caolín como llenante mineral, a comparación de los otros materiales que no son muy buenos, pero si presentan mejoras en sus propiedades mecánicas de la mezcla al introducir caolín como llénate mineral en la mezcla asfáltica.

**Figura 4.14.** Comparación del % de vacíos de una mezcla convencional y una modificada con caolín



Fuente: Elaboración propia. la

Comparando los % de vacíos de la mezcla en la figura 4.14 podemos observar de manera general que al agregar caolín como llénate mineral reduce considerablemente con relación a la mezcla convencional. Dando valores numéricos que no cumplen con las especificaciones del método Marshall.

#### 4.1.2.3 Análisis comparativo del efecto de la incorporación de caolín a la mezcla asfáltica, mediante el ensayo MARSHALL, entre una mezclas convencional y modificada para un cemento asfálticos C.A. 60-70

En el capítulo tres se presentan los resultados del ensayo Marshall, referentes a la Estabilidad, Flujo, densidad y porcentajes de vacíos.

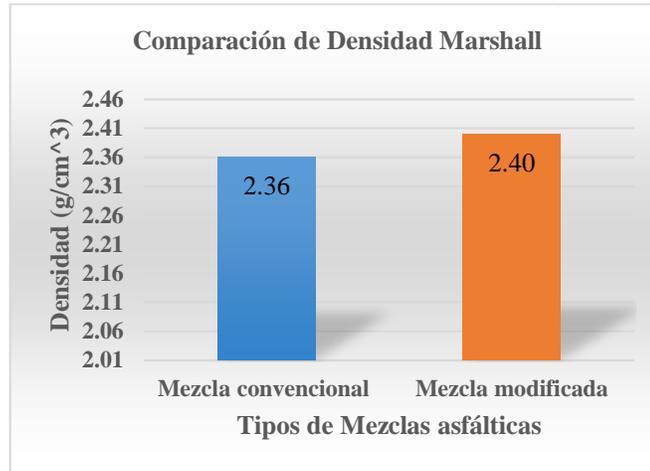
Las mezclas de estudio (mezcla convencional) así como las (mezclas modificada), con la sustitución del Caolín, a partir de los resultados se puede evidenciar que en dichos parámetros poseen mejor respuesta, así también en otros casos no presenta mejoras las mezclas asfálticas ante la presencia de Caolín.

**Tabla 4.5.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos por el método Marshall para agregados pétreos de chancadora Garzón (San Mateo)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedad de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef varianza (%)	Error abs.	Error relat.	Error (%)
					Stand				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.36	2.38	2.38	0.03	1.19	0.02	0.01	0.84
	Mezcla modificada	2.40					0.02	0.01	0.84
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	2968.77	3005.16	3005.16	51.46	1.71	36.39	0.01	1.21
	Mezcla modificada	3041.55					36.39	0.01	1.21
Fluencia (pulg)	Mezcla convencional	13.33	12.67	12.67	0.94	7.43	0.67	0.05	5.25
	Mezcla modificada	12.00					0.66	0.05	5.25
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	3.80	3.62	3.62	0.26	7.24	0.19	0.05	5.12
	Mezcla modificada	3.43					0.19	0.05	5.12

Fuente: Elaboración propia.

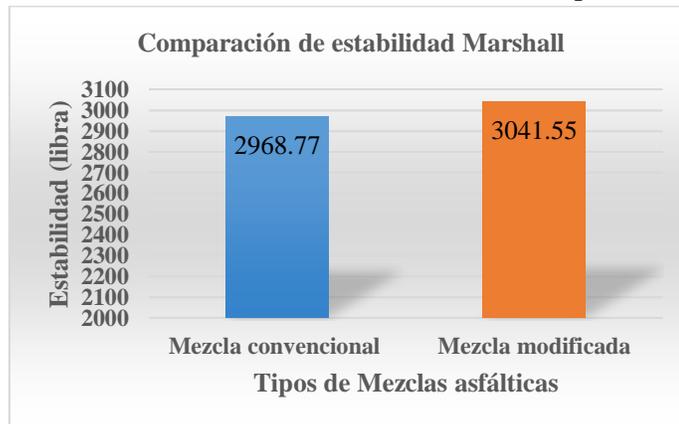
**Figura 4.15.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.15 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 3.17 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.40 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 1.70 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.36 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

**Figura 4.16.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica

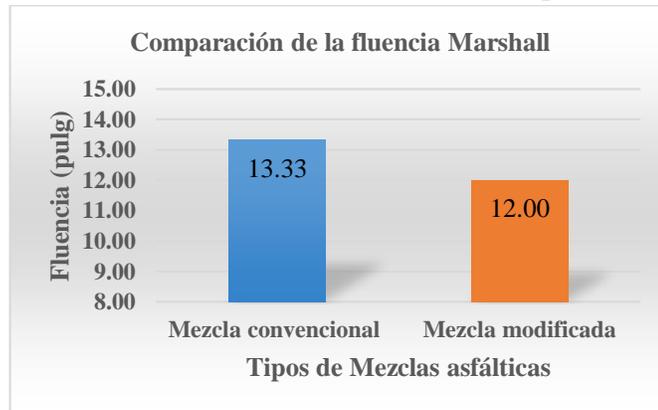


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.16 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral, el valor numérico obtenido de estabilidad es de 2968.77 (libra) para una mezcla

convencional y 3041.55 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay un incremento de resistencia a la deformación de 2.45 % en comparación con la mezcla convencional. Lo cual es satisfactorio a lo esperado y cumple con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

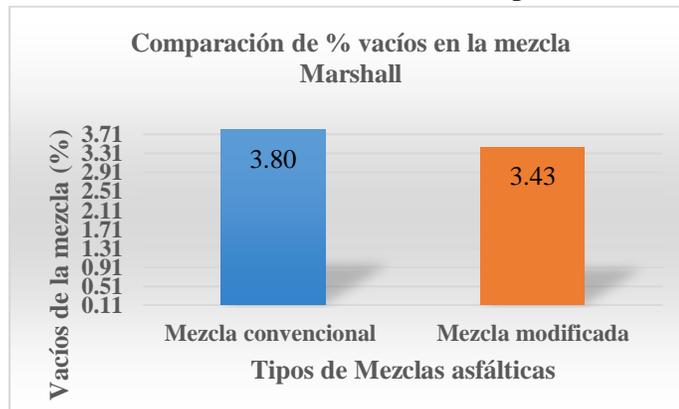
**Figura 4.17** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.17 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín obtenido de 3.17 % por método Marshall en la mezcla asfáltica modificada. Que La mezcla con incorporación de caolín mostró una disminución en la fluencia en un 11.08% en comparación con la mezcla convencional. Las mezclas convencionales que era de 13.33 Pulgadas bajo a 12 pulgadas. Valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son considerados frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Por otra parte, altos valores de fluencia tienden deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito.

**Figura 4.18.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

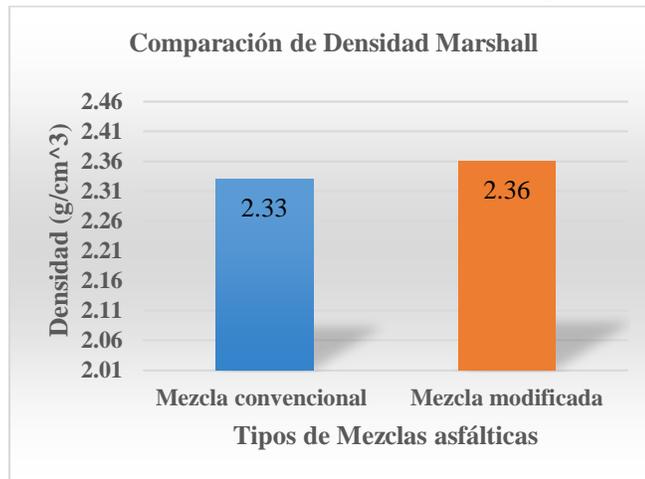
En la figura 4.18 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 3.80% y de 3.43% de una mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos disminuyó en un 10.79 % en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían dentro del rango permisible establecido por el método Marshall.

