

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

En los tiempos actuales se ve incremento en las investigaciones para obtener pavimentos de mayor rendimiento. En varios países del mundo investigan la utilización de cemento asfálticos modificados, con el propósito de encontrar alternativas de cementos asfálticos mezclados con productos naturales de manera que puedan modificarse obteniendo condiciones mejores al uso de cementos asfálticos convencionales.

En el Departamento de Tarija, uno de los problemas más serios que vivimos, es el pésimo estado en que se encuentran los pavimentos por ejemplo los municipios de Entre Ríos que conecta con Palos Blancos el cual en muy poco tiempo después de haberse realizado la entrega comenzó a presentar considerables fisuras, deformaciones, desintegraciones y descomposiciones de la superficie de rodamiento del pavimento, (Representantes del Comité Cívico de Entre Ríos llegaron hasta la capital tarijeña para denunciar el mal estado de las carreteras que conectan Tarija con El Chaco, específicamente el tramo Entre Ríos-Palos Blancos). Referencia: EL PAIS 27/05/2019

Es por esto que surge el estudio de investigación con dicha sustancia orgánica que es la nanoarcilla de bentonita, como una forma de mejorar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente se presentan.

Un gran desarrollo en el mundo de la ciencia y la tecnología es la Nanotecnología, dando una breve descripción de esta se definiría que *“La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala”*: (Euroresidentes, 2018).

En vista de la necesidad de un cemento asfáltico más resistente surgieron diferentes investigaciones que analizaron la modificación del cemento asfáltico con diferentes materiales derivados del petróleo, como son los polímeros, que tiene sus derivados como los plastómeros y elastómeros, que son los principales materiales que se analizaron por sus propiedades que pueden aportar si se adicionan al cemento asfáltico entre los más usados son el caucho, S.B.S (estireno, butadieno, estireno), E.V.A.(etileno-acetato de vinilo), P.V.C. (poli cloruro de vinilo), P.E.(polietileno).

La investigación se basa en un trabajo realizado en el país de Ecuador–Riobamba “Evaluación de las propiedades físicas de un asfalto 60/70 modificado con GCR y NANOARCILLA”, que trabajaron con aditivo de sustancia inorgánica, su objetivo principal es evaluar las propiedades físicas del cemento asfáltico con nanoracilla, en dicha investigación se concluyó que al añadir el modificador un 3% de dicha sustancia al cemento asfáltico las propiedades de la consistencia, la temperatura de fluidez, y la viscosidad cinemática se incrementan, lo cual nos da una base de respaldo para realizar la investigación. Como en las pruebas de penetración ayudaron a demostrar una mejor rigidez del adhesivo al 3% exhibió una deformación promedio de 26.75 dmm, y con una viscosidad de 233,33 Pa-s, al probar el punto de inflamación cuando la muestra se calienta, al 3% de nanoarcilla respondió al calor mucho más rápido con una temperatura promedio de 201°C en comparación con el betún AC-20 convencional de la refinería de Esmeraldas, que alcanzó los 295.29°C. (Enrique, 2022).

Como también otra investigación similar “Posibilidades de Modificación de Asfaltos con Nano Arcillas”, Universidad de Los Andes de la Facultad de Depto. Ingeniería Civil y Ambiental en el País de Colombia-Bogotá, D.C, junio de 2011. Donde se puede concluir que la modificación con este tipo de materiales está completamente influenciada por la interacción química entre el asfalto y las nanopartículas.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El pavimento asfáltico es fundamental en la infraestructura de transporte, siendo crucial para la durabilidad y el desempeño de las carreteras. Sin embargo, con el paso del tiempo, los asfaltos convencionales tienden a sufrir deterioros como fisuración, deformaciones plásticas y pérdida de adherencia. Estos problemas resultan en un mantenimiento costoso y una vida útil reducida de las pavimentaciones. La búsqueda de métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los asfaltos es, por lo tanto, de gran importancia para optimizar el desempeño de las carreteras y reducir los costos a largo plazo.

La modificación de asfaltos con materiales avanzados ha sido una estrategia prometedora para mejorar sus propiedades. En particular, la incorporación de nanoarcilla de bentonita al cemento asfáltico representa una innovación significativa. La nanoarcilla de bentonita tiene propiedades únicas debido a su tamaño a nanoescala, que incluye una

alta área superficial y una estructura laminar que puede interaccionar eficazmente con la matriz asfáltica.

Este estudio busca evaluar de manera detallada cómo la incorporación de nanoarcilla de bentonita afecta las propiedades mecánicas del cemento asfáltico. A través de esta investigación, se pretende proporcionar una comprensión más profunda sobre las ventajas y posibles desafíos de utilizar nanoarcilla de bentonita, generando de esta forma una nueva alternativa para la obtención del mejoramiento al uso de cemento asfáltico convencional.

Además de mejorar las propiedades mecánicas del asfalto, la utilización de nanoarcilla de bentonita puede tener beneficios ambientales. La reducción en la necesidad de mantenimiento y reparación puede disminuir el impacto ambiental asociado con la producción y transporte de materiales de reparación. Económicamente, una mayor durabilidad de las pavimentaciones puede resultar en menores costos a largo plazo para los gestores de infraestructuras y contribuyentes.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

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

El problema más sobresaliente que se tiene en cuanto al pavimento, es el deterioro que se produce con el tiempo, y esto es a causa de distintas fallas que afectan al pavimento, como suelen ser el resultado de un mal diseño de paquete estructural, una mala calidad de los materiales empleados, o simplemente el efecto de las solicitaciones externas de cargas vehiculares y agentes climáticos, etc.

A raíz de reparaciones tardías como nos indica La Voz Tarija, *El mal estado de las calles asfaltadas en Tarija es una problemática constante, pues las mismas tienen al menos 10 años sin mayores refacciones.* Fecha: 10 de agosto, 2019.

Por ende estos pavimentos se desgastan considerablemente, perdiendo así algunas propiedades que las hacen más vulnerables ante los diversos factores que deben soportar. Algunas de las fallas que comúnmente suelen presentarse son los agrietamientos, desintegración y baches; debido a estas fallas surgen consecuencias negativas, como ser un bajo nivel de servicio a los usuarios, ocasionando severos daños a vehículos y hasta accidentes de tránsito; es por esto que se prevee de realizarse una modificación del

cemento asfáltico con nanoarcilla de bentonita, haciéndolas más resistentes y prolongando su nivel de servicio.

La consistencia y otras propiedades mecánicas del cemento asfáltico al adicionar nanoarcilla de bentonita en porcentaje se expresan como mejoras en el grado de fluidez a mayores temperaturas y la dureza a temperatura ambiente, del cemento asfáltico, que son las características principales de la consistencia que se necesita para la mejor aplicación en las obras civiles.

El no realizar la prueba, no se podrá estimar los porcentajes óptimos que se requieran para mejorar las propiedades del cemento asfáltico modificado teniendo la incertidumbre si podrá mejorar el cemento asfáltico.

### **1.3.2. Formulación del problema**

¿Cómo afecta la adición de nanoarcilla de bentonita en la modificación del cemento asfáltico y cómo influye en sus propiedades mecánicas del cemento asfáltico convencional y de la mezcla asfáltica generada con este producto modificado?

## **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita a través de la caracterización con ensayos de laboratorio, para la utilización en mezclas asfálticas en caliente de pavimentos flexibles.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico convencional y la muestra del aditivo nanoarcilla de bentonita.
- Caracterizar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes de nanoarcilla de bentonita.
- Analizar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico con la adición de nanoarcilla de bentonita y obtener el porcentaje óptimo del aditivo modificador.
- Realizar una mezcla asfáltica convencional y otra modificada con nanoarcilla de bentonita mediante el método Marshall.

- Evaluar los resultados de los parámetros mecánicos, de la mezcla asfáltica modificada con nanoarcilla de bentonita, en comparación con una mezcla asfáltica convencional.

### 1.5. HIPÓTESIS.

Al incorporar nanoarcilla de bentonita en la modificación del cemento asfáltico se mejoran las propiedades mecánicas del cemento asfalto convencional y de la mezcla asfáltica generada con este producto modificado.

### 1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.

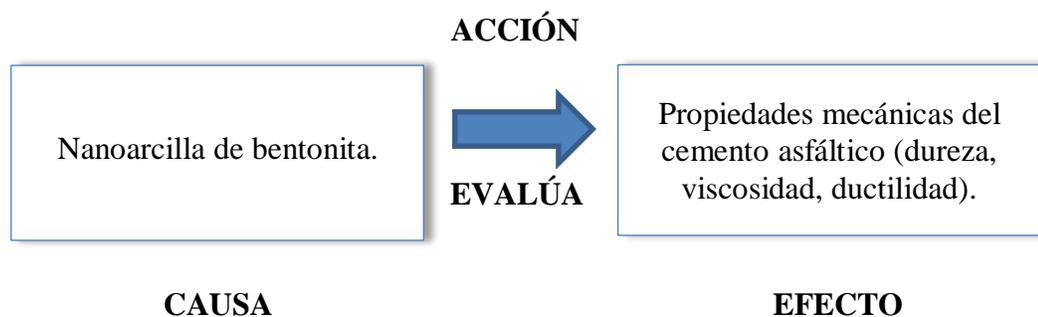
#### 1.6.1. Variable Independiente

- Nanoarcilla de bentonita.

#### 1.6.2. Variable Dependiente

- Propiedades mecánicas del cemento asfáltico (dureza, viscosidad, ductilidad).

#### GRÁFICO VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES



**Nanoarcilla de bentonita:** Es la de una arcilla que puede modificarse para que los complejos arcillosos sean compatibles con monómeros y polímeros orgánicos.

**Propiedades mecánicas del cemento asfáltico:** Los ensayos que se practican al asfalto “viscosidad, ductilidad, penetración, punto de inflamación, punto de ablandamiento y peso específico” son los necesarios para verificar las condiciones que presenta el asfalto convencional, para emplearse como lígante en una mezcla asfáltica.

### 1.7. DETERMINACIÓN DEL ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.

El alcance del proyecto de grado es la de evaluar la propiedades mecánicas del cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita, en las mezclas asfálticas en caliente para pavimentos flexibles.

Corresponde al tipo de investigación aplicada, a un nivel de investigación que tiene un alcance casual o explicativo con diseño experimental en la categoría cuasi-experimental

donde se llegó a describir las causas, por qué y el cómo se dan los fenómenos, manipulando la variable independiente, para analizar si al adicionar porcentajes de nanoarcillas de bentonita presenta ventajas para la aplicación en obras civiles.

Se realizó la caracterización de cada material según la Norma Boliviana de la ABC del manual de ensayos de agregado pétreo y asfaltos.

Se optó como muestra un cemento asfáltico convencional que se utiliza en nuestro medio (Departamento de Tarija) por parte de las Instituciones locales 85-100, luego se analizó el aditivo nanoarcilla de bentonita que también fue caracterizado en laboratorio.

Una vez obtenidos los resultados de caracterización en laboratorio tanto de los agregados pétreos y asfalto 85-100. Se realizó la modificación del cemento asfáltico 85-100, con 5 tipos de porcentajes de dicho aditivo 0,5%,1%,2%,3% y 4%, para evaluar sus características mecánicas del cemento asfáltico modificado y así mismo se realizó un análisis de resultados para la obtención del porcentaje óptimo de nanoarcilla de bentonita.

Se realizó 3 briquetas con los 5 porcentajes de nanoarcilla de bentonita ya mencionados anteriormente, para realizar la comparación en la variación de sus propiedades de la mezcla asfáltica, como ser la estabilidad, fluencia, densidad, vacíos en la mezcla vacíos de agregado mineral y vacíos ocupados por el cemento asfáltico y así mismo corroborar el porcentaje óptimo de nanoarcilla de bentonita seleccionado.

Posteriormente se realizó 30 briquetas de mezclas de cemento asfáltico modificado con el porcentaje óptimo de nanoarcilla de bentonita para evaluar los parámetros mecánicos, en comparación con una mezcla asfáltica con cemento asfáltico normal.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. GENERALIDADES**

En este capítulo se pretende indagar en los conceptos básicos y enfoques teóricos relacionados con el cemento asfáltico, así como también definiciones básicas de las propiedades de los cementos asfálticos y su clasificación, técnicas de aprovechamiento del uso del aditivo nanoarcilla de bentonita.

#### **2.2. CEMENTO ASFÁLTICO**

La American Society for Testig and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

El cemento asfáltico es un material derivado del petróleo, está conformado por largas cadenas de hidrocarburos y compuestos inorgánicos. Su comportamiento es viscoso o viscoelástico, dependiendo de la temperatura. A bajas temperaturas, actúa como sólido, pero a medida que la temperatura aumenta, su comportamiento se vuelve líquido. Por otro lado, es conocido por su durabilidad, resistencia al agua y capacidad para adherirse a otros materiales cuando se calienta. (Villegas et al., 2012)

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas del agregado en un pavimento de mezcla caliente. (Meza Cáceres, 2021)

El cemento asfáltico es un material al que los ingenieros civiles del Departamento de Tarija destinan un amplio, y funcional, número de aplicaciones en la actualidad. Se emplea significativamente en la construcción de carpetas, superficie de rodamiento; revestimientos de obras hidráulicas, impermeabilización de edificaciones, etc. Se utiliza en mezclas asfálticas como aglomerante o ligante para la construcción de caminos, mezclando usualmente con áridos pétreos.

**Figura 2.1:**Asfalto Natural Lago Peach Lake y asfalto refinado



Fuente: (Geologyin, 2014)



Fuente: (Sociedad, 2023)

### **2.2.1. Historia y origen del cemento asfáltico**

El cemento asfáltico se ha desempeñado de forma esencial en la construcción de carreteras a lo largo de la historia. Su origen es antiguo, pues se utilizaba de forma natural en civilizaciones como los babilonios y romanos para sellar estructuras y pavimentar calles. Sin embargo, el auge de este material se produjo en el siglo XIX con la introducción de técnicas modernas de refinación y el desarrollo de métodos de pavimentación, utilizando capas de grava y asfalto. Con el tiempo, esta forma industrializada de producir propició la extensión de la red de carreteras y llevaron a la producción en masa de cemento asfáltico, debido a su durabilidad y versatilidad en diversas condiciones climáticas.

En el año 1870, en Estados Unidos, se construye la primera planta de mezcla asfáltica para pavimentar la avenida Pennsylvania; este hecho histórico marca el nacimiento del empleo a gran escala del cemento asfáltico. A lo largo del siglo XX, se realizaron avances significativos, incluyendo la creación de asfaltos modificados y técnicas de reciclaje, marcando un hito en la evolución de este componente crucial en la infraestructura moderna.

La aplicación extendida de este material mejoró la eficiencia del transporte, contribuyó con el desarrollo económico al facilitar un aumento en el comercio, el turismo y la interacción entre las ciudades. Por otro lado, la durabilidad y versatilidad de los

cementos asfálticos de última generación permitieron carreteras capaces de enfrentar desafíos climáticos y de tráfico de manera más efectiva.

En el Siglo XXI, la investigación en asfaltos continúa, dando lugar a tecnologías que mejoran la resistencia y adaptabilidad a diversas condiciones climáticas. Por otro lado, se busca que los procesos productivos impacten menos el ambiente y se hace énfasis en la utilización de materiales de desecho y biopolímeros como modificadores. (Luis Guillermo Loría-Salazar, 2024).

### **2.2.2. Producción del Asfalto.**

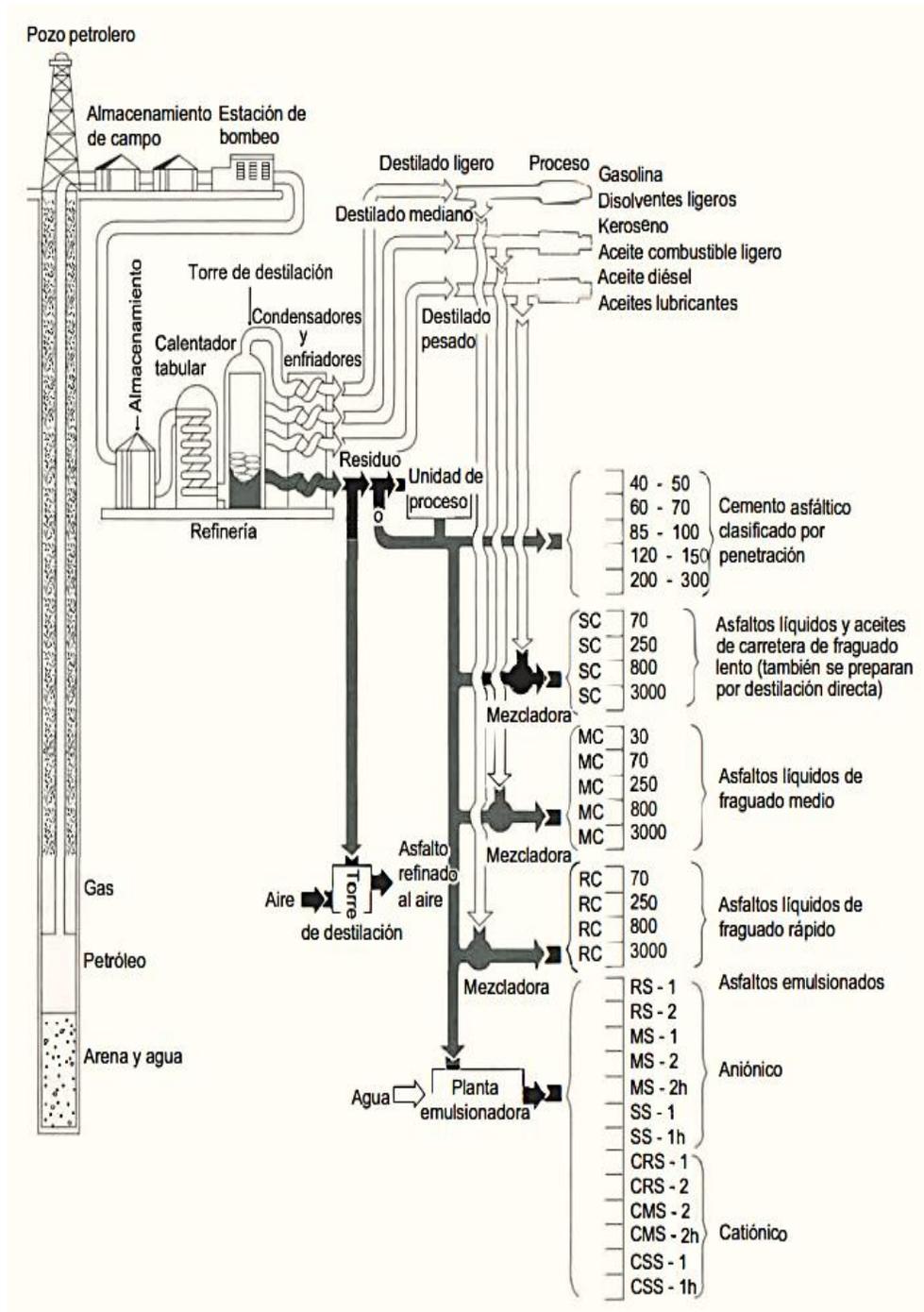
En la actualidad, el cemento asfáltico o asfalto es un residuo del proceso de destilación del petróleo. En los inicios de su empleo se obtenía naturalmente en los estratos geológicos, tal como el Lago Trinidad.