**Tabla 4.6.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos por el método Marshall para agregados pétreos de plata de SEDECA (Charaja)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedades de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef varianza (%)	Error abs.	Error relat.	Error (%)
					Stand.				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.33	2.35	2.35	0.02	0.90	0.01	0.006	0.64
	Mezcla modificada	2.36					0.02	0.006	0.64
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	4020.41	3542.92	3542.92	709.04	20.01	501.37	0.003	0.30
	Mezcla modificada	4044.29					501.37	0.003	0.30
Fluencia (pulg)	Mezcla convencional	14.32	14.83	14.83	0.71	4.82	0.50	0.034	3.41
	Mezcla modificada	15.33					0.51	0.034	3.41
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	4.21	3.64	3.64	0.81	22.15	0.57	0.157	15.66
	Mezcla modificada	3.07					0.57	0.157	15.66

Fuente: Elaboración propia.

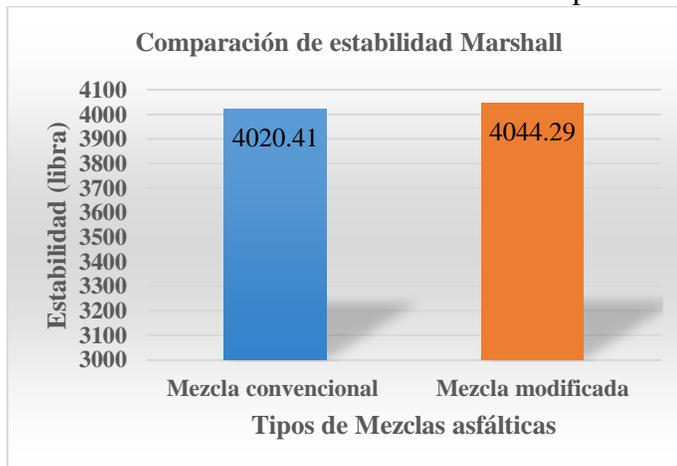
**Figura 4.19.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.19 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 3.17 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.36 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 1.29 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.33 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

**Figura 4.20.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica

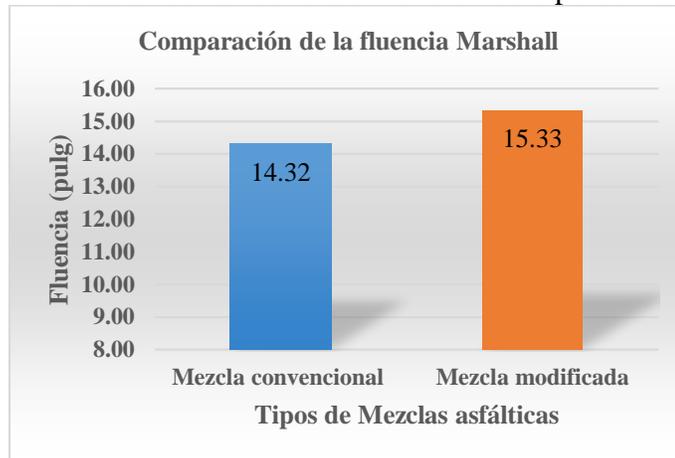


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.20 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral, el valor numérico obtenido de estabilidad es de 4020.41 (libra) para una mezcla

convencional y 4044.29 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay un incremento de resistencia a la deformación de 0.60 % en comparación con la mezcla convencional. Lo cual se esperaba una mejor mejora a lo esperado, las dos mezclas cumplen con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

**Figura 4.21.** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica

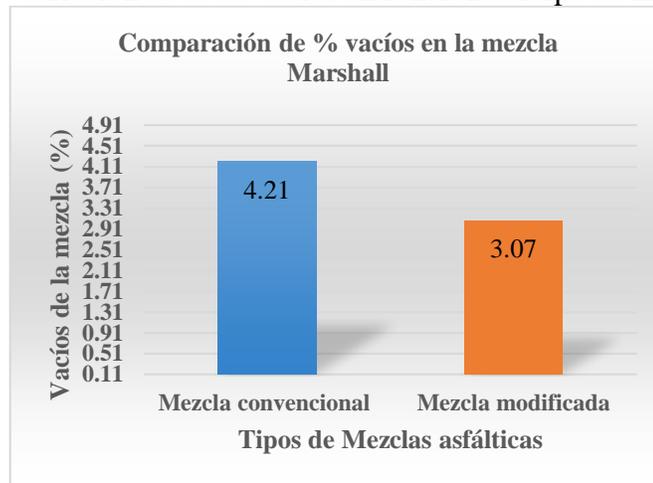


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.21 podemos observar los valores numéricos de fluencia de 14.32 (pulgadas) de una mezcla convencional y 15.33 (pulgadas) para una mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral, en lo cual existió un incremento de 7.05 % en relación con la mezcla convencional. Fluencia aumento y se encuentra fuera de los parámetros permisibles que es de 8-14 para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

Por otra parte, altos valores de fluencia tienden a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito, por este sentido la fluencia obtenida no es la que esperábamos.

**Figura 4.22.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

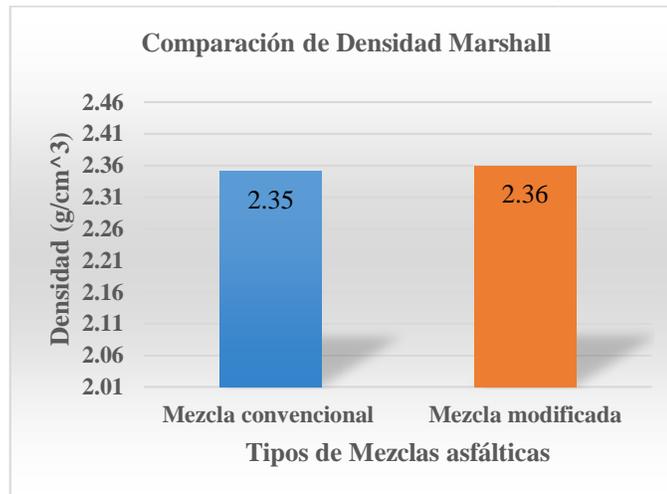
En la figura 4.22 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 4.21% y de 3.07% de una mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos disminuyó en un 37.13 % en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían dentro del rango permisible establecido por el método Marshall.

**Tabla 4.7.** Tratamiento estadístico de valores de diseño obtenidos del método Marshall para agregados pétreos de chancadora Santa Ana (Santa Ana)

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante el método Marshall y análisis de error									
Propiedades de la mezcla	Tipos de mezclas asfálticas	Valores del diseño Marshall	Media	Mediana	Desv.	Coef. varianza (%)	Error abs.	Error relat.	Error (%)
					Stand.				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mezcla convencional	2.35	2.36	2.36	0.01	0.30	0.005	0.002	0.21
	Mezcla modificada	2.36							
Estabilidad (libra)	Mezcla convencional	2882.14	2671.61	2671.61	297.74	11.14	210.535	0.079	7.88
	Mezcla modificada	2461.07							
Fluencia (pulg)	Mezcla convencional	14.33	14.77	14.77	0.62	4.17	0.435	0.029	2.95
	Mezcla modificada	15.20							
Vacíos de la mezcla (%)	Mezcla convencional	4.10	4.20	4.20	0.13	3.20	0.095	0.023	2.26
	Mezcla modificada	4.29							

Fuente: Elaboración propia.