El proceso de destilación del petróleo se produce en una refinería con la aplicación de calor y presión. En la primera parte del proceso, el crudo es calentado hasta alcanzar una temperatura entre 350°C a 380°C, para luego ingresar por la parte baja de torre de destilación. El vapor se eleva por la torre y pasa a través de los agujeros de las bandejas ubicadas a diferentes alturas. Este vapor se condensa cuando la temperatura en la bandeja es ligeramente menor a su temperatura de ebullición. Las fracciones ligeras son retiradas dando lugar al propano y butano, y luego por debajo la nafta, el kerosene llega hasta el diésel. El residuo de este proceso se emplea para la elaboración del asfalto, el mismo que se lleva a una torre donde se aplica vacío entre 10 a 100mmHg a una temperatura entre 350°C a 425°C para producir aceites, destilados y residuos cortos. También existen otros procedimientos donde se aplica temperatura, craqueo o descomposición térmica.

El último componente del proceso de destilación se emplea en la elaboración de los diversos tipos de asfaltos; siendo los asfaltos diluidos de curado lento obtenidos directamente, mientras que los de curado medio resultan de la mezcla de cemento asfáltico con kerosene y los de curado rápido de cemento asfáltico con gasolina. Los diferentes tipos de cementos asfálticos se suelen obtener por combinación entre productos resultantes de diversos crudos ya que el porcentaje de asfalto en cada crudo varía de acuerdo a la procedencia. (Ing.J.Rafael Menendez Acurio, Ingeniería de Pavimentos, 2016)

En la siguiente figura se presenta, de forma esquemática, el proceso para la producción del asfalto.

**Figura 2.2:** Representación esquemática de la producción de asfaltos



Fuente: (Ing.J.Rafael Menendez Acurio, Ingeniería de Pavimentos, 2016)

### 2.2.3. Clasificación de los materiales asfálticos

Como se mencionó anteriormente, los productos asfálticos para pavimento se obtienen de la refinación del crudo en la torre de vacío, estos son: (Digitales UDLAP, 2010)

- a) **Asfaltos rebajados:** Materiales asfálticos líquidos compuestos por asfalto y un solvente, utilizados regularmente en la elaboración de carpetas de mezclas en frío e impregnaciones. Actualmente son considerados peligrosos para el medio ambiente debido a que el solvente se evapora al esparcirlo en el pavimento.
- b) **Emulsiones asfálticas:** Materiales asfálticos líquidos estables, compuestos por la unión de agua y asfalto a través de una solución jabonosa.
- c) **Asfaltos sopladados con aire:** Son asfaltos sometidos a un tratamiento de soplado de aire a altas temperaturas para proporcionar ciertas características deseadas para la realización de ciertos trabajos como aplicaciones hidráulicas, material para techar, etc.
- d) **Asfalto AC:** Son los cementos asfálticos obtenidos del proceso de destilación del petróleo. También se les conoce como asfaltos no modificados.
- e) **Asfaltos modificados:** Son los cementos asfálticos combinados con algún polímero para mejorar las propiedades físicas de este.

Es preciso aclarar que debido al enfoque de esta investigación solo se centra la atención en los últimos dos, siendo estos, los asfaltos seleccionados, para el proyecto de investigación.

### 2.2.4. Composición química del cemento asfáltico.

Para entender el comportamiento del Asfalto producto del petróleo, es necesario conocer e interpretar el significado de sus propiedades físico – químicas a partir de su composición química, durante su fabricación para sus diferentes usos sea en pavimentación de carreteras y en la industria de recubrimiento.

La configuración de la estructura interna de un asfalto es determinada por la constitución química de sus moléculas. Un asfalto es una mezcla química compleja de moléculas que son predominantemente hidrocarburos con pequeñas cantidades de componentes policíclicos de estructura análogas y grupos funcionales con contenido de azufre, nitrógeno y átomos de oxígeno. (Ing.J.Rafael Menendez Acurio, Ingeniería de Pavimentos, 2016)

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

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

Es posible separar los asfaltos en grupos químicos principales llamados Asfaltenos y Maltenos. Los maltenos a la vez se subdividen en saturados, aromáticos y resinas. (Ing.J.Rafael Menendez Acurio, Ingeniería de Pavimentos, 2016)

#### **2.2.4.1. Asfaltenos**

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

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

#### **2.2.4.2. Maltenos**

##### **a) Resinas**

Son solubles en n-heptano. Al igual que los asfaltenos, tienen una elevada proporción de hidrógeno y carbón, además, contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son sólidos o semisólidos de color marrón oscuro, su naturaleza es polar y son altamente adhesivos. Las resinas son agentes dispersivos o peptizantes para los asfaltenos.

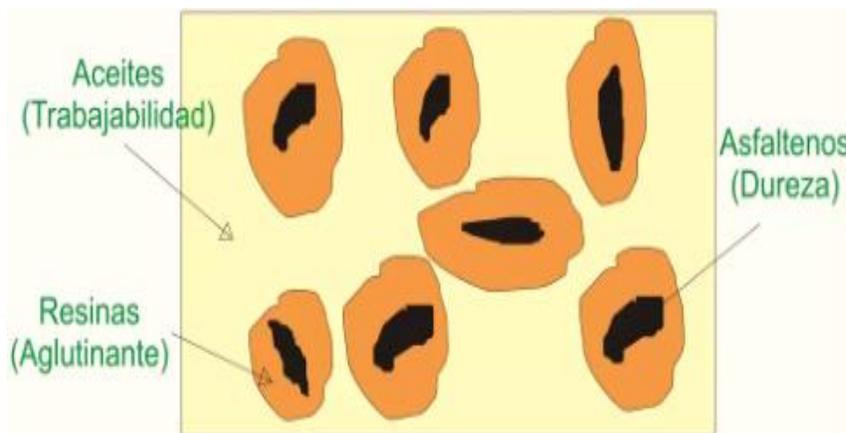
## b) Aromáticos

Comprenden los compuestos nafteno-aromáticos de menor peso molecular en el asfalto y representan la mayor proporción de medio de dispersión de los asfaltenos peptizados. Constituyen entre el 40 y 65% del total del asfalto y son líquidos viscosos de color marrón oscuro.

## c) Saturados

Consisten en hidrocarburos alifáticos de cadenas lineales abiertas y ramificadas. Son aceites viscosos no polares de color amarillo claro o blanco.

**Figura 2.3:** Composición química del asfalto



Fuente: (ASOPAC, 2004)

### 2.2.5. Propiedades reológicas del asfalto

La Reología es la rama de la Física que estudia las propiedades del flujo y deformación de la materia, como la viscosidad, elasticidad, ductilidad, fragilidad, etc. (Gisela, 2008)

Las propiedades físicas son todos los ensayos que se practican al asfalto “viscosidad, penetración, punto de inflamación, punto de ablandamiento y peso específico” son los necesarios para verificar las condiciones del asfalto convencional que presenta el asfalto, para emplearse como ligante en una mezcla asfáltica.

Se realiza una descripción de algunas propiedades reológicas fundamentales del cemento asfáltico, a continuación:

#### 2.2.5.1. Consistencia

Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, puesto que son materiales termoplásticos que se licúan gradualmente al calentarlos. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o

plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.

Si se expone al aire el cemento asfáltico en películas delgadas y se le somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo en las mezclas con agregado pétreo, el asfalto tiende a endurecerse y aumentar su consistencia. Se permite un aumento limitado de ésta, por lo cual un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar un daño al cemento asfáltico, tanto como el servicio en el camino terminado. Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o de penetración. (E-ASPHALT, 2005)

#### **2.2.5.2. 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).

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. (ASOPAC, 2004)

#### **2.2.5.3. Durabilidad**

Es una medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. (ASOPAC, 2004).

#### **2.2.5.4. Adhesión y cohesión**

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla asfáltica. Cohesión por otro lado, es la capacidad del asfalto de mantener firme las partes del 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

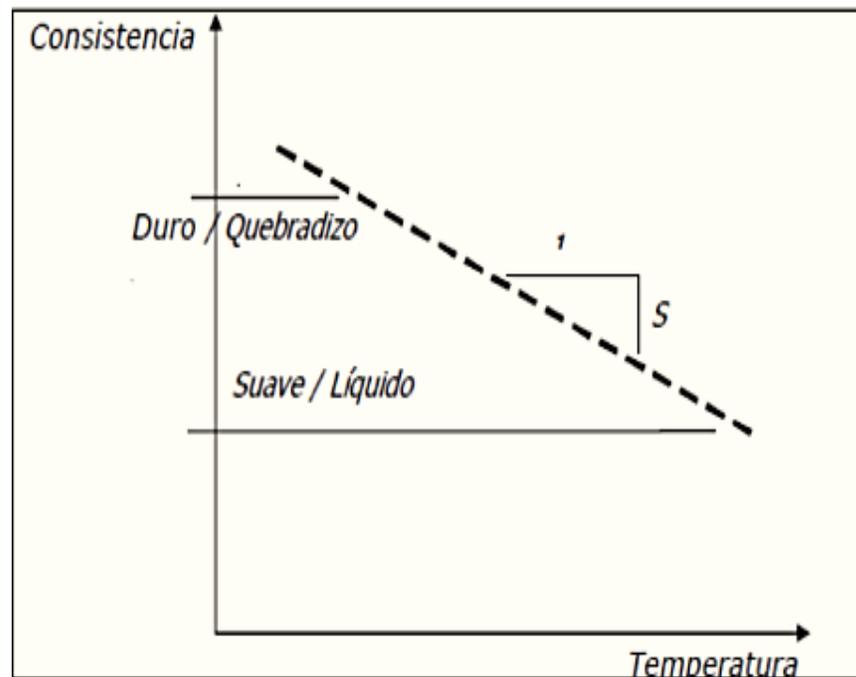
algunas como relacionadas con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y sólo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos. (ASOPAC, 2004)

#### 2.2.5.5. Susceptibilidad a la temperatura

Es el asfalto un material termoplástico se vuelve más viscoso (duro) a menor temperatura y menos viscosos (blando) conforme la 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 de un asfalto.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizada 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. (ASOPAC, 2004)

**Figura 2.4:**Comportamiento del asfalto (Consistencia vs. Temperatura)



Fuente: (Manual del Instituto del Asfalto)

La gráfica muestra como el asfalto cambia de consistencia conforme cambia de temperatura, a este cambio se le conoce como susceptibilidad térmica y es la pendiente de la recta (S).

## 2.2.6. Clasificación del cemento asfáltico

### 2.2.6.1. Clasificación por penetración

En el Perú, se emplea el ensayo de penetración para clasificar los asfaltos. El uso del ensayo de penetración para caracterizar la consistencia del asfalto data desde finales del siglo XIX. Los ensayos de penetración y punto de ablandamiento son de origen empírico, es esencial que estos sean llevados a cabo bajo exactamente las mismas condiciones que los estándares establecen para que sus resultados tengan validez.

**Tabla 2.1: Grados de penetración estándar ASTM**

Prueba	Grado de penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración a 25°C (77°F) 100 g,5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, °F (vaso abierto de Cleveland)	450	-	450	-	-	-	425	-	350	-
Ductilidad a 77°C (25°C) 5 cm / min, cm	100	-	100	-	-	-	100	-	100 <sup>a</sup>	-
Solubilidad en tricloroetileno,%	99	-	99	-	-	-	99	-	99	-
Penetración retenida después de la prueba del horno de película delgada,%	55+	-	52+	-	-	-	42+	-	37+	-
Ductilidad a 77°F (25°C) 5 cm / min,cm después de la prueba del horno de película delgada.	-	-	50	-	75	-	100	-	100 <sup>a</sup>	-

Fuente: (Asociación Americana para Ensayos y Materiales)

### 2.2.6.2. Clasificación por viscosidad

En la década de 1960, la ASTM, AASHTO, la industria y una serie de organismos de carreteras en EE.UU empezaron a clasificar los asfaltos de acuerdo a su viscosidad mediante la norma ASTM D3381 "Especificación estándar para la clasificación de cementos asfálticos por viscosidad para su uso en la construcción de pavimentos (ASTM, 2003). Esta especificación incluye cinco grados de viscosidad que van desde un asfalto duro clasificado en "AC-40" a un cemento asfáltico clasificado en suave "AC-2.5."

**Tabla 2.2: Requisitos del cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60°C.**

Prueba	Grado de viscosidad					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 140°F (60°C),P	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ±400	3000 ± 600	4000± 800
Viscosidad, 275 °F (135°C), min, cSt	125	175	250	300	350	400
Penetración, 77°F (258°C). 100 g, 5s.min	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, copa abierta de Cleveland, min.°F (°C)	325 (163)	350 (177)	425 (219)	450 (232)	450 (232)	450 (232)
Solubilidad en tricloroetileno, min,%	99	99	99	99	99	99
Pruebas sobre residuo dela prueba del horno de película delgada.	-	-	-	-	-	-
Viscosidad, 140°F (60°C),máx.,P	1250	2500	5000	10,000	15,000	20,000
Ductilidad, 77°F, (25°C),5cm/min,min,cm	100 <sup>a</sup>	100	75	50	40	25

Fuente: (Asociación Americana para Ensayos y Materiales)

### 2.2.6.3. Sistema de clasificación Superpave o clasificación por desempeño (PG)

El sistema de clasificación de asfalto de Superpave es denominado sistema de clasificación por desempeño PG, se relacionan las propiedades del cemento asfáltico con su comportamiento en servicio, los valores límite fueron desarrollados para evitar las fallas que puedan producirse bajo diferentes temperaturas. Los valores mínimos para  $G^* = \sin \delta$  se establecieron en 1,00 y 2,20 kPa para asfaltos envejecidos con RTFO (horno rotatorio con temperatura y presión) y asfaltos no envejecidos, respectivamente, para hacer frente a la deformación permanente. Por lo tanto, el cemento asfáltico debe probar que a la temperatura de servicio esperada, el valor de  $G^* = \sin \delta$  o estará por debajo de estos valores.

Las pruebas de clasificación PG no están vinculadas a una temperatura fija, están vinculadas a las temperaturas de servicio previstas. Del mismo modo, los valores límite para otras propiedades se establecieron para hacer frente a fisuras por baja temperatura y fisuras por fatiga. En el siguiente gráfico se muestra las especificaciones de la norma ASTM D6373 "Especificación Estándar para el Asfalto graduado por desempeño".

**Tabla 2.3: Grados asfálticos por desempeño (PG)**

<b>Grados de alta temperatura (°C)</b>	<b>Grados de baja temperatura (°C)</b>
PG 46	-34, -40, -46
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
PG 58	-16, -22, -28, -34, -40
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 76	-10, -16, -22, -28, -34
PG 82	-10, -16, -22, -28, -34

Fuente: (Asociación Americana para Ensayos y Materiales)

El sistema PG especifica los asfaltos mediante la temperatura más alta y la más baja. Por ejemplo, un PG 64-22 está especificado para una temperatura máx. diaria prevista para un promedio de 7 días de 64°C y una temperatura mín. de diseño del pavimento de -22°C.

### 2.2.7. Especificaciones técnicas

En Bolivia, la Administradora Boliviana de Carreteras "ABC" es la entidad encargada de velar porque se cumplan las especificaciones sobre asfaltos de pavimentación, incluidas en el libro Manual de Ensayo de Suelos y Materiales \*Asfaltos. (Carreteras, 2008). Éstas se basan en las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

#### 2.2.7.1. Normas

**Tabla 2.4: Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos.**

<b>Ensayo</b>	<b>AASHTO</b>	<b>ASTM</b>
Viscosidad	T-201	D-2170
	T-202	D2171
Penetración	T-49	D-5
Punto de inflamación	T-48	D-92
prueba de película delgada en horno	T-179	D-1754
Prueba giratoria de película delgada en horno	T-240	D-2872
Ductilidad	T-51	D-113
Solubilidad	T-44	D-2042
Peso específico	T-228	D-70
Punto de ablandamiento	T-533	D-3695

Fuente: (Dina Avellan, 2014)

### 2.2.7.2. Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas 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 100 gr y que la carga se aplica durante 5seg. La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D5 - AASHTO T49-97).

**Figura 2.5:** Ensayo de penetración



Fuente: Manual del Instituto del asfalto

### 2.2.7.3. Ensayos de viscosidad

Consiste en determinar el tiempo en segundos que demora en fluir 60 ml de muestra, a través de un orificio calibrado, medido bajo condiciones cuidadosamente controladas. El tiempo obtenido se corrige por un factor que depende de la abertura del orificio, el cual es reportado como la viscosidad de la muestra a la temperatura de ensayo. Típicamente las temperaturas para los ensayos que estiman la viscosidad se especifican a 60°C viscosidad dinámica y 135°C que es la viscosidad cinemática con la finalidad de proporcionar valores límites de consistencia.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E-102.

**Figura 2.6:** Equipo viscosímetro



Fuente: Manual del Instituto del asfalto

### 2.2.7.4. Ensayo de punto de inflamación mediante la Copa Abierta de Cleveland

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más alta a 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 sólo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Se determina para identificar la temperatura máxima a la cual éste puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. El aparato utilizado con este fin es llamado Copa Abierta de Cleveland.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-92).

**Figura 2.7:** Equipo de punto de inflamación cuchara de Cleveland



Fuente: Manual del Instituto del asfalto

#### **2.2.7.5. El Punto de ablandamiento**

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Consiste en llenar de asfalto fundido dos anillos de latón de dimensiones normalizadas.

Las muestras así separadas se suspenden de un baño de agua destilada y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. 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 25 mm. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en el método ASTM D-36.

**Figura 2.8:** Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Fuente: Manual del Instituto del asfalto

#### **2.2.7.6. Ensayo de Ductilidad**

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. Al contrario que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de  $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ .

Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad. Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-113 AASHTO T51-00).

**Figura 2.9:** Ensayo de ductilidad



Fuente: Manual del Instituto del asfalto

#### **2.2.7.7. Peso Específico**

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del asfalto que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea también como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. 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 expansiona cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Para fijar condiciones determinadas aplicables a un valor dado del peso específico, debe indicarse la temperatura del material

y la del agua. Así por ejemplo P.E. a 25/25 °C indica que la determinación se ha hecho con ambos materiales a una temperatura de 25° C.

El peso específico del asfalto se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos ASTM D-70.

### **2.3. CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO.**

Con el pasar de los años se fue comprobando que los asfaltos convencionales no son capaces de resistir a temperaturas extremas (elevadas y bajas temperaturas) que presentan muchos países, las condiciones climáticas, humedad y el exceso de carga. Esto se ve reflejado en los pavimentos construidos que presentan deterioros prematuros, debido a fallas por ahuellamiento, mala adherencia, etc. sin mencionar la mala ejecución y control de calidad deficiente en el diseño de la misma. Además en la última década el parque automotor incrementó considerablemente provocando altos índices de tráfico vehicular. Es así que hace más de sesenta años se investiga y se busca mejorar la calidad del cemento asfáltico induciendo en incorporar ciertos productos a la mezcla con la finalidad de mejorar alguno de sus propiedades, tal que su aplicación sea más eficaz bajo diferentes condiciones desfavorables de servicio. Se presentan casos en los que las características de las mezclas asfálticas obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica. (Lizcano & Quintana, 2015) .

Las mezclas asfálticas convencionales tienen limitaciones en cuanto a su resistencia a la deformación permanente y el fisuramiento, en especial cuando se tratan de solicitaciones mayores como el caso de tráfico canalizado, climas severos o elevadas cargas por eje. No obstante, el nacimiento del sistema de clasificación de asfaltos PG dio un nuevo impulso para el desarrollo de productos y el uso creciente de asfaltos modificados con polímeros. La adición de polímeros al asfalto, por lo general, incrementa el valor de la temperatura más alta en la clasificación PG del asfalto; sin embargo, dependiendo del tipo de polímero, el grado de baja temperatura puede aumentar o disminuir. Los asfaltos modificados con polímeros pueden mejorar la resistencia a la deformación permanente, fisuramiento térmico, grietas por fatiga y daños por humedad. Como regla general, en

los asfaltos clasificados por el sistema PG, si la diferencia numérica entre grados es mayor a 92, requieren de polímeros.

Por ejemplo, la diferencia numérica de un PG 72-28 es de 100, por lo tanto, es probable que el asfalto requiera ser modificado con polímeros. (Luis Guillermo Loría-Salazar, 2024)

### 2.3.1. Principales modificadores utilizados en el cemento asfáltico.

Los polímeros utilizados en el asfalto se pueden clasificar por sus propiedades físicas. Con base en su respuesta a la deformación se pueden clasificar como plastómeros o elastómeros. Plastómeros son aquellos que no se recuperan de la deformación luego de que la carga ha sido retirada. Elastómeros son aquellos que vuelven a su forma original cuando se libera la carga. La mayoría de las poliolefinas, tales como el polietileno, polipropileno, etileno y acetato de vinilo (EVA), se consideran plastómeros; mientras que el estireno - butadieno (SBR) y estireno - butadieno - estireno (SBS) se clasifican en elastómeros. (Luis Guillermo Loría-Salazar, 2024)

**Tabla 2.5: Aditivos para modificar el asfalto**

<b>Tipo de modificador</b>	<b>Tipo</b>
Elastómeros Termoplásticos	SBS (estireno butadieno estireno)
	SBR(estireno butadieno)
	SIS(estireno-isopreno-estireno)
	SEBS(estireno-etileno-btadieno-estireno)
	Cauchos naturales: Isopreno
	Cauchos artificiales: Neopreno
	Neumáticos usados
Termoplásticos	PE(Polietileno)
	PP(Polipropileno)
	EVA(etileno acetato de vinilo)
	PVC(policloruro de vinilo)
	PS(Poliestileno)
Modificadores químicos	Componentes organo-metalicos
	Sulfuros
	Linignos
Fibras	Celulosa
	Silicato aluminio-magnesio
	Fibra de vidrio
	Asbesto
	Poliéster
	Prolipropileno

<b>Tipo de modificador</b>	<b>Tipo</b>
Mejoradores de adherencia	Aminas organicas
	Aminas
Antioxidante	Aminas
	Fenol
	Componentes organicos-zinc
Asfaltenos naturales	Asfaltos de Trinidad
	Gilsonita
	Rocas asfálticas
Fillers	Carbon
	Cal hidratada
	Cal
	Cenizas volantes

Fuente: (Read and Whiteoak, 2003)

Los modificadores le permiten al diseñador intervenir sobre las características mecánicas del asfalto. Entre otras, se puede mencionar la reducción de la susceptibilidad térmica, en la búsqueda de unas características reológicas constantes, especialmente a elevadas temperaturas de servicio. En consecuencia, ello implica modificar las propiedades de las mezclas, en el sentido de disminuir tanto la deformación plástica a alta temperatura como la rigidez a baja temperatura, ofreciendo un mejor comportamiento en servicio ante la acción de las cargas circulantes más pesadas del tránsito, independientemente de las condiciones climáticas imperantes. Un asfalto sin modificar presenta un cambio continuo de sus características en todo el rango de temperaturas de operación. El asfalto ideal es aquel que muestra una característica más o menos constante en un amplio rango de temperaturas de servicio, convirtiéndose en un fluido viscoso a las temperaturas de mezcla y compactación. (Luis Guillermo Loría-Salazar, 2024)

### **2.3.2. Beneficios de la modificación del asfalto**

Los principales beneficios que se persiguen con la modificación del asfalto:

- Aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente.
- Reducir la rigidez a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Mejorar la adhesión con los agregados pétreos.

- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados en la vida inicial de los tratamientos superficiales.
- Reducir el endurecimiento en servicio, brindando una vida superior a la mezcla, debido a la retención de sus ventajas iniciales.
- Disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio.
- Aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte, permitiendo mejores espesores de película en el agregado de las mezclas abiertas y reduciendo la exudación en tratamientos superficiales.

### **2.3.3. Aplicaciones de los asfaltos modificados**

Los campos de aplicación más frecuentes de estos materiales son:

#### **a) Mezclas drenantes o porosas**

Las mezclas bituminosas drenantes tienen un porcentaje muy elevado de vacíos en la mezcla (superior al 20%) y una proporción de agregado fino muy baja {inferior al 20%}, por lo que el ligante debe tener una buena cohesión para evitar la disgregación de la mezcla. Además el ligante necesita una elevada viscosidad para proporcionar una película de ligante gruesa que envuelve a los agregados y evitar los efectos perjudiciales del envejecimiento y de la acción del agua en este tipo de mezclas tan abiertas.

#### **b) Mezclas en caliente en capas delgadas (microaglomerados en caliente)**

Son capas de rodadura de muy reducido espesor y tienen su aplicación sobre pavimentos estructuralmente buenos en los que se les busca restaurar la resistencia al deslizamiento y mejorar la comodidad de la circulación garantizando bajos niveles de sonoridad, o bien se desea una actuación de mantenimiento periódico de la calzada prolongando su vida útil intentando, simultáneamente, impedir un incremento excesivo de las cotas que generen problemas con bordillos, por sobrecargas excesivas en puentes y viaductos o por pérdida de gálibo en túneles o pasos inferiores. Estas mezclas se elaboraban con cementos asfálticos convencionales y agregados de granulometría continua con tamaño máximo muy pequeño, estas capas presentaron problemas de comportamiento, en especial por corrimientos sobre el soporte en zonas con pendientes fuertes o bajo la acción del tránsito pesado, así como en glorietas, curvas de bajo radio y áreas de frenado permanente. Además, por su reducido espesor, la durabilidad era escasa, obligando intervenciones de mantenimiento periódico. El ligante debe ser modificado con

polímeros, preferiblemente del tipo SBS y aplicado en una dosificación del orden de 5.5% con respecto al peso de los agregados.

**c) Mezclas bituminosas altamente resistentes para capa de rodadura**

En tramos de gran intensidad de tráfico pesado y canalizado, como en las vías lentas, se requiere que las mezclas tengan una buena resistencia a las deformaciones plásticas y a la fatiga. En estos casos, los asfaltos modificados con polímeros presentan escasa susceptibilidad a la temperatura y buenas propiedades mecánicas, por lo que son asfaltos adecuados para este tipo de mezclas.

**d) Tratamientos superficiales mediante riego con gravilla**

Los asfaltos modificados con polímeros y las emulsiones con ellos fabricadas son adecuados para riegos en vías de fuerte intensidad de tráfico y/o en zonas climáticas con temperaturas extremas, porque el ligante debe tener una buena cohesión en un amplio intervalo de temperatura y una buena susceptibilidad térmica, con el fin de evitar la exudación del ligante durante el verano, así como la pérdida de gravilla en el invierno.

**e) Lechadas bituminosas**

En carreteras de fuerte intensidad de tráfico y/o con climas con temperaturas extremas se deben emplear emulsiones fabricadas utilizando asfaltos modificados con polímeros para evitar la exudación del ligante y para proporcionar la cohesión que evite el desprendimiento de gravilla, especialmente en las de mayor tamaño máximo del árido. Aparte de las lechadas convencionales, las emulsiones modificadas con polímero son el ligante ideal para las lechadas de granulometría discontinuas (discontinuidad 2-4 mm).

**Mezclas de alto módulo**

Son mezclas bituminosas con granulometría continua que tienen un porcentaje de filler entre el 8-10% y son fabricadas con asfalto especial de penetración 10- 20, o bien con asfalto modificado con polímeros de muy baja penetración. Estas mezclas presentan módulos muy altos, similares a los de la grava cemento y son, por lo tanto, muy adecuados para reforzar calzadas cuando hay limitaciones de espesor. Como capa de rodadura se suele aplicar mezcla bituminosa delgada. En los pavimentos nuevos se emplea este tipo de mezclas como capa de base para sustituir las bases estabilizadas con cemento evitando los problemas de fisuraciones o bien las mezclas bituminosas reduciendo su espesor.

Los Asfaltos Modificados son obtenidos por la combinación de un modificante y asfaltos compatibles entre sí, favoreciendo la obtención de mezclas con mayor durabilidad y elasticidad principalmente, una primera instancia la modificación se realizó con la adición de polímeros tipo elastómero y plastómero. (Luis Guillermo Loría-Salazar, 2024)

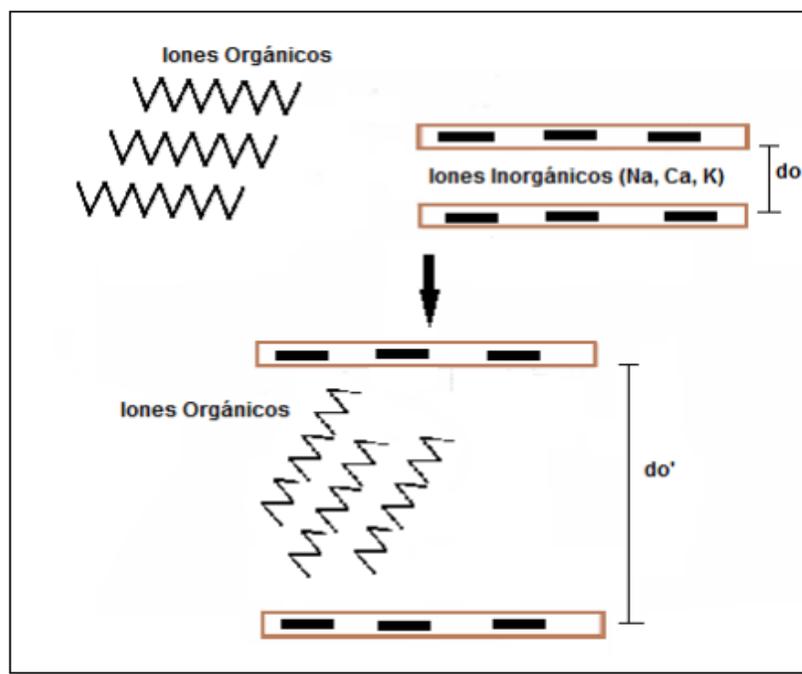
#### 2.4. NANOARCILLA

Para poder entender de una mejor manera el concepto de nanoarcilla se necesita conocer el significado de nanociencia y nanotecnología.

La Royal Society define la nanociencia como el estudio de la manipulación de fenómenos y materiales a escala atómica, macromolecular y molecular cuyas propiedades difieren significativamente de las de gran escala.

La nanotecnología se puede definir como el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas que controlan la forma y el tamaño a nano escala. Así se puede decir que arcillas manejadas a nivel nanométrico son llamadas Nanoarcillas, y dependiendo de su aplicación el diseño de su estructura podría variar. Empresas comercializadoras son los responsables del nombre nanoarcilla. El nombre científicamente aceptado es órgano arcilla.

**Figura 2.10:** Nanoarcilla de bentonita



Fuente: Fuente: (CIMATEL, 2024)

A la nanoarcilla u órgano arcilla se le conoce como un material híbrido el cual significa que es orgánico e inorgánico, en el que los cationes inorgánicos como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ , etc. entre capas de arcilla son reemplazados por cationes orgánicos, lo que da como resultado la adición de tetraedros de silicio entre capas para facilitar el paso. a través de las capas penetración de modificadores interorgánicos. (LeBarn, Pinnavaia y Wang, 1998).

#### **2.4.1. Definición**

La definición de nanoarcilla es la de una arcilla que puede modificarse para que los complejos arcillosos sean compatibles con monómeros y polímeros orgánicos. Las arcillas comunes son minerales que se producen y por tanto, están sujetas a variaciones naturales en su formación.

La pureza de la arcilla desempeña un papel importante a la hora de afectar a las propiedades del nanocompuesto, y la arcilla contiene silicatos de alúmina, que tienen una estructura en capas. También incluye el tetraedro de sílice  $\text{SiO}_4$  unido al octaedro de alúmina  $\text{AlO}_6$  de varias maneras. Los resultados del límite plástico se sitúan entre el 85,4 y el 87,5%. (Pacheco-Torgal, et al., 2018)

**Figura 2.11:** Nanoarcilla de bentonita



Fuente: (CIMATEL, 2024)

### 2.4.2. Tipos de nanoarcilla

Hay varios tipos diferentes de arcillas que se utilizan en los sistemas de administración de fármacos, como el caolín, montmorillonita, saponita, laponita y halloysita. La montmorillonita (MMT) se ha convertido popular entre otras arcillas debido a su alta disponibilidad, respeto al medio ambiente y bien estudiado químicamente. MMT es un material natural con toxicidad baja o nula, área de superficie interna alta, alto contenido de cationes capacidad de intercambio (CEC), alta capacidad de adsorción e hinchamiento y buena biocompatibilidad. MMT es una capa silicato de aluminio hidratado que pertenece al grupo de filosilicatos de las esmectitas. (Rojas Vizúete, 2022) Algunos de los tipos de nanoarcillas más comunes incluyen:

- **Montmorillonita:** La montmorillonita es una arcilla esmectita y uno de los tipos más comunes de nanoarcillas. Es conocida por su alta capacidad de hinchamiento y su estructura laminar, lo que la hace útil en aplicaciones como nanocompuestos de polímeros.
- **Bentonita:** La bentonita es otra arcilla esmectita que se utiliza en la fabricación de nanoarcillas. Tiene propiedades similares a la montmorillonita y se emplea en aplicaciones similares.
- **Caolinita:** La caolinita es una arcilla de tipo caolín, y las nanoarcillas basadas en caolinita tienen una estructura de partícula en capas, lo que las hace útiles en aplicaciones de recubrimientos y materiales compuestos.
- **Halloysita:** La halloysita es una arcilla tubular y se utiliza en la fabricación de nanoarcillas tubulares. Estas nanoarcillas se destacan por su forma tubular y se emplean en diversas aplicaciones, incluidos los nanocompuestos de polímeros y los recubrimientos.
- **Palygorskita:** La palygorskita es otra arcilla que se ha utilizado para producir nanoarcillas. Tiene una estructura de fibras finas y se utiliza en aplicaciones de nanocompuestos.
- **Sepiolita:** La sepiolita es otra arcilla fibrosa que se utiliza en aplicaciones de nanocompuestos y en la fabricación de materiales compuestos.

La elección del tipo de nanoarcilla depende de las propiedades deseadas en el material compuesto o polímero y de la aplicación específica. Las nanoarcilla a emplear para

dicho proyecto es la nanoarcilla de bentonita se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera en una amplia gama de productos y materiales. (Rojas Vizúete, 2022)

#### **2.4.3. Composición química de la nanoarcilla de bentonita.**

La composición química de la nanoarcilla de bentonita incluye los siguientes elementos:

- Silicio (Si): El silicio es un componente principal en la estructura de las arcillas y forma parte de los silicatos presentes en las nanoarcilla de bentonita.
- Aluminio (Al): El aluminio es otro componente principal de los silicatos en las nanoarcilla de bentonita y se encuentra en la estructura de estas.
- Oxígeno (O): El oxígeno se encuentra en forma de grupos de oxígeno enlazados con silicio y aluminio para formar tetraedros y octaedros en la estructura cristalina de las arcillas.
- Hidrógeno (H): El hidrógeno se encuentra enlazado con los grupos de oxígeno y forma parte de la estructura hidratada de las arcillas.

#### **2.4.4. Propiedades de la nanoarcilla de bentonita.**

Algunas de las propiedades más destacadas de las nanoarcilla de bentonita incluyen:

- Gran área superficial: Las nanoarcilla de bentonita tienen una gran área superficial debido a su estructura laminar y la reducción de tamaño a la escala nanométrica. Esto facilita la interacción con otros materiales y permite una mayor absorción y adsorción de sustancias.
- Capacidad de hinchamiento: Las nanoarcilla de bentonita tienen la capacidad de hincharse cuando entran en contacto con líquidos, como agua. Este hinchamiento es el resultado de la absorción de agua entre las capas de la nanoarcilla, lo que aumenta significativamente su volumen.
- Mejora de resistencia mecánica: La adición de nanoarcilla de bentonita a polímeros puede mejorar significativamente sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, la dureza y la rigidez. Esto hace que los materiales compuestos sean más fuertes y resistentes.
- Mejora de propiedades térmicas: La nanoarcilla de bentonita pueden mejorar la estabilidad térmica de los materiales, ayudando a retardar la degradación térmica y aumentar la resistencia a altas temperaturas.

- Reducción de inflamabilidad: En algunas aplicaciones, la incorporación de nanoarcilla de bentonita puede mejorar la resistencia al fuego y reducir la inflamabilidad de los materiales.
- Mejora de la viscosidad: La adición de nanoarcilla de bentonita a líquidos puede aumentar la viscosidad, lo que es útil en la formulación de productos como pinturas y lubricantes.

Estas propiedades hacen que las nanoarcilla de bentonita sean versátiles y útiles en una variedad de aplicaciones en industrias como la de polímeros, alimentos, farmacéutica, cosméticos, materiales de construcción y más. (Rojas Vizuite, 2022)

#### **2.4.5. Ventajas de la nanoarcilla de bentonita.**

La incorporación de nanoarcilla de bentonita en el cemento asfáltico puede ofrecer una serie de ventajas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Algunas de las ventajas específicas de esta aplicación incluyen:

- Mejora de la resistencia mecánica: La nanoarcilla de bentonita fortalece el cemento asfáltico, lo que resulta en una mayor resistencia a la tracción, la flexión y la fatiga de la mezcla asfáltica. Esto aumenta la vida útil del pavimento y reduce la necesidad de reparaciones frecuentes.
- Mayor estabilidad térmica: La nanoarcilla de bentonita aumenta la estabilidad térmica del cemento asfáltico, lo que significa que puede resistir mejor las fluctuaciones de temperatura, la expansión y la contracción térmica. Esto es crucial para evitar la formación de grietas y deformaciones en la superficie del pavimento.
- Mayor durabilidad: Debido a su capacidad de mejorar la resistencia al desgaste y la erosión, el cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita tiene una vida útil más larga, lo que disminuye la necesidad de mantenimiento y repavimentación frecuente.
- Reducción de deformaciones permanentes: La nanoarcilla de bentonita mejora la capacidad del pavimento para resistir la deformación permanente, lo que es especialmente importante en áreas con alto tráfico de vehículos pesados y altas temperaturas.