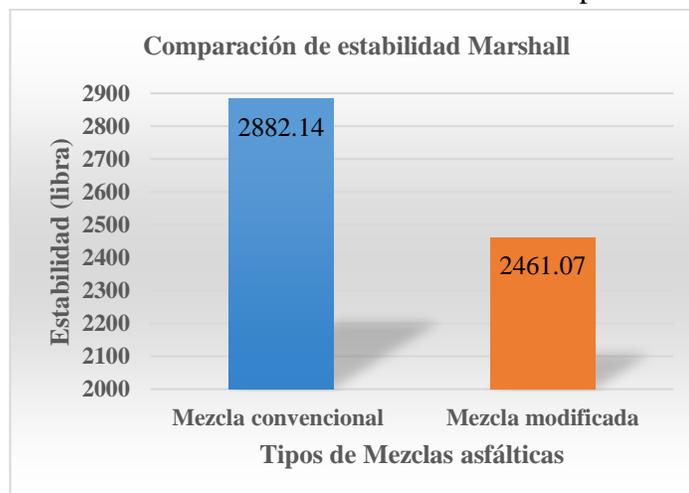
**Figura 4.23.** Variación de la densidad en función del tipo de mezcla asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 4.23 se puede observar que para un porcentaje óptimo de caolín de 3.17 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2.36 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvo un incremento de 0.42 % de la densidad en relación con la mezcla convencional que es de 2.35 g/cm<sup>3</sup>, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla convencional. según especificaciones del método Marshall no nos indica un valor límite o rango de densidad permisible.

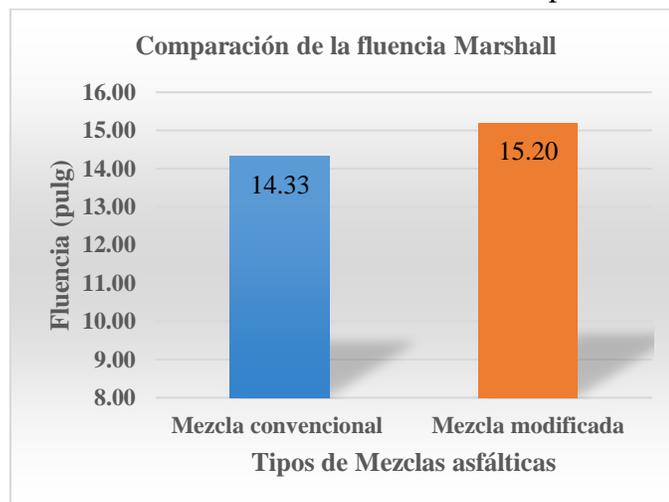
**Figura 4.24.** Variación de la estabilidad en función del tipo de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.24 podemos observar los resultados obtenidos de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral, el valor numérico obtenido de estabilidad es de 2882.14 (libra) para una mezcla convencional y 2461.07 (libra) para una mezcla modificada, lo cual hay un incremento de resistencia a la deformación de 17.11 % en comparación con la mezcla convencional. Lo cual no es lo esperado, las dos mezclas cumplen con las especificaciones del método Marshall que establece como mínimo permisible de 1800 lb para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall, pero al introducir caolín a la mezcla no existe una mejor respuesta mecánica en sus propiedades de la mezcla asfáltica.

**Figura 4.25.** Variación de la fluencia en función del tipo de mezcla asfáltica

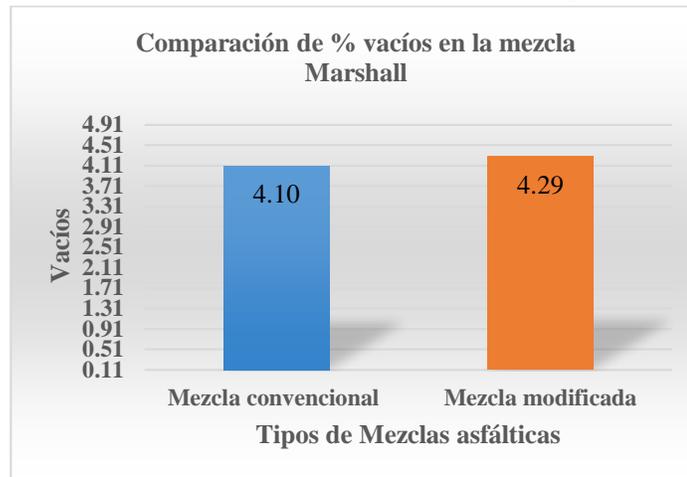


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.25 podemos observar los valores numéricos de fluencia de 14.33 (pulgadas) de una mezcla convencional y 15.20 (pulgadas) para una mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral, en lo cual existió un incremento de 6.07 % en relación con la mezcla convencional. La fluencia aumento y se encuentra fuera de los parámetros permisibles que es de 8-14 para tráfico pesado según especificaciones del método Marshall.

Por otra parte, altos valores de fluencia tienden a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito, por este sentido la fluencia obtenida no es la que esperábamos.

**Figura 4.26.** Variación de % de vacíos en función del tipo de mezcla asfáltica

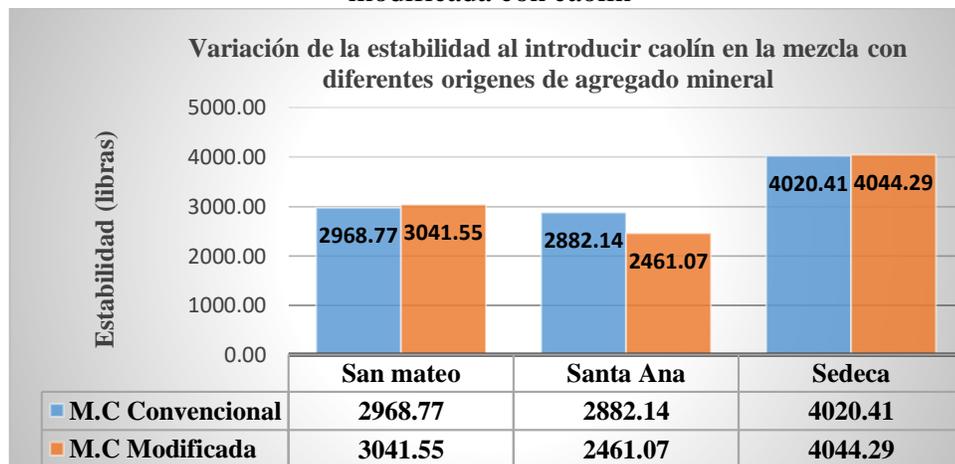


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.26 podemos observar los valores numéricos de % de vacíos de una mezcla convencional de 4.10% y de 4.29% de una mezcla modificada con 3.17 % de caolín incorporado como llenante mineral. Podemos observar que el porcentaje de vacíos aumentó en un 4.63 % en relación a la mezcla asfáltica convencional, según especificaciones del método Marshall para tráfico pesado nos dice que como mínimo es 3% y máximo 5% el cual los resultados obtenidos estarían dentro del rango permisible establecido por el método Marshall.

**4.1.2.4 Análisis comparativo de la estabilidad y % de vacíos de la mezcla modificada con caolín en la mezcla convencional, con diferentes orígenes de agregado mineral y con asfalto Betupen S (C.A 60-70)**

**Figura 4.27.** Comparación de la estabilidad de una mezcla convencional y una modificada con caolín



Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas.

En la figura 4.27 podemos apreciar como varía la estabilidad en función del tipo de agregado mineral empleado en la mezcla asfáltica, podemos ver que la mezcla con agregado de San Mateo presenta un incremento en su propiedad mecánica de 2968.77 a 3041.55 lbs al introducir CAOLÍN a la mezcla asfáltica, no podemos decir lo mismo de la mezcla con agregado Santa Ana, sus propiedades mecánicas bajan de 2882.14 a 2461.07 lbs a diferencia de la mezcla con agregado SEDECA que al introducir caolín presenta mejoras en su propiedad mecánica de 4020.41 a 4044.29 lbs.

Por otra parte, valores obtenidos de la mezcla convencional nos dice que el que mejor se comporta en sus propiedades mecánicas de la mezcla es la mezcla con agregado SEDECA que nos da 404429 lbs y no así con las mezclas con agregado Santa Ana 2461.07 lbs y San Mateo 3041.55 lbs.

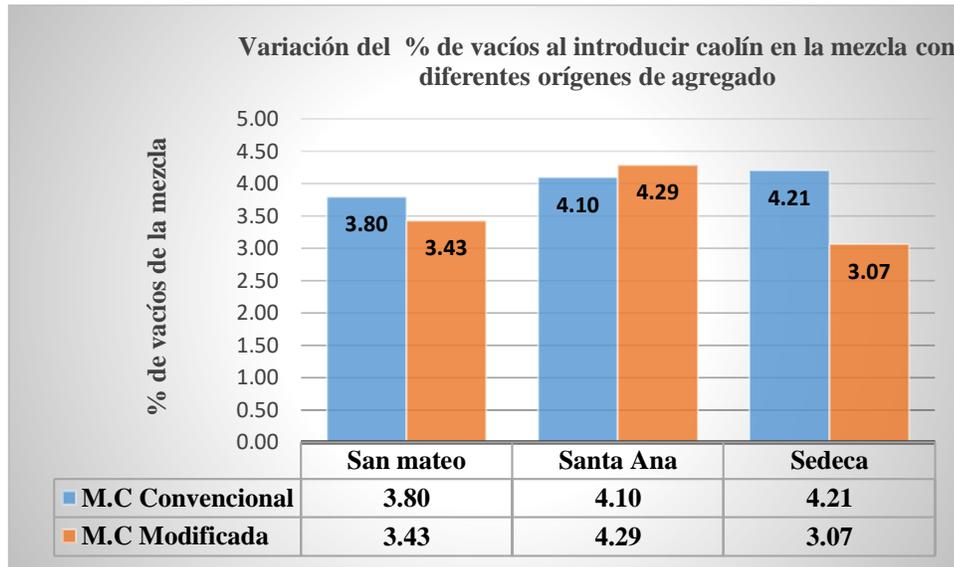
**Tabla 4.8.** pruebas adicionales a los agregados

Pruebas	Procedencia del agregado			Especificación
	San Mateo	Sedeca	Santa Ana	
Equivalente de la arena	94.43	68.53	90.14	<b>50 % MÍN</b>
Desgaste de los ángeles grava	23.15	23.43	23.83	<b>35 MÁX</b>
Desgaste de los ángeles gravilla	16.68	22.71	33.57	<b>35 MÁX</b>

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, podemos decir que el material de SEDECA es el más óptimo ya que sus propiedades del agregado son mejores que los de Santa Ana y San Mateo como podemos ver en la tabla 4.8. Al ser un material bueno el de SEDECA presentó mejoras en sus propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica al introducir caolín como llenante mineral y así también la mezcla con material de San Mateo presentó mejoras en su propiedad mecánica, a comparación de la mezcla con agregado Santa Ana no presentó mejoras en sus propiedades mecánicas ya que los agregados no son muy buenos en sus propiedades.

**Figura 4.28.** Comparación del % de vacíos de una mezcla convencional y una modificada con caolín



Fuente: Elaboración propia.

Comparando los % de vacíos de la mezcla en la figura 4.28 podemos observar de manera general que la mezcla con agregado de San Mateo y Sedeca al incorporar caolín como llénate mineral reduce su porcentaje de vacíos con relación a la mezcla convencional, y no así la mezcla con agregado de Santa Ana que aumenta su % de vacíos al introducir el Caolín, esto debido que es un material con bajo contenido de material fino (filler) a comparación de los otros que tienen más material fino.

Dando valores numéricos que están dentro de las especificaciones del método Marshall que es de 3mín-5máx.

#### **4.1.3 Análisis comparativo de resultados obtenidos con mezclas asfálticas modificadas (caolín), para dos tipos de cemento asfáltico C.A 85-100 Y C.A 70-60 con el mismo banco de agregado mineral**

Para obtener los valores representativos de los resultados de ensayo MARSHALL, los datos analizados se realizó un tratamiento estadístico no probabilístico y análisis de errores, de los diferentes resultados obtenidos para cada probeta.

**Tabla 4.9.** Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos del ensayo Marshall, para una mezcla asfáltica con incorporación de caolín.

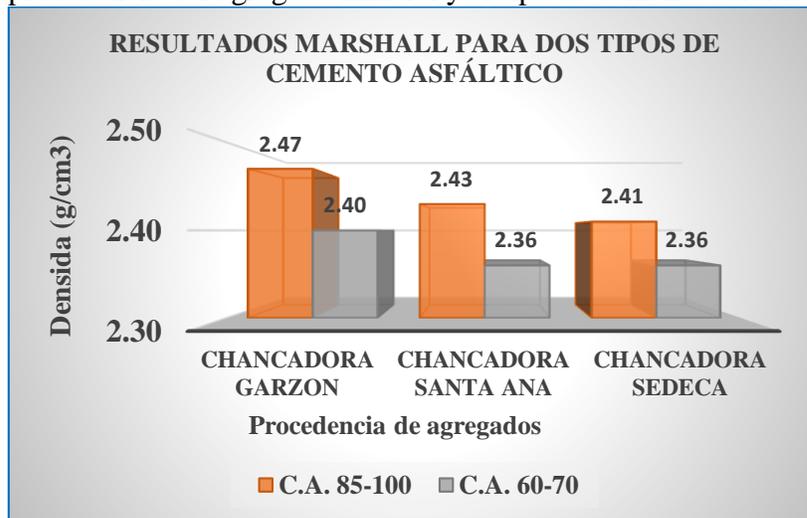
Valores de diseño del ensayo Marshall					
Procedencia del agregado	Tipos de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)
Chancadora Garzón	C.A. 85-100	2.47	2156.88	12.75	2.50
	C.A. 60-70	2.40	3041.55	12.00	3.43
Chancadora Santa Ana	C.A. 85-100	2.43	2802.48	12.45	1.72
	C.A. 60-70	2.36	2461.07	15.20	4.29
Chancadora Sedeca	C.A. 85-100	2.41	4121.22	16.80	1.07
	C.A. 60-70	2.36	4044.29	15.33	3.07

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.9 se muestra el análisis estadístico que se realizó a los resultados obtenidos del ensayo MARSHALL de probetas con incorporación de caolín (como llenante mineral) a la mezclas asfálticas convencional, cuyo fin es el de obtener una respuesta mecánica a la mezcla asfáltica modificada con caolín, y así poder comparar los resultados obtenidos para cada tipo de cemento asfáltico C.A 85-100 y C.A 60-70 con procedencia del material pétreo de una misma cantera que son chancadora Garzón, chancadora Santa Ana y chancadora SEDECA (Charaja)

De los resultados mostrados en la tabla 4.9 se puede observar que para las briquetas modificadas y fabricadas con distintos tipos de cemento asfáltico, las respuestas mecánicas de la mezcla asfáltica modificada varía en función del tipo de cemento asfáltico y también del lugar de procedencia del material pétreo.