- Mayor resistencia a la fatiga: El asfalto modificado con nanoarcilla de bentonita puede soportar mejor el estrés cíclico y la fatiga causada por la carga repetida de vehículos, lo que contribuye a una mayor durabilidad del pavimento.
- Mejora de la resistencia al agrietamiento: La nanoarcilla de bentonita ayuda a reducir la formación de grietas en el pavimento, lo que a su vez reduce la infiltración de agua y aumenta la vida útil del pavimento.
- Mejora de la adhesión: La nanoarcilla de bentonita mejora la adhesión entre las partículas de agregado y la matriz asfáltica, lo que contribuye a una mejor cohesión y estabilidad del pavimento.
- Mayor resistencia al agua y al envejecimiento: El asfalto modificado con nanoarcilla de bentonita es menos susceptible al daño causado por el agua y el envejecimiento, lo que contribuye a una mayor durabilidad del pavimento.
- Mejora de la sostenibilidad: Al reducir la necesidad de mantenimiento y repavimentación frecuente, el asfalto modificado con nanoarcilla de bentonita puede contribuir a una mayor sostenibilidad en la construcción de carreteras.

#### **2.4.6. Importancia de la Nanoarcilla de bentonita.**

Una de las razones básicas por las que la nanoarcilla de bentonita pueden tener importantes aplicaciones en ingeniería de pavimentos es que éstas poseen grandes áreas superficiales, por lo que su contacto con el asfalto es mejor y así se garantiza en mejor medida la mejora en muchas propiedades de éste y de las mezclas elaboradas con él. (Vargas Ballesteros, 2011)

### **2.5. MEZCLA ASFÁLTICA**

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

El objetivo principal del diseño de mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en Determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.

- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de la colocación.
- Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

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. (Amaya Marrugo, 2016)

### **2.5.1. Clasificación de las mezclas asfálticas**

Existen varios parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas, para establecer las diferencias entre las distintas mezclas se mencionara la siguiente clasificación:

#### **2.5.1.1. Mezclas asfálticas en caliente:**

Estas mezclas son utilizadas en carpetas asfálticas de alta resistencia estructural elaboradas en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla a temperaturas mayores de 110°C.

#### **2.5.1.2. Mezclas asfálticas en frío:**

Son aquellas que emplean emulsiones asfálticas o asfaltos diluidos como aglutinante del material pétreo, elaboradas en una planta mezcladora móvil.

#### **2.5.1.3. Mezclas asfálticas por el sistema de riegos:**

Se colocan sobre una carpeta asfáltica nueva o existente con el objeto de proporcionar resistencia al deslizamiento y al pulimiento. Estas requieren para su construcción uno, dos o hasta tres riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes.

### **2.5.2. Diseño de una mezcla asfáltica**

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniera, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción.

El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular

### **2.5.3. Método Marshall**

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marchall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados unidos en los años 40. Después se hicieron avances y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones propiamente mencionado.

Es una técnica ampliamente utilizada en ingeniería civil para diseñar mezclas asfálticas para pavimentos. Se basa en la preparación de mezclas de asfalto con diferentes proporciones de agregados y asfalto, y en la evaluación de sus propiedades mecánicas a través de una serie de ensayos. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64mm. (2 ½") de alto y 102 mm. (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559).

Las características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad, vacíos en la mezcla, los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas. (Riaño, 2014)

Este método te permitirá obtener datos detallados sobre cómo la nanoarcilla de bentonita afecta las propiedades de las mezclas asfálticas, y es fundamental para validar si la modificación resulta en mejoras significativas en el rendimiento del asfalto.

**Figura 2.12:** Equipo Marshall



Fuente: Manual del Instituto del Asfalto.

### **2.5.3.1. Propiedades Método Marshall**

Es una característica mensurable capaz de calificar un comportamiento o una respuesta del mismo a sollicitaciones externas (Martinez-Arguelles, 2018)

#### **2.5.3.1.1. Fluencia**

La fluencia Marshall es la deformación plástica que ocurre en la mezcla asfáltica bajo la carga máxima aplicada durante el ensayo de estabilidad. Se mide en milímetros como la distancia máxima que la muestra se deforma antes de la falla. Evalúa la resistencia a la deformación plástica bajo carga, lo cual afecta la resistencia al rutado y la estabilidad a largo plazo del pavimento.

#### **2.5.3.1.2. Estabilidad**

La estabilidad Marshall es la carga máxima que una mezcla asfáltica puede soportar antes de fallar o deformarse significativamente. Se mide durante el ensayo de carga

Marshall, en el cual una muestra compactada se somete a una carga axial hasta la falla. Indica la capacidad de la mezcla para soportar cargas sin deformarse excesivamente, lo que es crucial para la durabilidad del pavimento.

#### **2.5.3.1.3. Contenido Óptimo de Asfalto (OAC)**

El contenido óptimo de asfalto es el porcentaje de asfalto en la mezcla que proporciona el equilibrio adecuado entre las propiedades mecánicas y la durabilidad. Se determina mediante la evaluación de diferentes mezclas con distintos contenidos de asfalto y seleccionando el que ofrece el mejor rendimiento. Asegura que la mezcla tenga suficiente asfalto para cubrir los agregados y proporcionar durabilidad sin ser excesivamente grasosa.

#### **2.5.3.1.4. Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica (VMA)**

El contenido de vacíos en la mezcla asfáltica es el volumen de vacíos presentes en la mezcla después de la compactación, expresado como porcentaje del volumen total. Se calcula a partir de la masa, el volumen y la densidad de la mezcla compactada. Influye en la durabilidad y la resistencia a la deformación plástica. Un contenido adecuado de vacíos ayuda a evitar la acumulación excesiva de agua y la reducción de la adhesión entre los agregados y el asfalto.

#### **2.5.3.1.5. Contenido de Vacíos en los Agregados (VFA)**

El contenido de vacíos en los agregados es el porcentaje de vacíos llenos de asfalto dentro de la mezcla asfáltica. Indica cuánto del volumen de vacíos en la mezcla está efectivamente llenado con asfalto, lo que afecta la resistencia al deslavado y la durabilidad.

#### **2.5.3.1.6. Densidad Máxima (Gmm)**

La densidad máxima es la densidad teórica de la mezcla asfáltica sin vacíos, basada en la masa y el volumen de los materiales. Se obtiene utilizando un aparato de laboratorio para medir la densidad máxima a partir de la masa y el volumen de una muestra. Permite calcular otros parámetros importantes como el contenido de vacíos en la mezcla y en los agregados.

#### **2.5.4. Preparación de muestras de ensayo**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparados haciendo cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de

contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado por el método de área superficial donde se calcula un contenido de cemento asfáltico mínimo, que se usa como dato de partida juntamente con los agregados de la mezcla.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfrie la superficie de mezcla al golpearla.
- Las briquetas se compactan mediante golpes del martillo Marshall de compactación, el número de golpes de martillo (35.50.75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada.

#### **2.5.5. Procedimiento del ensayo**

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de estabilidad y fluencia Marshall, análisis de la densidad y el contenido de vacíos de probetas.

#### **2.5.6. Ensayos de estabilidad y fluencia**

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en un baño de agua 60 °C. Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y uno de los medidores de carga y deformación (fluencia)
- La carga de ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51mm por minuto hasta que la muestra falle. La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

### 2.5.7. Criterios de diseño normalizado

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos en la normas AASHTO Y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

**Tabla 2.6: Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.**

Característica	Valor
Densidad relativa , mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena,% mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua,% máximo	25

Fuente: SCT, 2003.

**Tabla 2.7: Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados**

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T27	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque es función de ellas se conoce de ante mano que clase de textura tendrá la carpeta
	ASTM C136	
Desgaste	AASHTO T96	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste de abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
	ASTM C131	
	ASTM C88	
Equivalente de arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.

<b>Ensayo de laboratorio para agregados</b>	<b>Norma</b>	<b>Propósito</b>
Cubicidad de partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos	AASHTO T 84	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la combinación seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo
	AASHTO T 85	
	ASTM C-127	
	ASTM C-128	
Peso unitario y vacío	AASHTO T 19	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Proctor) es la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.
	ASTM C-29M	

Fuente: The Asphalt Institute.

## **2.6. MARCO NORMATIVO**

En Bolivia todo lo que concierne al mantenimiento, características, modificaciones y conservación de la infraestructura vial está normalizado por la ASTM. El presente proyecto se realizó teniendo en cuenta diferentes aspectos de las especificaciones establecidas por la ASTM para fundamentar y reglamentar las especificaciones

### **2.6.1. Normativa sobre cementos asfálticos vigente (ABC)**

El año 2008 la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), publica cinco manuales para diseño y construcción de pavimentos en Bolivia, en los cuales indica todos los

ensayos para control de pavimentos y asfaltos, basados en dos Normas de aplicación a nivel mundial; AASHTO y ASTM. (Carreteras, 2008)

### **2.6.2. Norma ASTM**

Fue fundado el 16 de mayo de 1898, como American Section of the International Association for Testing Materials por iniciativa de Charles Benjamin Dudley, entonces responsable del Control Calidad de Pennsylvania Railroad, quien tuvo la iniciativa de hacer que los hasta entonces rivales ferrocarriles y las fundiciones de acero coordinaran sus controles de calidad.

En el 2001 la ASTM asume su nombre actual: ASTM International como testimonio del interés que actualmente han alcanzado las técnicas de normalización. Tal es así que en los acápite correspondientes y durante el desarrollo del presente trabajo se enunciaran los ensayos de los cementos asfálticos, detallándolos por su nombre, seguido del código AASHTO, ASTM y ABC, por ejemplo:

- Ensayo de Ductilidad (ASTM D-113, AASHTO T-51-00)
- Penetración a 25°C (ASTM D5/AASHTO T49-97)
- Viscosidad saybolt furol a 135°C (ASTM D244)
- Punto de inflamación (ASTM D1310-01/ AASHTO T79-96)
- Peso específico (ASTM D71 / AASHTO T229-97)
- Punto de ablandamiento (ASTM D36/ AASHTO T53-96)

### **2.7. MARCO REFERENCIAL**

El cemento asfáltico es un material pegajoso de color negro a marrón oscuro, compuesto principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular. Se deriva de la destilación del petróleo crudo (Koole & Thagesen, 2004).

A lo largo del tiempo, la cifra de automóviles en las ciudades ha incrementado, de igual forma la rapidez en la cual circulan y las cargas admitidas, en las estructuras de pavimento su durabilidad se ha visto limitada y de igual manera su vida útil se ha visto reducida considerablemente debido a los diferentes climas y microclimas a las cuales están sometidas. (Y. Bustos, P. Sosa, N. Rodríguez y J. Calderón, “Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión,” *Inventum*, vol. 13, n° 24, pp. 58 - 77, 2018)

Los polímeros termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros (Castro, Rondón, & Barrero, 2016).

**CAPÍTULO III**  
**APLICACIÓN PRÁCTICA DEL**  
**CEMENTO ASFÁLTICO**  
**MODIFICADO CON**  
**NANOARCILLA DE**  
**BENTONITA**

### CAPÍTULO III

## APLICACIÓN PRÁCTICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON NANOARCILLA DE BENTONITA

### 3.1. UBICACIÓN

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas. Se solicitó mediante una carta a la alcaldía del municipio de Tarija de la provincia Cercado la donación del cemento asfáltico y agregados pétreos (grava, gravilla, arena), se procedió a extraer materiales de origen de la Planta de Almacenamiento de agregados y asfalto “La Pintada” que está ubicada en la comunidad La Pintada en las coordenadas:

Latitud: 21° 36'16,86" S

Longitud: 64°38'28,77" O

Zona: 20 K

Coordenada Este: 330099,57m E

Coordenada Norte: 7610035,55 m S

**Figura 3.1:** Ubicación de la planta de agregados y de asfalto La Pintada



Fuente: Google Earth

Se procedió llevar el cemento asfáltico más los agregados pétreos al laboratorio de asfalto de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para su conservación y

guardado para cuando se realice los ensayos de caracterización, se etiqueto y se dejó en el laboratorio que está en un ambiente controlado que solo pueden circular los estudiantes que soliciten el uso de la instalación del laboratorio, las muestras se guardan de manera segura donde no varía la temperatura gradualmente o es expuesto a agentes químico que puedan dañar la muestra.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DEL PROYECTO

#### 3.2.1. Unidad de muestra, población y tamaño de la muestra:

- **Unidad de muestra:** Ensayos de laboratorio de asfaltos.
- **Población:** Infinita, todos los ensayos de laboratorio de asfaltos.
- **Tamaño de la muestra:** Número confiables de ensayos.

#### 3.2.2. Tamaño de muestra

Se realiza de acuerdo a lo seleccionado en la unidad de muestra, asignada de manera directa el nivel de confianza de 95% considerando una población infinita, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.

**Unidad de muestra elemental:** Ensayos de laboratorio.

**Tamaño de muestra “n”:** desconocido

- Una investigación es exigente y por lo menos se tiene que establecer como nivel de confianza un  $NC = 95\%$ , de acuerdo a ello la variable estandarizada es  $Z = 1,96$  (tabla 3.1)

**Tabla 3.1:** Valores frecuentes de la variable estandarizada

<b>90</b>	1,64
<b>95</b>	1,96
<b>97</b>	2,17
<b>98</b>	2,33
<b>99</b>	2,58

Fuente: Guía de Proyecto de grado

- El margen de error es:  $e=5\%$ , deducido por el nivel de confianza que propone el investigador

- Por el corto tiempo establecido para la tarea, se puede asumir una varianza de  $\sigma^2 = 0,10$

**Tabla 3.2:** Fórmulas según tamaño de muestra

Tipo de población	Para medias poblacionales	Para proporciones poblacionales
Población infinita (muestreo aleatorio)	$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{\rho^2}$	$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{\rho^2}$
Población finita (muestreo aleatorio)	$n = \frac{Z^2 N \sigma^2}{(N - 1)e^2 + Z^2 \sigma^2}$	$n = \frac{Z^2 N p q}{(N - 1)e^2 + Z^2 p q}$
Población finita (muestreo estratificado)	$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$	$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i p q}{N}}$

Fuente: Guía de proyecto de Grado

Con el valor del número de ensayos que resultaba de utilizar el nivel de confianza del 95% y un error del 5% se procedió a usar este dato para estratificar el muestreo, sabiendo el listado de ensayos a realizar en el laboratorio.

**Tabla 3.3:** Cálculo de muestra estratificada

ETAPA	ENSAYOS	NI	s <sup>2</sup>	NI*s <sup>2</sup>	Fa	Ni
Preparación del aditivo nanoarcilla de Bentonita	Granulometría	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Peso específico	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Peso específico	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Punto de inflamación	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Punto de ablandamiento	3	0,15	0,45	0,011	2,00
Caracterización del cemento asfáltico 85-100	Ductilidad	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Penetración	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Pérdida de masa	3	0,15	0,45	0,011	2,00
	Viscosidad saybolt-furol	3	0,15	0,45	0,011	2,00

ETAPA	ENSAYOS	NI	s <sup>2</sup>	NI*s <sup>2</sup>	Fa	Ni
Prueba definitiva en varios porcentajes (0,5% , 1% ,2%, 3%, 4%)	Peso especifico	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Punto de inflamación	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Punto de ablandamiento	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Ductilidad	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Penetración	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Pérdida de masa	15	0,15	2,25	0,056	10,00
	Viscosidad saybolt-furol	15	0,15	2,25	0,056	10,00
Ensayos de caracterización de agregados (Grava, gravilla, arena, filler)	Granulometría	12	0,15	1,80	0,044	6,00
	Peso especifico	12	0,15	1,80	0,044	6,00
	Peso unitario	9	0,15	1,35	0,033	5,00
	Desgaste de los Angeles	6	0,15	0,90	0,022	4,00
	Equivalente de arena	3	0,15	0,45	0,011	2,00
Dosificación de briquetas	Pre diseño convencional	18	0,15	2,70	0,067	12,00
	Diseño con cemento asfáltico modificado óptimo	30	0,15	4,50	0,111	18,00
Ruptura de Briquetas	Pre diseño convencional	18	0,15	2,70	0,067	12,00
	Diseño con cemento asfáltico modificado óptimo	30	0,15	4,50	0,111	18,00
Resultados		<b>270</b>		<b>40,50</b>		<b>171,00</b>

Fuente: Elaboración propia

La siguiente ecuación es para un muestreo estratificado de la población, para saber aproximadamente el número de ensayos a realizar. Cálculo de muestra estratificada

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

$$n = \frac{300 * 0.10}{300 \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{300 * 0.10}{300}} = 171,00 \text{ ensayos}$$

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre 4 a 5 meses corresponde a 171 ensayos bien definido en cada categoría.

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

#### 3.3.1. Caracterización del cemento asfáltico

**Tabla 3.4:** Especificaciones Técnica del cemento asfáltico REPSOL

REPORTE DE ANALISIS DE CEMENTO ASFALTICO 85/100		LOTE No.85/100-001-12
<b>REFINERIA LA PAMPILLA S.A.A.</b> Carretera a Ventanilla km 25 B/N Ventanilla	<b>RECEPCIÓN DE LA MUESTRA</b> 01/12/2023 15:40:18	<b>FECHA DE CERTIFICACIÓN</b> 07/12/2023 11:22:05
<b>PRODUCTO</b> Cemento Asfáltico 85/100	<b>TANQUE</b> 342 C	<b>DESTINO DE PRODUCTO</b> Operaciones de Despacho
<b>PROCEDENCIA</b> Almacenamiento	<b>VOLUMEN CERTIFICADO,m<sup>3</sup></b>	<b>BUQUE TANQUE</b>
PROPIEDADES	MÉTODO ASTM/OTROS	RESULTADO
<b>PENETRACION</b>		
Penetración a 25 °C,100g. 5s, 1/10 mm	D5 / AASHTO T49	90
<b>DUCTILIDAD</b>		
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	>150
<b>VOLATILIDAD</b>		
Gravedad Especifica a 15.6 °C/15.6 °C	D 70 / AASHTO T 228	1,01
Punto de inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	312
Gravedad API, ° API	D 70 / AASHTO T 228	5,2
<b>FLUIDEZ</b>		
Punto de ablandamiento, °C	D 36	46,0
Viscosidad cinemática a 100°C,cSt	D 445	2618
Viscosidad cinemática a 135°C,cSt	D 2170 / AASHTO T 201	322
<b>ENSAYOS DE PELICULA FINA</b>		
Perdida por Calentamiento, % m	D 1754 / AASHTO T 179	0,14
Penetración retenida, 100g,5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	55,8
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	>150
<b>SOLUBILIDAD</b>		
Solubilidad en tricloroetileno, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99,91

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante

Para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron los mismos procedimientos del cemento asfáltico convencional como para el cemento asfáltico modificado con el aditivo de nanoarcilla de bentonita.

**Tabla 3.5:** Caracterización del cemento asfáltico 85-100

ORIGEN: PERÚ

ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
<b>Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97)</b>							
Lectura N°1	0,1 mm	96	84	82			
Lectura N°2	0,1 mm	83	82	85			
Lectura N°3	0,1 mm	85	89	93	<b>87</b>	85	100
Promedio	0,1 mm	88	85	87			
<b>Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97)</b>							
Peso Picnómetro	Gr	35,5	34,4	34,1			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	Gr	86	88,2	84,2			
Peso Picnómetro + Muestra	Gr	63,2	65,5	63,6	<b>1,027</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	Gr	86,9	89,1	85			
Peso Específico Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	1,031	1,027	1,025			
<b>Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)</b>							
	°C	260	265	264	<b>263</b>	232	-
<b>Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)</b>							
	°C	42,0	42,0	42,0	<b>42</b>	42	53
<b>Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)</b>							
	Cm	128	128	129	<b>128</b>	100	-
<b>Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C</b>							
	Seg					85	-
<b>Ensayo de la mancha</b>							
<b>Solvente gasolina standart</b>							
<b>Solvente gasolina-xilol, % xilol</b>							
<b>Solvente heptano-xilol,% xilol</b>							

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.1. Ensayo de penetración (ASTM D5 / AASHTO T49-97)

Este método de ensayo determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico ya sean semi-sólido y sólidos.

Durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100gr) a una temperatura fija (25 °C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5seg). Se denomina penetración a la distancia hasta la cual penetra la aguja, que se mide en décimas de milímetro/dmm (0,1 mm). Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

**Figura 3.2:** Medición de la penetración en el cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.6:** Resultado del ensayo de penetración del cemento asfáltico

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100g. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	96	84	82	<b>87</b>	85	100
	Lectura N°2	83	82	85			
	Lectura N°3	85	89	93			
	Penetración Promedio	88	85	87			

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.2. Ensayo de ductilidad (ASTM D 113 / AASHTO T 51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada.

Este ensayo consiste en armar el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubrir la superficie del plato con glicerina.

Verter el cemento asfáltico en un delgado chorro, de principio a fin hasta que el material cubra el nivel lleno del molde, dejar que se enfríen para un periodo de 30 a 40 minutos. Pasado el tiempo de espera se introduce las tres muestras en el baño de agua a 25°C, por un tiempo de 30 minutos.

**Figura 3.3:** Reposo de las briquetas en baño maría a 25°C



Fuente: Elaboración propia

Pasado el tiempo de 30 min se retira las muestras, y con la ayuda de una espátula caliente cortar el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel y nuevamente dejar en baño maría a 25°C por 90 min mínimamente.

Posteriormente quitar la briqueta del plato, despegar los pedazos laterales, e inmediatamente realizar el ensayo.

**Figura 3.4:** Desarmado de las briquetas y colocado al ductilímetro



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.7:** Resultados del ensayo de ductilidad

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C	cm	128	128	129	128	100	-

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.3. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310- 01 / AASHTO T 79-96).

El objetivo de esta práctica es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto (el cual representa las temperaturas críticas), por medio de la copa abierta de Cleveland. Cuando se calienta un asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "Vaso Abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Posteriormente se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a

intervalos de tiempo estipulados. Al observar una llama en dicho asfalto se debe realizar la lectura del termómetro y luego se registrar el dato lecionado.

El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

**Figura 3.5:** Registro de la temperatura del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.8:** Resultados del ensayo de punto de inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO	ENSAYO	ENSAYO	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación	°C	260	265	264	<b>263</b>	232	-

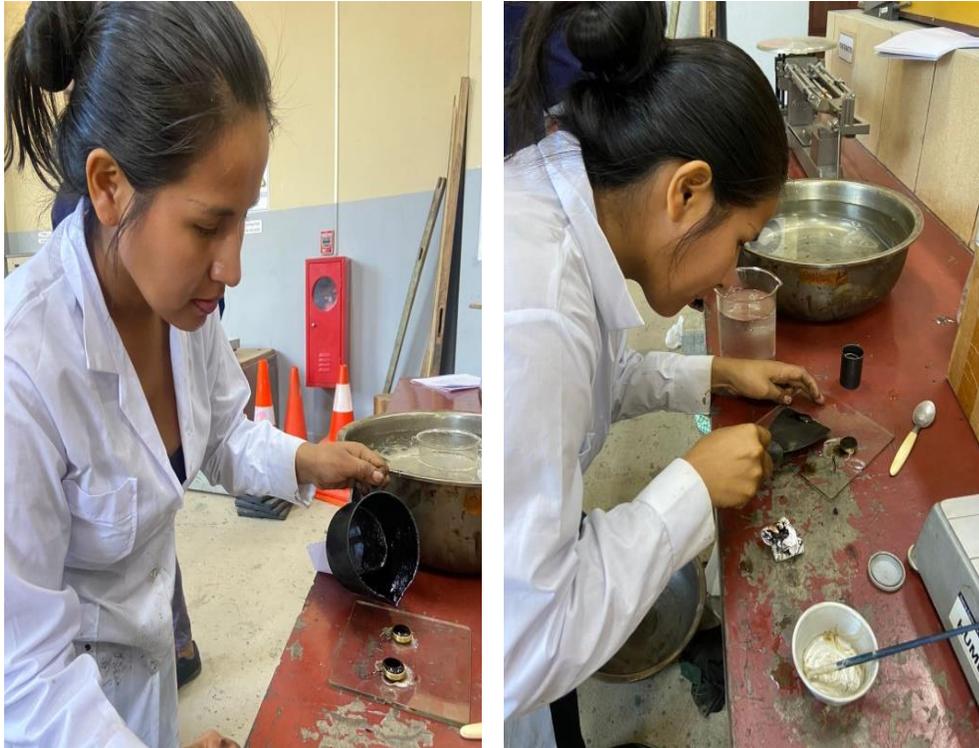
Fuente: Elaboración propia

#### **3.3.1.4. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 / AASHTO T 53-96)**

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

Consiste en cubrir la superficie de la base y los anillos un agente (glicerina). Luego verter el cemento asfáltico a los anillos y dejar reposar, enfriar durante 30 minutos. Una vez enfriado con la ayuda de una espátula previamente calentada, enrasar el exceso de cemento que quedo en ambos anillos.

**Figura 3.6:** Vaciado y enrasado del cemento asfaltico en los anillos



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, poner agua destilada en el vaso precipitado lo suficiente como para que la muestra quede totalmente bañada en el agua destilada y posteriormente llevar a baño maría a una temperatura de 5 °C, para llegar a dicha temperatura se colocan cubos de hielo al baño maría.

Una vez que el agua destilada se encuentre a una temperatura de 5°C, colocar los anillos, con las guías de centradoras de las esferas en el poseedor e introducir al vaso precipitado que se encuentra a 5°C.

Posteriormente asentar toda la fuente a una hornalla para calentar y lecturar la temperatura en el momento que las muestras toquen la base del vaso precipitado y registrar.

**Figura 3.7:** Medición de la temperatura del ensayo de intervalos pequeños



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9:** Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	42,0	42,0	42,0	42,00	42,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.5. Peso específico (ASTM D 71 / AASHTO T 229-97)

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Para la calibración de los picnómetros, se debe determinar y registrar el peso de los picnómetros, designando a cada uno con las letras “A, B, C”, una vez pesados llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergirlas en baño maría 25°C por 30 minutos.

Una vez pasado el tiempo propiamente dicho, de debe pesar y registrar. Posteriormente vaciar y secar superficialmente, verter el cemento asfáltico aproximadamente  $\frac{3}{4}$  del picnómetro y dejar hasta que alcance temperatura ambiente aproximadamente por 30 min y pesarlos nuevamente.

Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir a un baño maría 25°C por 30 minutos, para luego secar, pesar y obtener el último dato.

**Figura 3.8:** Vaciado del cemento asfáltico del ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10:** Resultados del ensayo de peso específico

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	35,5	34,4	34,1			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	86,0	88,2	84,2			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	63,2	65,5	63,6	<b>1,027</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	86,9	89,1	85,0			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,031</b>	<b>1,027</b>	<b>1,025</b>			

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Caracterización de la nanoarcilla de bentonita

#### 3.3.2.1. Ensayo del peso específico del aditivo de la nanoarcilla de bentonita

##### Calibración de frascos volumétricos (ASTM D854\_AASHTO T100)

La calibración de material volumétrico es una operación propia de un sistema de calidad. Los materiales volumétricos son elementos normalmente de vidrio para facilitar una dosificación o formulación apropiada. Es un material muy utilizado en laboratorios. El

material volumétrico cuantifica un volumen determinado mediante una escala impresa, o mediante mecanismos de dosificación.

**Materiales:**

- Frasco Volumétrico, con marca de enrase.
- Termómetro con aproximación de 0.01°C.
- Balanza con aproximación de 0.01 o 0.1 gramos
- Accesorios para baño María frío y caliente.
- Pipeta.
- Hielo.

**Limpieza de frasco volumétrico.**

Se debe lavar el frasco con agua jabonosa, luego se enjuaga con agua hasta eliminar el jabón, limpiar, secar, pesar y registrar la masa del picnómetro vacío. Posteriormente se debe lavar con alcohol, dejándolo escurrir; eliminando así los vapores al dejar el picnómetro boca abajo durante 15 min.

**Calibración.**

Se determina el peso del frasco seco, limpio y llenar el frasco con agua destilada hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración del 50% de su capacidad, luego se introduce el frasco en un baño María caliente y sometido al incremento de calor.

Se aplica el baño maría hasta que la temperatura en el centro del frasco este alrededor de unos 60°C. Luego se debe retirar el frasco del baño maría y complementar el agua a temperatura ambiente hasta 5 mm ; antes de la marca de enrase para poder llenarlo con la pipeta hasta el 100 % de su capacidad, se debe tener mucho cuidado al llenarlo hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase.

Luego se pesa el frasco con el agua hasta el enrase y se registra este dato. Para bajar la temperatura del agua, se debe hacer enfriar el frasco en baño maría frío (colocando hielo en una bandeja e introducir el matraz en el centro). Realizando cinco pesajes del frasco a cinco diferentes temperaturas.

El rango de temperaturas leídas es entre 30 a 15°C. Hay que mantener siempre la parte inferior del menisco en el nivel del enrase. Si existe pérdida de agua se debe llenar con agua destilada a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida

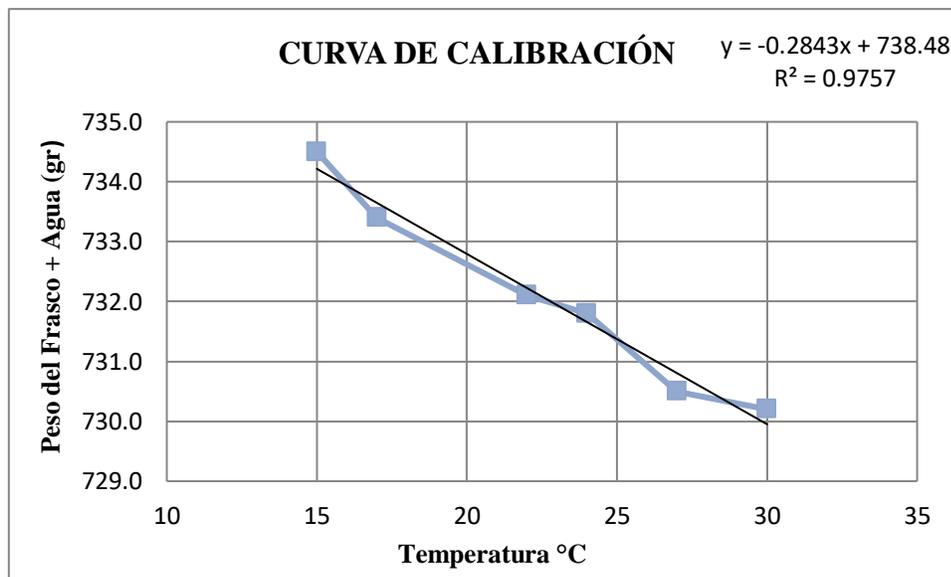
con la marca de calibración. Secar el exterior del picnómetro. Pesar y registrar la masa del picnómetro y el agua (Wfw).

**Tabla 3.11:** Cálculos de la calibración del frasco precipitado

Peso del frasco seco y limpio: 256,60 gr

Ensayo N°	Peso frasco + agua (gr)	Temperatura (°C)
1	730,20	30
2	730,50	27
3	731,80	24
4	732,10	22
5	733,40	17
6	734,50	15

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

### **Determinación del peso específico del aditivo de la nanoarcilla de bentonita**

Se debe pesar 80 gramos de suelo húmedo y colocar el suelo en un plato, añadir agua y mezclar hasta formar una pasta suave, posteriormente vaciar dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme.

Luego se debe extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos, para esto se debe rolar el frasco con mucho cuidado. Se debe someter el frasco de agua con suelo a efectos de

temperatura dentro de un baño María, hasta alcanzar una temperatura de 60°C en el centro del frasco.

Posteriormente pesar el frasco y luego medir la temperatura en el centro del frasco volumétrico.

Someter a un enfriamiento el frasco para repetir el proceso unas tres veces a diferentes temperaturas en un rango de 30°C a 15°C y registrar.

**Figura 3.9:** Ensayo del peso específico del aditivo nanoarcilla de bentonita



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12:** Cálculo para determinar el peso específico de la nanoarcilla de bentonita

Identificación de Ensayo	1				
Temperatura ensayada (°C)	30	28	24	20	16
Peso del suelo seco $W_s$	79,8	79,8	79,8	79,8	79,8
Peso del frasco + agua * $W_{fw}$	729,95	730,52	731,66	732,79	733,93
Peso del frasco + agua + suelo $W_{fsw}$	781,50	782,00	782,60	783,00	783,20
Peso específico	2,82	2,82	2,77	2,70	2,61
Factor de corrección $K^{**}$	0,9974	0,9980	0,9986	1,0025	1,0000
Peso específico corregido (gr/cm <sup>3</sup> )	2,83	2,83	2,77	2,69	2,61
Peso específico promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2,75</b>				

Fuente: Elaboración propia

### **3.3.2.2. Ensayo del análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM D422)**

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

Su objetivo de dicho ensayo es determinar la distribución granulométrica del material que pasa el tamiz N° 200, basándose en la relación de la velocidad de una esfera que cae libremente a través de un fluido y su diámetro.

#### **Materiales:**

- Hidrómetro
- Tamiz N° 200
- Termómetro de 0 a 100 °C
- Probeta graduada de vidrio de 1000 ml
- Silicato de sodio (defloculante)
- Agua destilada
- Cronómetro

#### **Muestra:**

Se requiere el peso en su estado seco entre 50 a 60 gramos

#### **Procedimiento:**

Se debe preparar 125 ml. de solución (agua con defloculante), el porcentaje del defloculante es aproximado en un 4% en peso de lo que pesa 1000 ml. de agua, y luego mezclarlo con la muestra de estudio.

Dejar a la muestra reposando durante 24 horas, luego transferir a un vaso donde se pueda batir el material, en este vaso se puede aumentar agua hasta 2/3 del volumen total del vaso, vaciar el contenido del vaso de mezclado, a una probeta graduada (que se llamará probeta de ensayo), y aumentar agua hasta llegar a los 1000 ml.

Se prepara una probeta patrón de control de 1000 ml. que contenga 125 ml. de solución dispersante al 4%, y verificar que las temperaturas sean iguales en ambas probetas.

La probeta de ensayo se debe tapar con un tapón (utilizar la palma de la mano si es necesario), para evitar que durante la agitación de la misma tenga pérdidas, la agitación tiene que ser alrededor de 1 minuto.

Luego de sacudir la probeta, poner sobre la mesa e introducir el hidrómetro tomando lecturas en los siguientes intervalos de tiempo 1, 2, 3, 4 minutos, realizando igualmente lecturas del termómetro.

**Figura 3.10:** Lecturación con el hidrómetro 152H



Fuente: Elaboración propia

### **3.3.2.2.1. Cálculos para el análisis granulométrico por medio del hidrómetro**

#### **Corrección de las Lecturas del Hidrómetro**

Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

#### **Corrección por menisco (cm.)**

La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado, y se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua.

**Hidrómetro tipo 152 H: cm. = 1,0 g/litro.**

#### **Corrección por temperatura ( $C_T$ )**

A cada una de las lecturas de hidrómetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura. Este factor puede

ser positivo o negativo, dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura.

**Tabla3.13:** Factores de corrección por temperatura CT

Temperatura(°C)	C <sub>T</sub>
15	-1,1
16	-0,9
17	-0,7
18	-0,5
19	-0,3
20	0
21	0,2
22	0,4
23	0,7
24	1
25	1,3
26	1,65
27	2
28	2,5
29	3,05
30	3,8

Fuente: Guía de Laboratorio

### Lectura de Hidrómetro Corregida

Calcúlense las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R) sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida (R'), la corrección por menisco Cm. o sea:

$$R = R' + C_m$$

### Cálculo del diámetro de las partículas (D)

El diámetro de las partículas de suelo en suspensión en el momento de realizar cada lectura de hidrómetro se calcula con la fórmula siguiente:

$$D(mm) = K\sqrt{(L/t)}$$

Donde:

L = Profundidad efectiva en cm de la siguiente tabla

t = Tiempo transcurrido en min.

**Tabla 3.14:** Valores del K para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas

TEMP. (° C)	PESO UNITARIO DE LOS SOLIDOS DEL SUELO (g/cm <sup>3</sup> )							
	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,85
16	0,0151	0,0148	0,0146	0,0144	0,0141	0,0139	0,0137	0,0136
17	0,0149	0,0146	0,0144	0,0142	0,014	0,0138	0,0136	0,0134
18	0,0148	0,0144	0,0142	0,014	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132
19	0,0145	0,0143	0,014	0,0139	0,0136	0,0134	0,0132	0,0131
20	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0134	0,0133	0,0131	0,0129
21	0,0141	0,0139	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127
22	0,014	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0128	0,0126
23	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132	0,013	0,0128	0,0126	0,0124
24	0,0137	0,0134	0,0132	0,013	0,0128	0,0126	0,0125	0,0123
25	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0122
26	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0124	0,0122	0,012
27	0,0132	0,013	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,012	0,0119
28	0,013	0,0128	0,0126	0,0124	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117
29	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,012	0,0118	0,0116
30	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,012	0,0118	0,0117	0,0115

Fuente: Guía de Laboratorio

**Tabla 3.15:** Valores de profundidad efectiva basados en hidrómetros y cilindros de sedimentación dados

Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm
0	16,3	31	11,2
1	16,1	32	11,1
2	16	33	10,9
3	15,8	34	10,7
4	15,6	35	10,5
5	15,5	36	10,4
6	15,3	37	10,2
7	15,2	38	10,1
8	15	39	9,9
9	14,8	40	9,7

10	14,7	41	9,6
11	14,5	42	9,4
12	14,3	43	9,2
13	14,2	44	9,1
14	14	45	8,9
15	13,8	46	8,8
16	13,7	47	8,6
17	13,5	48	8,4
18	13,3	49	8,3
19	13,2	50	8,1
20	13	51	7,9
21	12,9	52	7,8
22	12,7	53	7,6
23	12,5	54	7,4
24	12,4	55	7,3
25	12,2	56	7,1
26	12	57	7
27	11,9	58	6,8
28	11,7	59	6,6
29	11,5	60	6,5
30	11,4		

Fuente: Guía de laboratorio

### Cálculo del Porcentaje Más Fino

Para calcular el porcentaje de partículas de diámetro más fino que el correspondiente a una lectura de hidrómetro dada, utilice las formulas siguientes:

Para hidrómetros 152 H

$$Porcentaje\ mas\ fino = \frac{100 * a}{1A7} * (R - Cd \pm Ct)$$

Donde:

Gs = Peso específico de los solidos

Ws = Peso de la muestra de suelo secado al horno que se empleó para el análisis del hidrómetro.