**Figura 4.29.** Resultados de la densidad máxima de diseño Marshall en función a la procedencia del agregado mineral y el tipo de cemento asfáltico

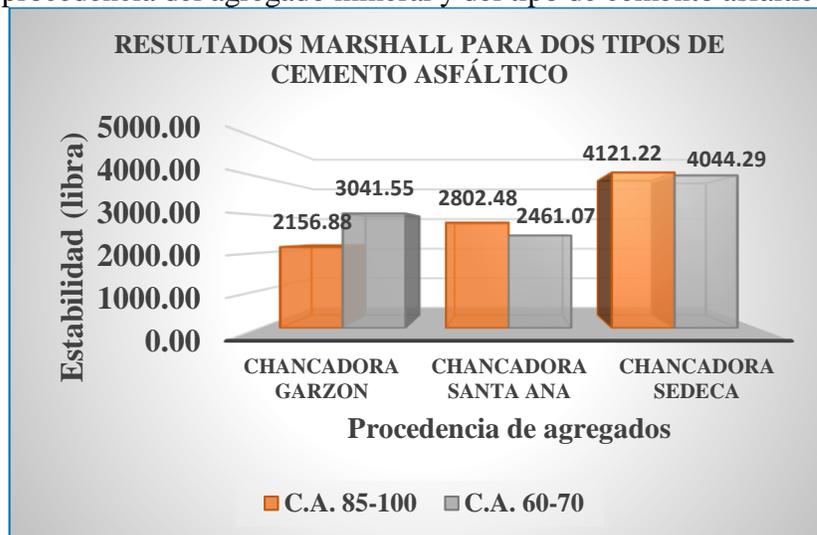


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.29 se puede observar que con el cemento asfáltico Betupen plus 85-100 nos da mejores resultados de densidades, en los tres tipos de mezclas con distintos agregados mineral utilizados para los ensayos.

Podemos ver en la figura 4.29 que mayor densidad es la mezcla con Betupen plus 85-100 con agregado utilizado de San Mateo que es de 2.47 g/cm<sup>3</sup> y la menor densidad es la mezcla con cemento Betupen S 60-70 con agregado utilizado de sedeca que es de 2.36 g/cm<sup>3</sup>

**Figura 4.30.** Resultados de la estabilidad máxima de diseño Marshall en función a la procedencia del agregado mineral y del tipo de cemento asfáltico.

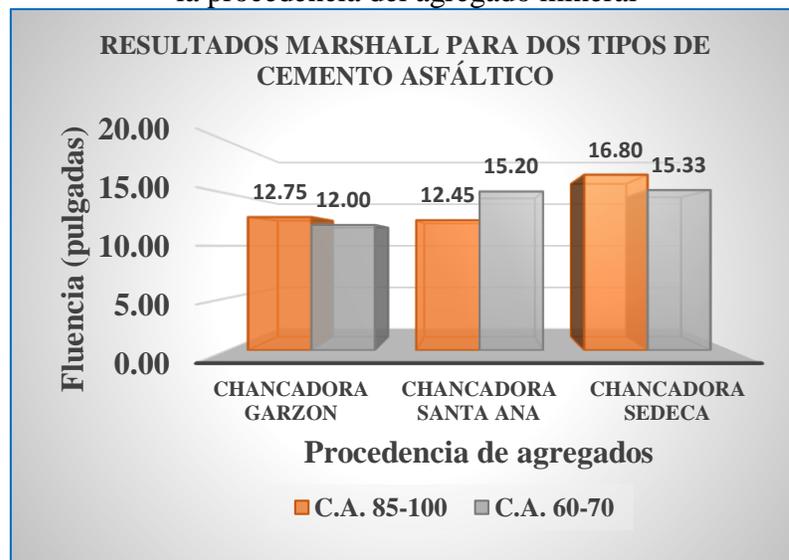


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.30 se puede observar que la mezcla con material de la chancadora Garzón la estabilidad es mayor con el cemento C.A. 60-70 que con el cemento C.A 85-100 que es 2156.88 libra para C.A 85-100 y de 3041.55 para C.A 60-70. Para las Mezclas con agregados de SEDECA la estabilidad es mayor en la mezcla con C.A 85-100 que es de 4121.22 libra y la mezcla con C.A 60-70 es más baja que es de 4044.29 libra. La mezcla con agregado de la chancadora Santa Ana la estabilidad es mayor con el cemento asfáltico C.A 85-100 que es de 2802.48 a comparación de la mezcla con C.A 60-70 que es de 2461.07 libra.

Podemos concluir que la mejor estabilidad obtenida fue la mezcla con cemento Betupen Plus 85-100 y con agregado procedente de la planta de SEDECA que obtuvimos una estabilidad de 4121.22 libra, y la menor estabilidad obtenida fue de la mezcla con Cemento Betupen Plus 85-100 con agregado procedente de la chancadora Garzón que fue de 2156.88 libras.

**Figura 4.31.** Resultados de la fluencia máxima de diseño MARSHALL en función a la procedencia del agregado mineral



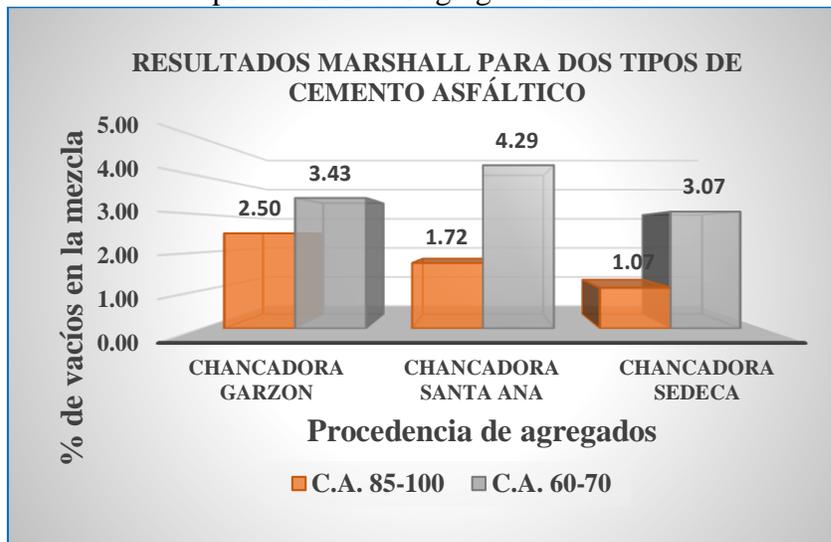
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.31 se puede observar que con el cemento asfáltico 85-100 y 60-70 no existe una variación considerable de la fluencia con respecto al tipo de cemento asfáltico. podemos observar que la fluencia más alta fue de 16.80 pulgadas de la mezcla con C.A 85-100 con agregado procedente de SEDECA y la más baja fue de 12 pulgadas

de la mezcla con C.A 60-70 con agregado procedente de San Mateo, los resultados obtenidos están dentro de las especificaciones del método Marshall.

Lo que sí se puede observar es una variación es con la procedencia del material, por ejemplo, SEDECA tiene mayor Fluencia a comparación de los de Santa Ana y chancadora Garzón.