(R - Cd ± Ct) = Lectura de hidrómetro corregida por menisco menos corrección por defloculante y punto cero, mas (sumada algebraicamente) corrección por temperatura.

a = Factor de corrección por peso específico de la siguiente tabla

**Tabla 3.16:** Factores de corrección “a” para el peso unitario de sólidos

Peso específico	Factor de corrección
2,85	0,96
2,8	0,97
2,75	0,98
2,7	0,99
2,65	1
2,6	1,01
2,55	1,02
2,5	1,04

Fuente: Guía de laboratorio

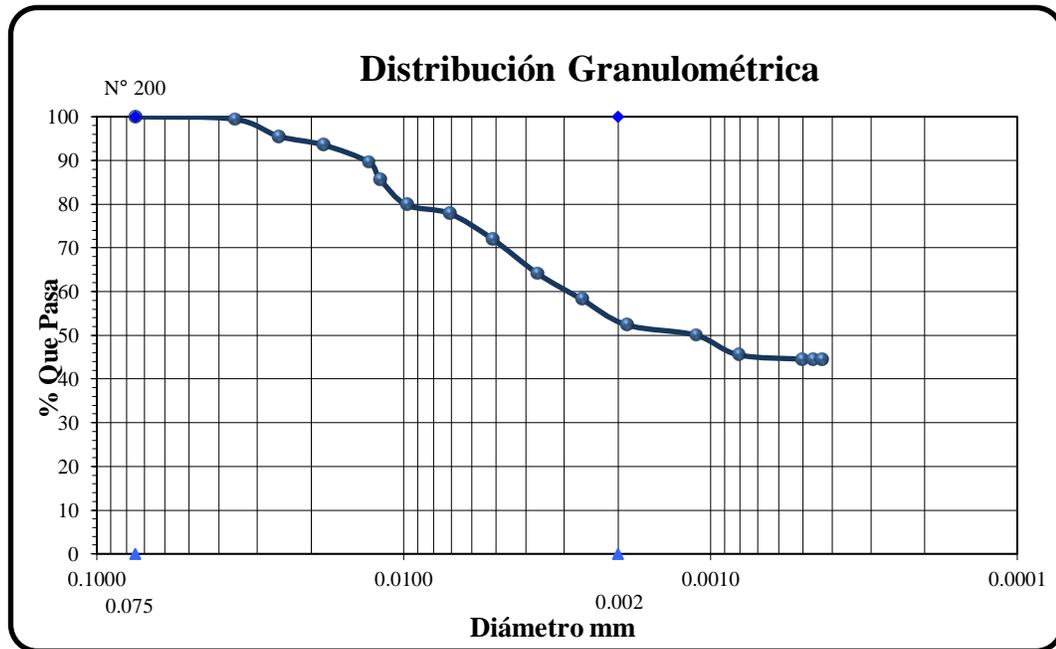
**Tabla 3.17:** Planilla de cálculo

Tiempo	Lectura	Lectura	Prof.	Constante				Lectura	Diam.	% Más
Transc.	Temp.	Real	Correg	Efec.	K	L/t	Ct	Correg	Partícula	Fino
min.	°C.	R'.	R.	L	Tabla			Rc.	mm	Parcial
0,0	0,0	0,00	0,00	0,000	0,0000	0	0,00	0,000	0,075	100,000
1,0	21,0	53,00	54,00	7,40	0,0131	7,400	0,20	50,734	0,0356	99,439
2,0	21,0	51,00	52,00	7,60	0,0131	3,800	0,20	48,734	0,0255	95,519
4,0	21,0	50,00	51,00	7,80	0,0131	1,950	0,20	47,734	0,0183	93,559
8,0	21,0	48,00	49,00	7,90	0,0131	0,988	0,20	45,734	0,0130	89,639
10,0	21,0	46,00	47,00	8,30	0,0131	0,830	0,20	43,734	0,0119	85,719
15,0	21,0	43,00	44,00	8,40	0,0131	0,560	0,20	40,734	0,0098	79,839
30,0	21,0	42,00	43,00	8,80	0,0131	0,293	0,20	39,734	0,0071	77,879
60,0	21,0	39,00	40,00	9,20	0,0131	0,153	0,20	36,734	0,0051	71,999
120,0	21,0	35,00	36,00	9,40	0,0131	0,078	0,20	32,734	0,0037	64,159
240,0	21,0	32,00	33,00	9,70	0,0131	0,040	0,20	29,734	0,0026	58,279
480,0	21,0	29,00	30,00	9,90	0,0131	0,021	0,20	26,734	0,0019	52,399
1440,0	20,0	28,00	29,00	10,20	0,0133	0,007	0,00	25,534	0,0011	50,047
2880,0	19,0	26,00	27,00	10,60	0,0134	0,004	-0,30	23,234	0,0008	45,539
7200,0	21,0	25,00	26,00	10,70	0,0131	0,001	0,20	22,734	0,0005	44,559
8640,0	21,0	25,00	26,00	10,70	0,0131	0,001	0,20	22,734	0,0005	44,559
10080,0	21,0	25,00	26,00	10,70	0,0131	0,001	0,20	22,734	0,0004	44,559

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.18:** Resultados del ensayo del hidrometro de nanoarcilla de bentonita

D(mm)	% más fino	Porcentajes de arcilla	53,33%
0,0026	58,28	Porcentajes de limo	46,67%
0,002	53,326		
0,0019	52,40		



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. Cálculos operacionales con el aditivo nanoarcilla de bentonita.

Para poder modificar el cemento asfáltico y poder encontrar el porcentaje óptimo se trabajaron con diferentes porcentajes que son al 0,5% ,1%, 2%, 3%, 4%.

Para cada porcentaje se pesó 1400g de cemento asfáltico 85-100 y se calculó el porcentaje del aditivo nanoarcilla de bentonita, por cada peso que se añadirá al cemento asfáltico para modificarlo.

$$\% \text{ peso de (Nanoarcilla de bentonita)} = \text{Peso de la muestra (1,4kg)} * 0,5\%$$

$$\% \text{ peso de (Nanoarcilla de bentonita)} = \text{Peso de la muestra (1,4kg)} * 1\%$$

$$\% \text{ peso de (Nanoarcilla de bentonita)} = \text{Peso de la muestra (1,4kg)} * 2\%$$

$$\% \text{ peso de (Nanoarcilla de bentonita)} = \text{Peso de la muestra (1,4kg)} * 3\%$$

$$\% \text{ peso de (Nanoarcilla de bentonita)} = \text{Peso de la muestra (1,4kg)} * 4\%$$

#### Pesos en % que se añadirán al cemento asfáltico

- Peso 0,5% de (Nanoarcilla de bentonita) = 7 g

- Peso 1% de (Nanoarcilla de bentonita) = 14g
- Peso 2% de (Nanoarcilla de bentonita) = 28g
- Peso 3% de (Nanoarcilla de bentonita) = 42 g
- Peso 4% de (Nanoarcilla de bentonita) = 56 g

**Figura 3.11:** Pesado de muestras del aditivo en diferentes porcentajes



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4. Características del cemento asfáltico con adición de nanoarcilla de bentonita.

#### ENSAYO DE PENETRACIÓN (AASHTO T-49-97)

##### Tipo I: C.A. +0,5% de aditivo nanoarcilla de bentonita

**Tabla 3.19:** Resultados del ensayo de penetración al 0,5% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura Nº1	82	84	75	82	85	100
	Lectura Nº2	81	75	86			
	Lectura Nº3	80	85	88			
	Promedio	81	81	83			

Fuente: Elaboración propia

**Tipo II: C.A. +1% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.20:** Resultados del ensayo de penetración al 1% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	80	76	82	<b>81</b>	85	100
	Lectura N°2	76	87	85			
	Lectura N°3	88	80	78			
	Promedio	81	81	82			

Fuente: Elaboración propia

**Tipo III: C.A. +2% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.21:** Resultados del ensayo de penetración al 2% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	77	78	77	<b>77</b>	85	100
	Lectura N°2	78	77	78			
	Lectura N°3	76	78	76			
	Promedio	77	78	77			

Fuente: Elaboración propia

**Tipo IV: C.A. +3% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.22:** Resultados del ensayo de penetración al 3% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	73	69	63	<b>65</b>	85	100
	Lectura N°2	63	65	61			
	Lectura N°3	62	60	67			
	Promedio	66	65	64			

Fuente: Elaboración propia

**Tipo V: C.A. +4% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.23:** Resultados del ensayo de penetración al 4% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	69	58	62	<b>62</b>	85	100
	Lectura N°2	65	59	62			
	Lectura N°3	65	57	64			
	Promedio	66	58	63			

Fuente: Elaboración propia

**ENSAYO DE DUCTILIDAD A 25°C (AASHTO T-51-00)**

**Tipo I: C.A. +0,5% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.24:** Resultados del ensayo de ductilidad al 0,5% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	65	99	91	<b>85</b>	100	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo II: C.A. +1% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.25:** Resultados del ensayo de ductilidad al 1% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	64,5	74,6	75	<b>71</b>	100	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo III: C.A. +2% de aditivo nanoarcilla de bentonita**

**Tabla 3.26:** Resultados del ensayo de ductilidad al 2% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	68	68	67	<b>68</b>	100	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo IV: C.A. +3% de aditivo nanoarcilla-bentonita de bentonita****Tabla 3.27:** Resultados del ensayo de ductilidad al 3% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	65	67	67	<b>66</b>	100	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo V: C.A. +4% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.28:** Resultados del ensayo de ductilidad al 4% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	63	60	60	<b>61</b>	100	-

Fuente: Elaboración propia

**ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (AASHTO T-79-96)****Tipo I: C.A. +0,5% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.29:** Resultados del ensayo de inflamación al 0,5% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación (AASHTO T-48)	°C	283	265	264	<b>271</b>	232	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo II: C.A. +1% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.30:** Resultados del ensayo de inflamación al 1% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	295	295	296	<b>295</b>	232	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo III: C.A. +2% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.31:** Resultados del ensayo de inflamación al 2% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	302	306	307	<b>305</b>	232	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo IV: C.A. +3% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.32:** Resultados del ensayo de inflamación al 3% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	310	311	311	<b>311</b>	232	-

Fuente: Elaboración propia

**Tipo V: C.A. +4% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.33:** Resultados del ensayo de inflamación al 4% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	315	315	317	<b>316</b>	232	-

Fuente: Elaboración propia

**ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (AASHTO T 53-96)****Tipo I: C.A. +0,5% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.34:** Resultados de ablandamiento al 0,5% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	42,0	42,0	42,0	42	42	53

Fuente: Elaboración propia

**Tipo II: C.A. +1% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.35:** Resultados del ensayo de ablandamiento al 1% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	43,0	43,0	44,0	43,33	42	53

Fuente: Elaboración propia

**Tipo III: C.A. +2% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.36:** Resultados del ensayo de ablandamiento al 2% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	45,0	45,0	44,0	44,67	42	53

Fuente: Elaboración propia

**Tipo IV: C.A. +3% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.37:** Resultados del ensayo de ablandamiento al 3% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	47,0	47,0	48,0	47,33	42	53

Fuente: Elaboración propia

**Tipo V: C.A. +4% de aditivo nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.38:** Resultados del ensayo de ablandamiento al 4% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	49,0	49,0	50,0	49,33	42	53

Fuente: Elaboración propia

## ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO (ASTM D 71 / AASHTO T 229-97)

### Tipo I: C.A. +0,5% de aditivo nanoarcilla de bentonita

**Tabla 3.39:** Resultados del peso específico al 0,5% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	35,8	34,4	33,9			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	86,7	89,1	87,4			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	65,6	67,9	66,3	<b>1,013</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	87,1	89,7	87,9			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,011</b>	<b>1,015</b>	<b>1,013</b>			

Fuente: Elaboración propia

### Tipo II: C.A. +1% de aditivo nanoarcilla de bentonita

**Tabla 3.40:** Resultados del ensayo de peso específico al 1% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	34,8	34,5	34,0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	91,4	89,5	87,4			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	65,9	65,5	68,5	<b>1,010</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	91,8	89,9	87,8			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,010</b>	<b>1,010</b>	<b>1,009</b>			

Fuente: Elaboración propia

### Tipo III: C.A. +2% de aditivo nanoarcilla de bentonita

**Tabla 3.41:** Resultados del ensayo de peso específico al 2% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	34,1	34,0	35,3			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	87	87,6	88,6			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	63,6	65,2	64,5	<b>1,009</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	87,4	87,9	89			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,011</b>	<b>1,007</b>	<b>1,011</b>			

Fuente: Elaboración propia

#### Tipo IV: C.A. +3% de aditivo nanoarcilla de bentonita

Tabla 3.42: Resultados del ensayo de peso específico al 3% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	35,9	34,1	35,8			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	91,4	86,6	88			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	67,3	64	63,7	<b>1,007</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	91,7	86,9	88,3			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,007</b>	<b>1,007</b>	<b>1,008</b>			

Fuente: Elaboración propia

#### Tipo V: C.A. +4% de aditivo nanoarcilla de bentonita

Tabla 3.43: Resultados del ensayo de peso específico al 4% de nanoarcilla de bentonita

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	34,1	36,0	34,4			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	85,9	93,5	86,1			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	65,0	69,7	68,8	<b>1,005</b>	1	1,05
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	86,2	93,7	86,4			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1,007</b>	<b>1,003</b>	<b>1,006</b>			

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5. Caracterización de agregados

#### 3.3.5.1. Granulometría (ASTM E-40)

Se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo, que consiste en colocar a la muestra en el cuarteador manual para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas. Posteriormente se toma dicha muestra y se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200, inmediatamente con movimientos circulares durante 10 minutos mínimamente lo que facilitamos que los agregados pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices

**Tabla 3.44:** Granulometría del agregado grueso (grava)

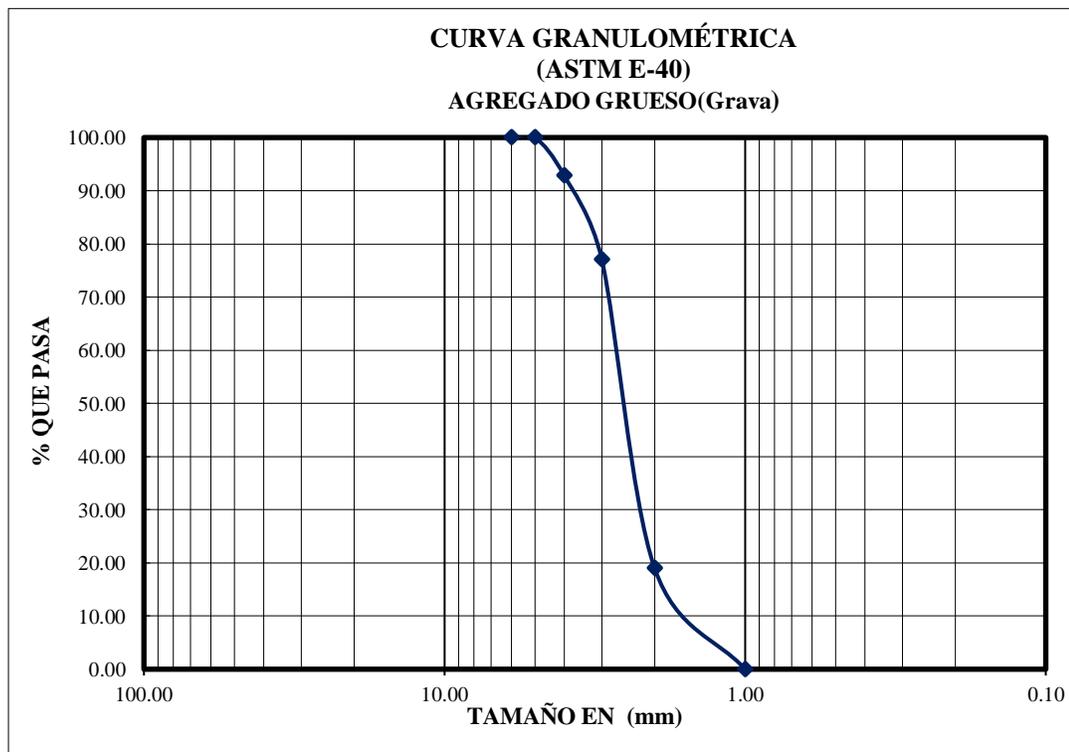
Peso total(gr.)		5000			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)	Retenido Acumulado (%)	% Que pasa del total
1	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
¾	19,00	948,20	948,20	18,96	<b>81,04</b>
½	12,50	2908,40	3856,60	77,13	<b>22,87</b>
3/8	9,50	785,90	4642,50	92,85	<b>7,15</b>
Nº4	4,75	357,50	5000,00	100,00	<b>0,00</b>
Nº8	2,36	0,00	5000,00	100,00	<b>0,00</b>
BASE		0,00	5000,00	100,00	<b>0,00</b>

SUMA =  $\frac{5000,00}{}$

PÉRDIDAS =  $\frac{0,00}{}$  TAMAÑO MAX ¾

MF =  $\frac{7,12}{}$

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.45:** Granulometría agregado grueso (gravilla)

Peso total(gr.)		5000,5			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)		% Que pasa del total
3/4	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2	12,50	67,40	67,40	1,35	<b>98,65</b>
3/8	9,50	60,80	128,20	2,56	<b>97,44</b>
N°4	4,75	4348,50	4476,70	89,53	<b>10,47</b>
N°8	2,36	512,60	4989,30	99,78	<b>0,22</b>
N°16	1,18	11,20	5000,50	100,00	<b>0,00</b>
N°30	0,60	0,00	5000,50	100,00	<b>0,00</b>
BASE		0,00	5000,50	100,00	<b>0,00</b>

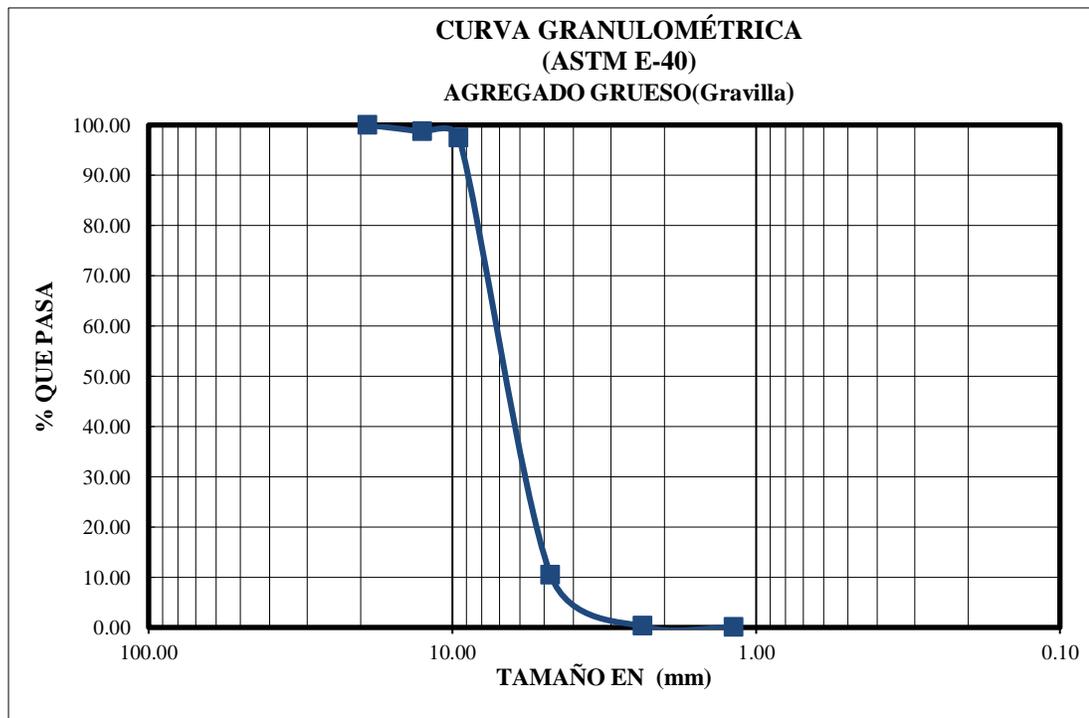
SUMA =  $\frac{5000,50}{}$

PÉRDIDAS =  $\frac{0,00}{}$

TAMAÑO MAX =  $\frac{1}{2}$

MF =  $\frac{5,91}{}$

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.46:** Granulometría agregado fino

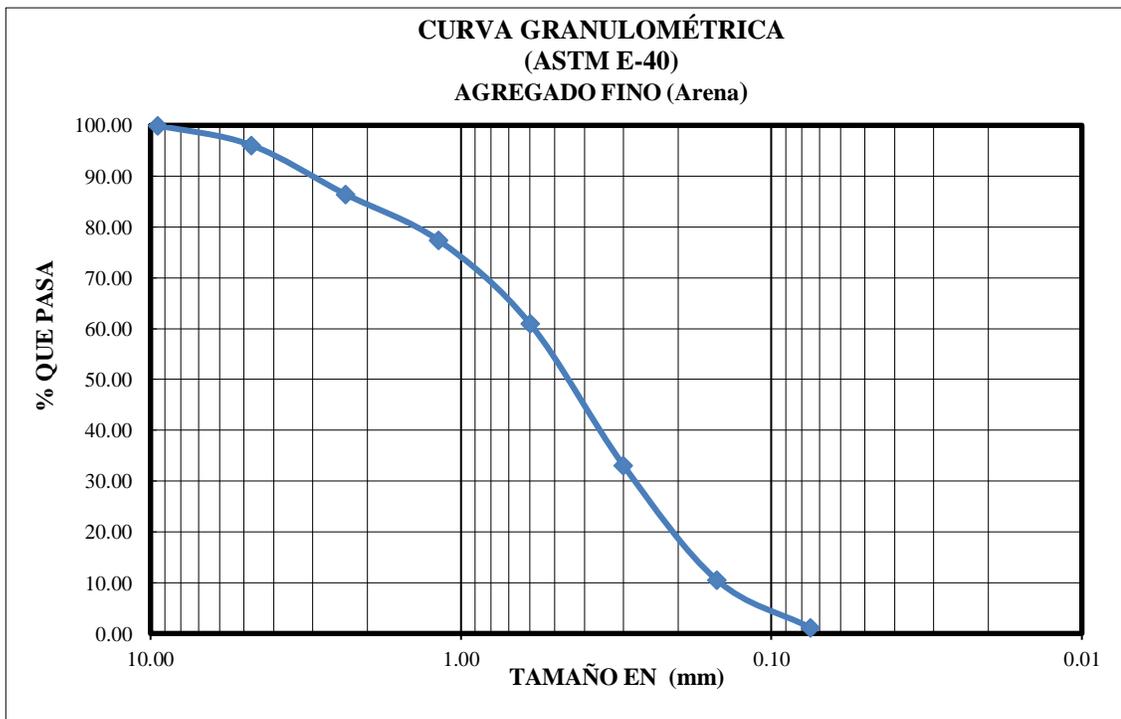
Peso total(gr.)		2200			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)	Retenido Acumulado (%)	% Que pasa del total
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
Nº4	4,75	85,10	85,10	3,87	<b>96,13</b>
Nº8	2,36	212,40	297,50	13,52	<b>86,48</b>
Nº16	1,18	200,60	498,10	22,64	<b>77,36</b>
Nº30	0,60	360,10	858,20	39,01	<b>60,99</b>
Nº 50	0,30	612,80	1471,00	66,86	<b>33,14</b>
Nº100	0,15	496,80	1967,80	89,45	<b>10,55</b>
Nº200	0,0750	206,30	2174,10	98,82	<b>1,18</b>
BASE	-	25,90	2200,00	100,00	<b>0,00</b>

SUMA = 2200,00

PÉRDIDAS = 0,00                      TAMAÑO MAX = N°4

MF = 2,35

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.2. Peso específico (ASTM E-127; E-128)

El peso específico del agregado es necesario para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. El peso específico de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua aproximadamente a 23°C (73,4°F).

### 3.3.5.3. Peso específico para agregados gruesos (ASTM E-127)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Primeramente se debe eliminar por tamizado las partículas inferiores a 4,75 mm, en el caso de hormigones y suelos y las partículas inferiores a 2,36 mm, en el caso de asfaltos. La cantidad mínima de muestra para el ensaye se determina según la Tabla A0519\_1, en función del tamaño máximo nominal del árido.

**Tabla 3.47:** Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del árido

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12,5	2000
19	3000
25	4000
37,5	5000
50	8000

Fuente: Norma ASTM E-127

Para nuestra muestra el tamaño máximo nominal es de 19mm, por lo tanto se tomara una muestra de 3000grs. Una vez definido la cantidad de muestra se debe lavar hasta remover el polvo superficial o cualquier materia extraña adherida a las partículas. Posteriormente se debe sumergir la muestra en agua a temperatura ambiente por un período de  $24 \pm 4$  h. Pasada las 24 horas, se deben realizar las siguientes pesadas a la muestra de ensayo:

- a) Retirar la muestra del agua y secar superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida.
- b) Pesaje sumergido, colocar la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra y pesar en la balanza analítica.

**Figura 3.12:** Agregado grueso reposando 24 hrs y siendo secadas superficialmente



Fuente: Elaboración propia

c) Pesaje al aire ambiente del árido seco, retirar la muestra del canastillo y vacíela completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas. Determine la masa de la muestra seca, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. y registre.

**Figura 3.13:** Pesaje sumergido del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.48:** Resultado del peso específico del agregado grueso (Grava)

MUESTRA	PESO	PESO	PESO	PESO	PESO	PESO	%
N°	MUESTRA	MUESTRA	MUESTRA	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	DE
	SECADA	SATURADA	SAT. DENTRO	A GRANEL	S.S.S.	APARENTE	ABS.
	"A"	CON	DEL AGUA "C"				
	(gr)	SUP. SECA	(gr)	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	
		"B"	(gr)				
1	2959,20	3000,00	1857,00	2,59	2,62	2,68	1,38
2	2953,00	3000,00	1874,00	2,62	2,66	2,74	1,59
3	2957,70	3000,00	1858,00	2,59	2,63	2,69	1,43
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,61</b>	<b>2,64</b>	<b>2,71</b>	<b>1,49</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.49:** Resultado del peso específico del agregado grueso (Gravilla)

MUESTRA	PESO	PESO	PESO	PESO	PESO	PESO	%
	MUESTRA	MUESTRA	MUESTRA	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	DE
	SECADA	SATURADA	SAT. DENTRO	A GRANEL	S.S.S.	APARENTE	ABS.
	"A"	CON	DEL AGUA "C"				
	(gr)	SUP. SECA	(gr)	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	
		"B"	(gr)				
1	2938,60	3000,00	1852,00	2,56	2,61	2,70	2,09
2	2938,10	3000,00	1850,00	2,55	2,61	2,70	2,11
3	2940,00	3000,00	1848,00	2,55	2,60	2,69	2,04
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,56</b>	<b>2,61</b>	<b>2,70</b>	<b>2,10</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.5.4. Peso específico para agregados finos (ASTM E-128)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos. Material pétreo que pasa el tamiz de 4,75 mm (N ° 4) en el caso de hormigones, y que pasa el tamiz de 2,36 mm (N ° 8) cuando se utiliza en asfaltos.

Para realizar dicho ensayo se debe cubrir el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente, necesaria para asegurar su saturación en un período de  $24 \pm 4$  h. Se tomara una muestra de 3000 gramos aproximadamente para tres muestras de ensayo. Pasado las 24hrs, eliminar paulatinamente el exceso de agua, colocar el molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llenar con el árido en condición suelta en una capa y enrasar y luego compactar suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie.

Colocar la muestra en un matraz y cubrirla con agua a una temperatura de  $20 \pm 3^\circ \text{C}$ , agitar el matraz a fin de eliminar burbujas de aire golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano y luego pesar y registrar la masa total del matraz con la muestra de ensayo y el agua. Saque la muestra del matraz, evitando pérdidas de material, y séquela hasta masa constante en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ . Determine y registre la masa de la muestra de ensayo en condición seca (ms).

**Figura 3.14:** Ensayo de peso específico del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.50:** Resultado del peso específico del agregado fino (arena)

PESO DE LA MUESTRA	PESO MATRAZ	P. MUESTRA + MATRAZ	AGUA	PESO MUESTRA	VOL. DEL MATRÁZ	P. E. A GRANEL	P. E. SAT. CON SUP. SECA	P. E. APARENTE	% DE ABS.
		+ AGUA	MATRAZ "w"	SECADA "A"	"V"	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	
	(gr)	(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)				
500,00	236,80	1027,30	290,50	491,80	500,00	2,35	2,39	2,44	1,64
500,00	177,30	983,00	305,70	492,90	500,00	2,54	2,57	2,63	1,42
500,00	193,40	993,20	299,80	491,80	500,00	2,46	2,50	2,56	1,64
<b>PROMEDIO</b>						<b>2,45</b>	<b>2,49</b>	<b>2,55</b>	<b>1,57</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.5. Peso específico del Filler

**Figura 3.15:** Ensayo de peso específico del Filler



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.51:** Resultado del peso específico del filler

<b>Identificación de Ensayo</b>	<b>1</b>				
Temperatura ensayada (°C)	30	25	20	18	15
Peso del suelo seco $W_s$	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua * $W_{fw}$	681,92	683,44	684,95	685,56	686,47
Peso del frasco + agua + suelo $W_{fsw}$	729,90	730,00	730,10	730,3	730,80
Peso específico	2,50	2,39	2,30	2,27	2,24
Factor de corrección $K^{**}$	0,9974	0,9989	1,0000	1,0004	1,0009
Peso específico corregido (gr/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,40	2,30	2,27	2,24
Peso específico promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2,34</b>				

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.6. Ensayo de abrasión por medio de máquina de los Ángeles (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. Por otro lado, los

agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

**Figura 3.16:** Ensayo del desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.52:** Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles de la grava

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
B	5000,00	4024,00	19,52	40% MAX

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.53:** Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles De la gravilla

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
C	5000,00	3895,20	22,10	40% MAX

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.7. Equivalente de arena (ASTM D-2419)

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm).

El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

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

El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

**Figura 3.17:** Ensayo de equivalente de la arena



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.54:** Resultado del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,60	10,50	91,43
2	9,80	10,20	96,08
3	9,80	10,70	91,59
<b>Promedio</b>			<b>93,03</b>

$$E.A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Equivalente de Arena (%)	NORMA
<b>93,03</b>	> 90%

Fuente: Elaboración propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

### **3.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL**

#### **3.4.1. Descripción de la investigación**

Para conocer y analizar la incidencia que tiene el cemento asfáltico modificado con el aditivo nanoarcilla de bentonita se realizan 15 briquetas con el cemento modificado (3 briquetas con cada porcentaje de cemento modificado al 0,5%, 1% ,2% ,3%,4%) y 3 briquetas con cemento asfáltico normal (C.A. 85-100).

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

Se calculó el contenido mínimo del cemento asfáltico por el método de área superficial, el valor dio un indicador, del contenido de cemento asfáltico se debe empezar para encontrar el contenido óptimo.

**Tabla 3.55:** Contenido mínimo del cemento asfáltico método de área superficial

Tamiz		Cantidad de material	Contante de área	Superficie parcial del agregado	Índice asfáltico	Contenido parcial de asfalto
Pasa	Retenido	(%)	(m <sup>2</sup> /kg)	(m <sup>2</sup> )	(Adm)	(kg/kg)
1 1/2"	3/4"	5,50	0,27	0,015	0,0080	0,0001
3/4"	Nº 4	50,12	0,41	0,205	0,0080	0,0016
Nº 4	Nº 40	23,49	2,05	0,482	0,0080	0,0039
Nº 40	Nº 200	17,43	15,38	2,680	0,0080	0,0214
Nº 200	-	3,47	53,30	1,850	0,0080	0,0148
<b>Sumatoria</b>		<b>100,00</b>				<b>0,0419</b>

Contenido mínimo de asfalto = **4,19%**

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3. Dosificación de la mezcla asfáltica

**Tabla 3.56:** Dosificación de la mezcla asfáltica

Peso Total de Briqueta (gr)	1200			Porcentaje de Briqueta		100%
Ponderación de Grava (%)	29,00			Porcentaje de Cemento Asfáltico		Xi (%)
Ponderación de Gravilla (%)	28,00			Porcentaje de Agregado		Y=100 - Xi (%)
Ponderación de Arena (%)	40,00					
Ponderación de Filler (%)	3,00					
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	<b>3,69%</b>	<b>4,19%</b>	<b>4,69%</b>	<b>5,19%</b>	<b>5,69%</b>	<b>6,19%</b>
Porcentaje de Agregado (%)	96%	96%	95%	95%	94%	94%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	44,28	50,28	56,28	62,28	68,28	74,28
Peso de Grava (gr) *	335,16	333,42	331,68	329,94	328,20	326,46
Peso de Gravilla (gr) *	323,60	321,92	320,24	318,56	316,88	315,20
Peso de Arena (gr) *	462,29	459,89	457,49	455,09	452,69	450,29
Peso de Filler (gr) *	34,67	34,49	34,31	34,13	33,95	33,77
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

(\*) Valores para una briqueta, que varían según los porcentajes de ligante asfáltico y agregado.

Fuente: Elaboración propia

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

El contenido óptimo de cemento asfáltico de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto.

Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas.

Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

#### **3.4.5. Preparación de las muestras de ensayo**

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan 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. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes.
- Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.
- Una vez compactada la muestra retirarla del equipo de compactación y dejarla enfriar a temperatura ambiente por un máximo de 24h para continuar con el ensayo Marshall.

**Figura 3.18:** Mezclado del agregado con el cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.19:** Compactado de 25 golpes por cada capa



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.20:** Extracción de la briqueta del molde



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.21:** Reposo de las briquetas según su dosificación



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.6. Determinación del cemento asfáltico por el método Marshall

**Tabla 3.57:** Contenido óptimo de cemento asfáltico

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
<b>DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO 85-100</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	3692,33	5,43
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,27	5,09
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,96
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A. Promedio (%) =</b>		<b>5,49</b>

Fuente: Elaboración propia

**Contenido óptimo de cemento asfáltico = 5,49%**

### 3.4.7. Mezcla asfáltica convencional con el contenido óptimo

**Tabla 3.58:** Cálculo para las briquetas convencionales

Peso Total de Briqueta (gr)	1200	Porcentaje de Briqueta	100%
Ponderación de Grava (%)	29,00	Porcentaje de Cemento Asfáltico	Xi (%)
Ponderación de Gravilla (%)	28,00	Porcentaje de Agregado	Y=100 - Xi (%)
Ponderación de Arena (%)	40,00		
Ponderación de Filler (%)	3,00		
<b>Porcentaje de Cemento asfáltico (%)</b>		<b>5,49%</b>	<b>5,49%</b>
Porcentaje de Agregado (%)		95 %	95%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *		65,88	65,88
Peso de Grava (gr) *		328,89	328,89
Peso de Gravilla (gr) *		317,55	317,55
Peso de Arena (gr) *		453,65	453,65
Peso de Filler (gr) *		34,02	34,02
Peso total de la briqueta (gr) *		1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.59:** Resultado de las 18 briquetas de la Mezcla asfáltica modificado

Propiedades	Mezcla modificada						Especificaciones
	0%	0,50%	1%	2%	3%	4%	
Estabilidad	3711,02	3795,25	3847,77	3867,99	3886,28	3856,68	Min. 1800 (lb)
Fluencia	11,00	10,33	10,00	10,00	10,00	10,33	8- 16 (0,01 pulg)
% de la Vacíos mezclas total	3,95	3,94	3,79	3,70	3,67	2,74	3-5 (%)
R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	75,77	75,81	76,58	76,74	77,19	82,05	75-82 (%)
V.A.M. (Vacíos de Agregado Mineral) (%)	16,32	16,31	16,17	15,91	16,07	15,26	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

**3.4.8. Mezcla asfáltica modificada al 3% de nanoarcilla de bentonita****Tabla 3.60:** Resultado de las 30 briquetas de la Mezcla asfáltica modificada

N° de probeta	Estabilidad	% de Vacíos mezcla total	R.B.V. (Relación Betunen Vacíos)	Fluencia	V.A.M. (Vacíos agregado mineral)
	Libras	%	%	0,01 pulg	%
1	3617,11	3,53	77,88	9,67	15,95
2	3934,53	3,69	77,05	9,33	16,09
3	3890,49	3,45	78,28	9,67	15,88
4	3888,25	3,69	77,08	9,33	16,09
5	3874,12	3,51	77,97	9,67	15,93
6	3893,70	3,54	77,80	9,67	15,96
7	3971,72	3,45	78,25	9,67	15,88
8	3877,36	3,46	78,21	9,33	15,89
9	3857,75	3,41	78,50	9,33	15,84
10	3940,97	3,68	77,12	9,33	16,08
11	3919,60	3,46	78,20	9,67	15,89
12	3847,42	3,67	77,17	9,67	16,07
13	3887,19	3,23	79,44	9,67	15,68
14	3852,86	3,61	77,48	9,67	16,02
15	3336,56	3,92	75,93	10,00	16,29
16	3844,69	2,67	82,41	10,67	15,20
17	3880,08	3,39	78,60	10,67	15,82
18	3909,58	3,51	77,95	10,67	15,94

N° de probeta	Estabilidad	% de vacíos mezcla total	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Fluencia	V.A.M. (vacíos agregado mineral)
	libras	%	%	0,01 pulg	%
19	3724,71	3,62	77,42	10,00	16,03
20	3873,23	3,64	77,34	10,00	16,04
21	3958,14	3,67	77,15	9,67	16,07
22	3313,82	3,37	78,67	10,00	15,81
23	4018,44	3,26	79,25	10,33	15,71
24	3314,30	3,47	78,19	10,67	15,89
25	3903,40	3,57	77,67	10,33	15,98
26	3283,33	3,27	79,21	10,00	15,72
27	3860,19	3,63	77,38	9,33	16,03
28	3357,82	2,94	80,97	9,67	15,43
29	3886,34	3,64	77,29	9,50	16,05
30	3989,44	3,65	77,24	10,00	16,06
Mínimo	1800	3	75	8	13
Máximo	-	5	82	16	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.61:** Promedio de las 30 briquetas de la mezcla asfáltica modificada al 3% de nanoarcilla de bentonita