**Figura 4.32.** Resultados de % de vacíos máxima de diseño Marshall en función a la procedencia del agregado mineral



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.32 se puede evidenciar como varía el % de vacíos para cada tipo de agregado mineral y cada tipo de cemento asfáltico

El % de vacíos en las mezclas al introducir caolín nos da mejores resultados para mezclas con C.A. 60-70 que cumple con las especificaciones del método Marshall a comparación del C.A.85-100 que se encuentra por debajo de las especificaciones del método Marshall.

Podemos observar que la mezcla con C.A 60-70 con agregado Santa Ana nos da mayor % de vacíos de 4.29 % ya que es un material que no tiene mucho fino (filler), a comparación de la mezcla con agregado SEDECA nos da un valor de 3.07 % ya que es un material que tiene mucho fino (filler).

Para la mezcla con C.A 85-100 nos da un % mayor de 2.50 % para la mezcla con agregado procedente de San Mateo ya que es un material que no tiene mucho material fino, a comparación de la mezcla con agregado SEDECA que tiene mucho fino y tiene un porcentaje de vacíos de 1.07% por ser un material que tiene mucho Fino (filler).

## **4.2 Análisis de costos**

El análisis de costos se realizará para la carpeta asfáltica modificada con CAOLÍN como llenante mineral, al mejor porcentaje óptimo de caolín obtenido de la mezcla modificada con un valor de estabilidad y fluencia optima, determinado mediante el ensayo de MARSHALL.

### **4.2.1 Análisis de costo de carpeta asfáltica**

El análisis de costo para la carpeta asfáltica, modificado con un óptimo de CAOLÍN por metro cuadrado de espesor 5cm, se detallará en las planillas de precio unitario.

La dosificación de la mezcla asfáltica modificada y utilizando un cemento asfáltico 85-100 será, 3.74% de caolín, con agregado chancadora Garzón (San Mateo), 3.41% de caolín, con agregado chancadora Santa Ana (Santa Ana) y 2.31% de caolín, con agregado de la planta de SEDECA (Charajá), esta dosificación y el análisis de costo será para un área de 1 metro cuadrado con espesor de 5cm.

Para la dosificación de la mezcla asfáltica modificada y utilizando un cemento asfáltico 60-70 será, 3.17% de caolín, con agregado chancadora Garzón (San Mateo), 2.82% de caolín, con agregado chancadora Santa Ana (Santa Ana) y 2.01% de caolín, con agregado de la planta de SEDECA (Charajá), esta dosificación y el análisis de costo será para un área de 1 metro cuadrado con espesor de 5cm.

**Planilla de costos de carpeta asfáltica convencional con cemento asfáltico C.A.  
85-100**

<b>DATOS GENERALES</b>					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
<b>1. MATERIALES</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 85-100	Tn	0.01	9500.00	82.65
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.79
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>99.63</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
<b>3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	6.84
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>6.84</b>
<b>5. UTILIDAD</b>					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.37
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.37</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	4.88
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>4.88</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					162.91
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>163.00</b>

**Planilla de costos de carpeta asfáltica convencional para un cemento asfáltico  
C.A. 60-70**

DATOS GENERALES					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 60-70	Tn	0.01	9700.00	84.39
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.79
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>101.37</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	6.93
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>6.93</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.55
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.55</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	4.95
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>4.95</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					164.98
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>165.00</b>

#### 4.2.2 Planillas de costos de carpeta asfáltica con incorporación de Caolín, para cemento asfáltico 85-100

Se realizará un análisis de costos de la carpeta asfáltica modificada con caolín para cada tipo de procedencia de agregado mineral, chancadora Garzón (San Mateo), Chancadora Santa Ana (Santa Ana) y de la planta de SEDECA (Charaja).

#### Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 3.74% de Caolín para agregado de la chancadora Garzón (San Mateo)

DATOS GENERALES					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 85-100	Tn	0.01	9500.00	82.65
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.73
7.00	llenante mineral (CAOLÍN)	kg	0.75	5.00	3.73
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>103.29</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	7.02
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>7.02</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.75
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.75</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	5.01
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>5.01</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					167.27
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>168.00</b>

**Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 2.31% de Caolín para agregado de la planta de SEDECA (Charaja)**

<b>DATOS GENERALES</b>					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
<b>1. MATERIALES</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 85-100	Tn	0.01	9500.00	82.65
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.75
7	llenante mineral (CAOLÍN)	Kg	0.48	5.00	2.39
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>101.98</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
<b>3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	6.96
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>6.96</b>
<b>5. UTILIDAD</b>					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.61
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.61</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	4.97
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>4.97</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					165.71
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>166.00</b>

**Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 3.41% de Caolín para agregado de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)**

DATOS GENERALES					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 85-100	Tn	0.01	9500.00	82.65
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.73
7	llenante mineral (CAOLÍN)	kg	0.47	5.00	2.35
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>101.93</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE: SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	6.96
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>6.96</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.61
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.61</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	4.96
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>4.96</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					165.64
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>166.00</b>

### 4.2.3 Planillas de costos de carpeta asfáltica con incorporación de caolín para un cemento asfáltico 60-70

Se realizará un análisis de costos de carpeta asfáltica modificada con caolín para cada tipo de procedencia de agregado mineral, chancadora Garzón (San Mateo), planta de SEDECA y chancadora Santa Ana (Santa Ana).

#### Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 3.17% de Caolín para agregado de la chancadora Garzón (San Mateo)

DATOS GENERALES					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 60-70	Tn	0.01	9700.00	84.39
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.74
7	llenante mineral (CAOLÍN)	Kg	0.66	5.00	3.28
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>104.60</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	7.09
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>7.09</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.89
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.89</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	5.06
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>5.06</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					168.82
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>169.00</b>

**Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 2.01% de Caolín para agregado de la planta de SEDECA (Charaja)**

<b>DATOS GENERALES</b>					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
<b>1. MATERIALES</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 60-70	Tn	0.01	9700.00	84.39
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.76
7	llenante mineral (CAOLÍN)	Kg	0.42	5.00	2.08
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>103.42</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
<b>3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE MANO)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	7.03
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>7.03</b>
<b>5. UTILIDAD</b>					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.76
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.76</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	5.02
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>5.02</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					167.42
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>168.00</b>

**Planilla de costos de carpeta asfáltica con incorporación de 2.82% de Caolín para agregado de la chancadora Santa Ana (Santa Ana)**

<b>DATOS GENERALES</b>					
PROYECTO	ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL CAOLÍN COMO LLENANTE MINERAL EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CERRADAS				
ACTIVIDAD	CARPETA ASFÁLTICA ( E= 5cm)				
UNIDAD	m <sup>2</sup>				
MONEDA	BOLIVIANOS				
<b>1. MATERIALES</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Cemento asfáltico C.A. 60-70	Tn	0.01	9700.00	84.39
2	Diésel	Lt	2.24	3.74	8.39
3	Grava 3/4"	m <sup>3</sup>	0.01	145.00	2.00
4	Querosén	Lt	0.45	3.00	1.36
5	Gravilla de 1/2"	m <sup>3</sup>	0.03	125.00	3.44
6	Arena	m <sup>3</sup>	0.01	130.00	1.74
7	llenante mineral (CAOLÍN)	Kg	0.58	5.00	2.92
<b>TOTAL MATERIALES=</b>					<b>104.24</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.02	14.71	0.24
2	Operador equipo pesado	Hr	0.06	26.24	1.50
3	Obrero certificado	Hr	0.05	23.70	1.23
4	Obrero de planta	Hr	0.06	19.43	1.24
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>4.21</b>
CARGAS SOCIALES= (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)(55% al 71.18%)				65%	2.74
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA= (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES				14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>7.99</b>
<b>3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (bs)	Costo total
1	Camión volqueta	Hr	0.02	190.00	4.52
2	Cargadora frontal	Hr	0.00	382.00	1.76
3	Planta asfaltadora	Hr	0.00	3905.15	12.11
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.01	480.24	2.45
5	Compactadora manual de placa	Hr	0.01	62.50	0.45
6	Compactadora neumática de 9 llantas 4.8 Tn	Hr	0.02	264.48	4.28
7	Rodillo liso vibrocompactador de 7 Tn	Hr	0.01	230.50	3.23
HERRAMIENTAS= (% DE TOTAL MANO DE OBRA)				5%	0.40
<b>TOTAL,EQUIPO,MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS=</b>					<b>29.20</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % de (1+2+3)				5%	7.07
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS=</b>					<b>7.07</b>
<b>5. UTILIDAD</b>					
UTILIDAD= % de (1+2+3+4)				10%	14.85
<b>TOTAL UTILIDAD=</b>					<b>14.85</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>					
IMPUESTOS= %(1+2+3+4+5)				3.09%	5.05
<b>TOTAL IMPUESTOS=</b>					<b>5.05</b>
TOTAL PRECIO UNITARIO(1+2+3+4+5+6)=					168.40
<b>PRECIO UNITARIO ADOPTADO= 1m<sup>2</sup> DE CARPETA ASFÁLTICA CON ESPESOR DE 5cm</b>					<b>169.00</b>

#### 4.3 Análisis de resultados de costos de carpeta asfáltica convencional y modificadas con incorporación de caolín, para 1m<sup>2</sup> de carpeta asfáltica con espesor de 5cm.

Realizando un análisis a los precios unitarios tanto carpeta asfáltica convencional como carpeta asfáltica modificad con Caolín (llenante mineral), tenemos los siguientes resultados.

**Tabla 4.10. Resultados de carpeta asfáltica convencional**

Tipo de cemento asfáltico	Precio unitario para 1m <sup>2</sup> de carpeta asfáltica con espesor de 5cm (bs)
85-100	163.00
60-70	165.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.11. Resultados de carpeta asfáltica con incorporación de caolín (llenante mineral), para un C.A. 85-100**

Procedencia del agregado mineral	Precio unitario para 1m <sup>2</sup> de carpeta asfáltica con espesor de 5cm (bs)
Chancadora Garzón (San Mateo)	168.00
Planta de SEDECA (Charaja)	166.00
Chancadora Santa Ana	166.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.12. Resultados de carpeta asfáltica con incorporación de caolín (llenante mineral), para un C.A. 60-70**

Procedencia del agregado mineral	Precio unitario para 1m <sup>2</sup> de carpeta asfáltica con espesor de 5cm (bs)
Chancadora Garzón (San Mateo)	169.00
Planta de SEDECA (Charaja)	168.00
Chancadora Santa Ana	169.00

Fuente: Elaboración propia.

Realizando un análisis a los precios unitarios tanto carpeta asfáltica convencional como carpeta asfáltica modificad con Caolín (llenante mineral) para los distintos tipos de C.M asfálticos como de los agregados.

Tenemos un incremento de precio para la mezcla asfáltica con **C.A 85-100** igual a:

Mezcla asfáltica modificado con 3.74 % de Caolín con agregado de chancadora Garzón.

$$\text{Incremento} = \frac{P_{si} - P_{cn}}{P_{cn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{168 - 163}{163} * 100$$

$$\text{Incremento} = 3.07 \%$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 3.74 % existe un incremento en el costo de 3.07 % llegando a incrementarse el precio en 5.00 bs.

Mezcla asfáltica modificada con 3.41 % de Caolín con agregado de SEDECA.

$$\text{Incremento} = \frac{P_{gf} - P_{cn}}{P_{cn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{166 - 163}{163} * 100$$

$$\text{Incremento} = 1.84\%$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 3.41 % existe un incremento en el costo de 1.84 % llegando a incrementarse el precio en 3 bs.

Mezcla asfáltica modificado con 2.31 % de Caolín con agregado de chancadora Santa Ana.

$$\text{Incremento} = \frac{P_{si} - P_{cn}}{P_{cn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{166 - 163}{163} * 100$$

$$\text{Incremento} = 1.84 \%$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 2.31 % existe un incremento en el costo de 1.84 % llegando a incrementarse el precio en 3 bs.

Tenemos un incremento de precio para la mezcla asfáltica con **C.A 60-70** igual a:

Mezcla asfáltica modificado con 3.17 % de Caolín con agregado de chancadora Garzón.

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Psi} - \text{Pcn}}{\text{Pcn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{169 - 165}{165} * 100$$

$$\textbf{Incremento} = \textbf{2.42 \%}$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 3.17 % existe un incremento en el costo de 2.42 % llegando a incrementarse el precio en 4 bs.

Mezcla asfáltica modificada con 2.01 % de Caolín con agregado de SEDECA.

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Pgf} - \text{Pcn}}{\text{Pcn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{168 - 165}{165} * 100$$

$$\textbf{Incremento} = \textbf{1.82\%}$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 2.01 % existe un incremento en el costo de 1.82 % llegando a incrementarse el precio en 3 bs.

Mezcla asfáltica modificado con 2.82 % de Caolín con agregado de chancadora Santa Ana.

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Psi} - \text{Pcn}}{\text{Pcn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{169 - 165}{165} * 100$$

$$\textbf{Incremento} = \textbf{2.42 \%}$$

Al modificar la mezcla convencional con Caolín en un 2.82 % existe un incremento en el costo de 2.42 % llegando a incrementarse el precio en 4 bs.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se concluye que en el presente trabajo de investigación se pudo cumplir con los objetivos planteados ya que se pudo analizar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica cerrada a partir del remplazo del filler por el caolín (como llenante mineral), cuyas propiedades mecánicas fueron evaluadas por el diseño Marshall.
- Al analizar los resultados obtenidos de estabilidad y fluencia como así también los de densidad y % de vacíos, Podemos concluir que el efecto de adición de caolín como llenante mineral en las mezclas asfálticas, posee una mejora en las propiedades de la mezcla y en otros casos no existe una mejora en sus propiedades mecánicas, dependiendo del tipo de cemento asfáltico y de la procedencia del agregado mineral.
- Se pudo observar que, entre más porcentaje de caolín incorporado a la mezcla convencional, reducía considerablemente las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica es por esto que se encontró un porcentaje óptimo de caolín para cada ensayo y así poder comparar las propiedades mecánicas de la mezcla convencional y modificada para un contenido óptimo de cemento asfáltico encontrado en cada mezcla convencional.
- Al elaborar las mezclas asfálticas convencional y la mezcla asfáltica modificada con la incorporación de Caolín como llenante mineral, utilizando en las mezclas el asfalto (Betupen plus C.A 85-100). Para las mezclas elaboradas con agregado procedente de la chancadora Garzón y Santa Ana, pudimos observar que existió una mejor respuesta mecánica en las dos mezclas asfálticas modificadas con la incorporación de caolín en relación con las convencionales, mejorando sus propiedades mecánicas de la mezcla al introducir el Caolín.

En la mezcla asfáltica con agregado procedente de SEDECA pudimos observar que no existe una mejora en sus propiedades mecánicas de la mezcla modificada con la incorporación de Caolín como llenante minera en comparación con la mezcla convencional.

- Al elaborar las mezclas asfálticas convencional y la mezcla asfáltica modificada con la incorporación de Caolín como llenante mineral. Utilizando en las mezclas el asfalto (Betupen S C.A 60-70) y agregado procedente de la chancadora Garzón y agregado procedente de SEDECA pudimos observar que existió una mejor respuesta mecánica en las mezclas asfálticas modificadas en relación con la convencional, mejorando sus propiedades mecánicas de la mezcla al introducir el Caolín en la mezcla. En la elaboración de la mezcla asfáltica con agregado procedente de Santa Ana pudimos observar que no existe una mejora en sus propiedades mecánicas de la mezcla al incorporar Caolín como llenante mineral.
- Comparando el efecto de la adición de caolín como llenante mineral en las mezclas, con dos tipos de cemento asfálticos (betupen Plus 85-100) y (Betupen S 60-70), y para el mismo tipo de agregado procedente de chancadora San Mateo, pudimos observar que mejor respuesta mecánica obtuvimos con las mezclas elaboradas con el asfalto Betupen S 60-70.

Para las mezclas elaboradas con agregados procedente de SEDECA pudimos observar que mejor respuesta mecánica obtuvimos con la mezcla elaborada con el asfalto Betupen Plus 85-100. Y finalmente para las mezclas elaboradas con agregado procedente de la chancadora Santa Ana pudimos observar mejor respuesta mecánica en la mezcla elaborada con el asfalto Betupen Plus 85-100

- Al elaborar las mezclas asfálticas modificadas con la incorporación de caolín, con los distintos tipos de agregado mineral procedentes de (Chancadora Garzón, Santa Ana y SEDECA), y con el asfalto Betupen Plus C.A 85-100, Pudimos observar que, la mejor respuesta mecánica fue la mezcla elaborada con agregado mineral procedente de la planta de SEDECA.

Como también pudimos observar que para las mezclas elaboradas con asfalto Betupen S C.A 60-70, la mejor respuesta mecánica fue obtenida de la mezcla elaborada con el agregado mineral procedente de SEDECA.

- Al analizar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica con incorporación de caolín como llenante mineral se concluyó que, el caolín puede llegar a ser un materia competitivo con los que actualmente se utilizan, ya que para algunos ensayos hubo una mejora en las propiedades mecánica de la mezcla, esto dependiendo del tipo de cemento asfáltico utilizado y de la procedencia del agregado mineral, como también del proceso al que debe someterse el caolín para ser utilizado como llenante mineral.
- Realizado la planilla de precios unitarios para 1 m<sup>2</sup> con espesor de 5cm de carpeta asfáltica con cemento asfáltico Betupen Plus 85-100 se pudo observar que:

La mezcla con agregado procedente de chancadora Garzón existe un incremento en costo de 3.07% equivalente a 5 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Para la mezcla con agregado procedente de la planta de SEDECA existe un incremento en costo de 1.84% equivalente a 3 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Para la mezcla con agregado procedente de chancadora Santa Ana existe un incremento en costo de 1.84% equivalente a 3 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Por lo tanto, se puede decir que la mezcla con agregado procedente de chancadora Garzón tiene mayor incremento en costo que las otras mezclas.

- Realizado la planilla de precios unitarios para 1 m<sup>2</sup> con espesor de 5cm de carpeta asfáltica con cemento asfáltico Betupen S 60-70 se pudo observar que:  
La mezcla con agregado procedente de chancadora Garzón existe un incremento en costo de 2.42% equivalente a 4 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Para la mezcla con agregado procedente de la planta de SEDECA existe un incremento en costo de 1.82% equivalente a 3 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Para la mezcla con agregado procedente de chancadora Santa Ana existe un incremento en costo de 2.42% equivalente a 4 bs más que el costo de la mezcla convencional al incorporar el caolín como llenante mineral.

Por lo tanto, se puede decir que la mezcla con agregado procedente de chancadora Garzón y chancadora Santa Ana tiene mayor incremento en costo que la otra mezcla.

## **5.2 Recomendaciones**

- Como una recomendación particular, es preciso la utilización de una indumentaria adecuada para la realización de las mezclas asfálticas, con el fin de evitar cualquier accidente. También es necesario tener precaución durante la mezcla del agregado mineral, asfalto y caolín ya que para ello se hace a temperaturas altas
- Se recomienda que en nuestro medio se ponga en práctica todas las recomendaciones y especificaciones técnicas que se tiene para que pueda aumentar la vida útil de nuestras carreteras y ahorrar recursos económicos.
- Se recomienda que para el uso de Caolín como llenante mineral en una mezcla asfáltica se siga un proceso minucioso de obtención del material y así para poder tener mejores resultados en una mezcla asfáltica al incorporar caolín como llenante mineral.
- Se recomienda que en nuestro medio se realicen más proyectos de investigación relacionados con el CAOLÍN, ya que es una arcilla donde predomina el mineral la caolinita, producto de la descomposición de rocas feldespáticas donde predomina el silicato de aluminio hidratado.
- Se recomienda fomentar la construcción de pavimento flexible hecho con este tipo de mezclas asfálticas sobre todo en zonas donde no hay pavimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Alfonso M. Fonceca.** . Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda edición. Universidad de Colombia (2002).

**Asphalt QMS.** Materials and tests unit. U.S. Department of transportations. USA (2016).

**Carlos Alberto Gomez Campillo.** Estudio de una mezcla asfáltica MDC-19 modificada con adición de polipropileno de baja densidad (PBD) por via seca. Universidad Católica de Colombia (2018)

**Corbett, L.W.** Relationship between composition and physical properties of asphalt. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, pp. 481-491. 1970.

**Crespo Villalaz C.** Vías de Comunicación, Caminos, ferrocarriles y Aeropuertos. Cuarta Edición. “LIMUSA”. México (2009).

**Especificaciones técnicas de mezclas asfálticas en caliente.** Comisión permanente del asfalto. Argentina (2006).

**Institute A.** “Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfálticas en caliente” (2001).

**Kerlly Ruby Ortiz Navarro.** Diseño de mezclas asfálticas con caucho SRB usando metodod Marshall. Samborondon (Septiembre 2016)

**Manual técnico de la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.),** Vol. 4, “Ensayos de suelos y materiales” (2008).

**Melchor A, José.** “Diseño y Evaluación de Pavimentos Flexibles”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingenierita Civil, Departamento de Topografía y Vías de Transporte (2001).

**Michelle Smeider Vargas Avendaño.** Influencia de las diatomeas como llenante mineral en el comportamiento de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19. Universidad Católica De Colombia (2017)

**Minaya Gonzalez & Ordoñez Huaman.** Manual de laboratorio ensayos para pavimentos. Volumen I. Lima. Perú (2001).

**Miró Recasens Rodrigo, Martínez Adriana, Pérez Jiménez Félix.** “Evaluation of effect of heat-adhesive emulsions for tack coats using LCB shear test”. Submitted for Presentation and Publication at the 2006 Annual Meeting of the Transportation Research Board (2005).

**Rojas, L. O.** Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas (enero de 2013).

**Rosales Soto.** Análisis del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente adicionado con el Biopolímero Lignina. Universidad del Perú (2019)

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT),** Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica N° 267, Sanfandilla, Qro (2005).

**Thenoux, Guillermo** “Aplicaciones del ensayo de punto de fragilidad Fraas en el estudio de susceptibilidad al envejecimiento” Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

**UMSA.** Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción. La Paz (2006).

**Wilbert Valeriano Turpo.** Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca. Universidad Puno-Perú (2014)