Ensayo	Valor promedio De la mezcla asfáltica con C.A. al 3% nanoarcilla de bentonita	Especificaciones
Estabilidad Marshall(lb)	3884,05	Min. 1800 (lb)
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,32	-
% de Vacíos de mezcla total (%)	3,49	3- 5 (%)
R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	78,10	75 - 82 (%)
Fluencia (pulg)	9,84	8- 16 (0,01 pulg)
V.A.M. (Vacíos de agregado mineral) (%)	15,91	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**  
**PROCESAMIENTO Y**  
**VALIDACIÓN DE**  
**RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADO

**Tabla 4.1:** Resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85-100

Cemento asfáltico 85-100		Especificaciones		
Ensayo	Unidad	C.A. normal	Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97)	0,1mm	<b>87</b>	85	100
Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97)	seg	<b>1,027</b>	1	1,05
Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)	°C	<b>263</b>	232	–
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	<b>42</b>	42	53
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	<b>128</b>	100	–
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	seg	-	85	400

Fuente:Elaboración propia

**Tabla 4.2:** Resultados de la caracterización del cemento asfáltico modificado

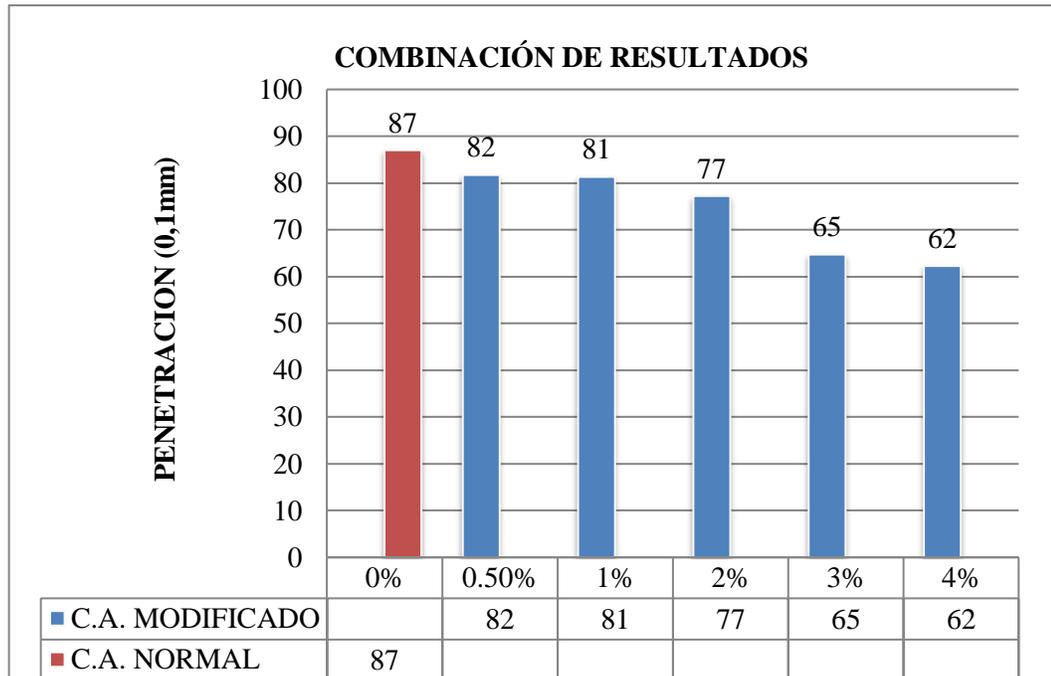
<b>Cemento asfaltico 85-100 modificado con nanoarcilla de bentonita con los siguientes porcentajes</b>						
Ensayo	Unidad	0,50%	1%	2%	3%	4%
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97)	0,1mm	82	81	77	65	62
Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97)	gr/cm <sup>3</sup>	1,013	1,010	1,009	1,007	1,005
Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)	°C	271	295	305	311	316
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	42	43,33	44,67	47,33	49,33
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	Cm	85	71	68	66	61
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	seg	-	-	-	-	-

Fuente:Elaboración propia

## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CEMENTO ASFÁLTICO NORMAL 85-100 Y EL MODIFICADO.

### 4.2.1. Penetración

**Figura 4.1:** Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de penetración

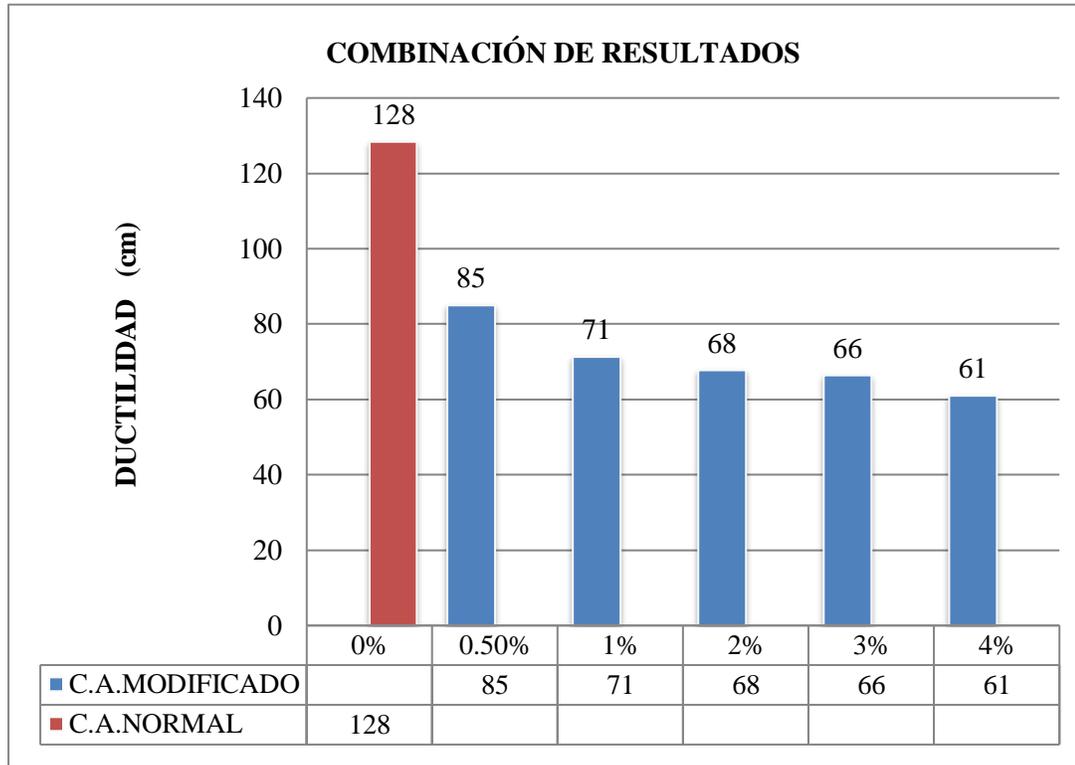


Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de penetración a 25°C muestran, que comparado con el cemento asfáltico convencional (87dmm), el modificado presenta una reducción notable en la penetración, especialmente a partir del 2%. la adición del aditivo nanoarcilla de bentonita, al cemento asfáltico normal refuerza la propiedad de la consistencia dándole más rigidez para que pueda soportar mayores cargas que un cemento asfáltico normal, se debe resaltar que una de las razones básicas por la que la nanoarcilla de benonita pueden tener importantes aplicaciones en la ingeniería de pavimentos es que tienen una mayor superficie, por lo que tienen mejor contacto con el asfalto, por lo tanto, garantizan mayor resistencia, es decir que al añadir mayor porcentaje del aditivo a la mezcla este obtenga mayor rigidez.

#### 4.2.2. Ductilidad

**Figura 4.2:** Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de ductilidad



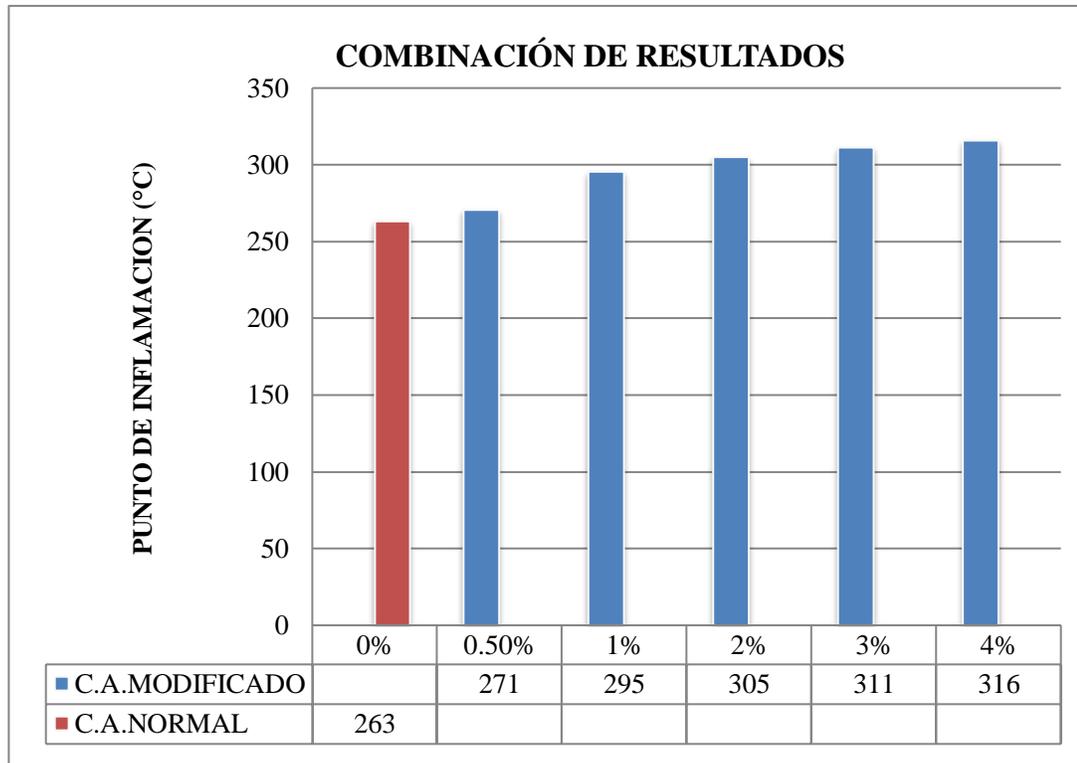
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la ductilidad del cemento asfáltico de los diferentes porcentajes de adición del aditivo nanoarcilla de bentonita, en comparación con el cemento asfáltico convencional (128 cm), la reducción de la ductilidad es significativa a partir del 2%, lo que puede afectar la capacidad del material para absorber deformaciones sin romperse. Sin embargo, esta reducción es aceptable hasta el 3%, ya que valores mayores pueden comprometer gravemente la elasticidad. La disminución de la ductilidad es mayor al añadir el último porcentaje (4%), esto se debe porque el aditivo nanoarcilla de bentonita (polímero natural que tiene alta resistencia y dureza) que no tiene esa propiedad elástica como los elastómeros.

Con los resultados se puede concluir que dicho aditivo mejora la consistencia, pero disminuye la propiedad de adhesión y cohesión, se analizará un porcentaje que no afecte de gran manera en dicha propiedad y se pueda equilibrar para que la modificación del cemento asfáltico cumpla con todas las propiedades.

### 4.2.3. Punto de inflamación

**Figura 4.3:** Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

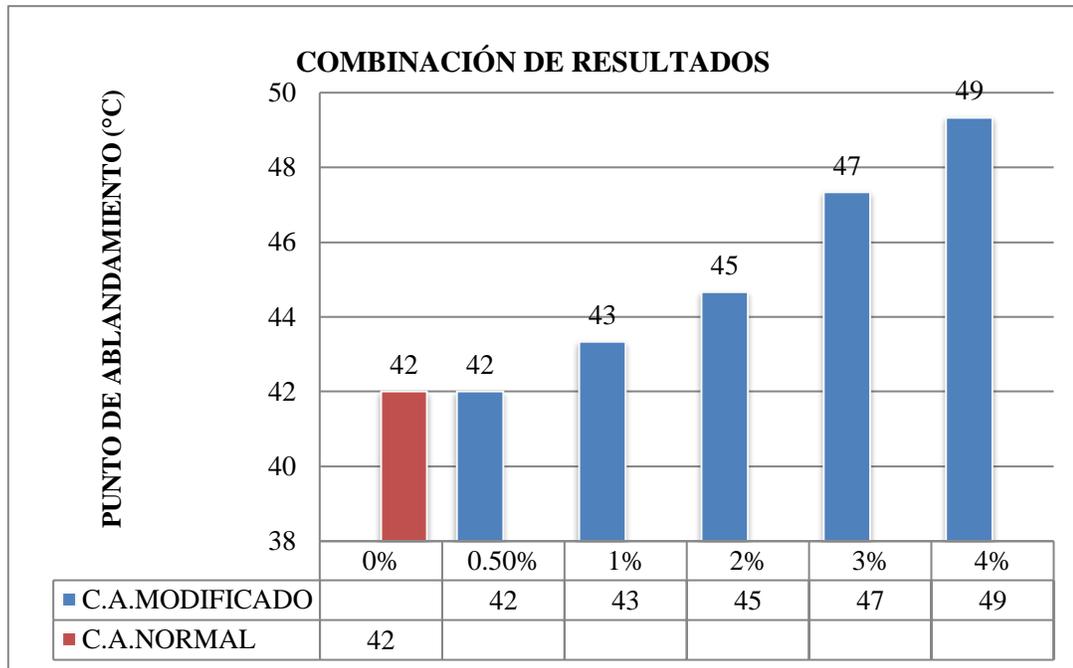
Los resultados del punto de inflamación nos indica que, comparado con el cemento asfáltico convencional (271°C), el modificado tiene un punto de inflamación más alto mientras se van agregando diferentes porcentajes del aditivo de nanoarcilla de bentonita, especialmente a partir del 2%.

Esto mejora la seguridad durante el manejo a altas temperaturas, aunque los valores del cemento convencional ya cumplen con los estándares de seguridad (>232 ° C), dando como resultado un cemento modificado que dé más confianza y seguridad cuando se esté manipulando en las diferentes obras civiles, es decir es menos propenso a formar vapores inflamables a temperaturas normales de operación, reduciendo el riesgo de incendio durante el almacenamiento, transporte y aplicación.

Es decir que un punto de inflamación más alto asocia con mejor seguridad y estabilidad térmica del material.

#### 4.2.4. Punto de ablandamiento

**Figura 4.4:** Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

El cemento asfáltico convencional tiene un punto de ablandamiento de 42°C, mientras que el modificado aumenta esta temperatura (excepto con el porcentaje de 0,5%), lo que indica que puede soportar temperaturas más altas sin perder su consistencia. El incremento es más pronunciado entre el 2% y 3%.

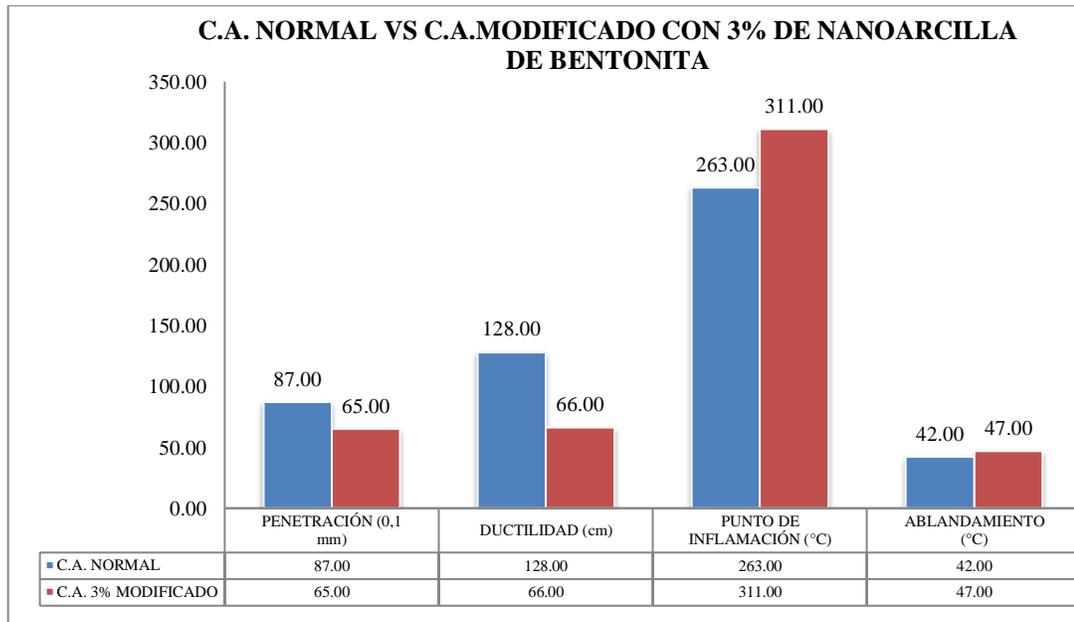
El incremento se debe al aditivo que es un plastómero que tienen gran resistencia a la elevada temperatura al adicionar para reforzar el punto donde el cemento asfáltico se ablanda, y también por la exfoliación que presenta el aditivo, dando una conclusión que hay una mejora que nos servirá de parámetro de la temperatura ideal a la cual se puede mezclar con los agregados.

Este tipo de cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes, es ideal para carreteras en zonas de altas temperaturas, ya que mantiene su rigidez por más tiempo antes de comenzar a fluir, es decir que un punto de ablandamiento más elevado indica que el material está diseñado para resistir mejor las altas temperaturas, pero debe evaluarse cuidadosamente en función de las condiciones climáticas y de tráfico del práctico.

### 4.3. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DEL ADITIVO DE NANOARCILLA DE BENTONITA.

La elección entre el cemento asfáltico normal y el modificado depende del contexto y las condiciones climáticas específicas del trabajo de investigación.

**Figura 4.5:** Justificación de la elección del porcentaje de 3% de nanoarcilla de benonita



Según el análisis que se ha realizado en función a sus propiedades, el porcentaje óptimo de nanoarcilla de bentonita es del 3%.

- Rendimiento equilibrado en términos de rigidez (menor penetración), mejora en la seguridad (punto de inflamación) y resistencia a altas temperaturas (punto de ablandamiento).
- Ductilidad aceptable: aunque se reduce significativamente en comparación con el cemento convencional, el 3% mantiene una ductilidad suficiente para evitar la pérdida extrema de elasticidad y cohesión.

Es decir que el cemento modificado con un 3 % de nanoarcilla de bentonita mejora la resistencia térmica y reduce la penetración, lo que podría ser ventajoso en climas cálidos o para cargas pesadas. Sin embargo, la disminución de la ductilidad podría ser problemática en climas fríos. Por lo tanto, el 3% es el porcentaje que maximiza las ventajas de la nanoarcilla de bentonita sin comprometer severamente las propiedades esenciales del cemento asfáltico.

#### 4.4. FORMA DE CUBICACIÓN

##### Costo por unidad de cubicación

Lo que se propone para medir es en toneladas, por el motivo que el cemento asfáltico se lo vende en tambores reacondicionados de 200 kilos de capacidad.

Para la venta del cemento modificado se realizará en tambores reacondicionados de 200 kilos de capacidad por los cuidados que se debe dar al cemento asfáltico.

**Tabla 4.3:** Análisis de precios unitarios del cemento asfáltico modificado

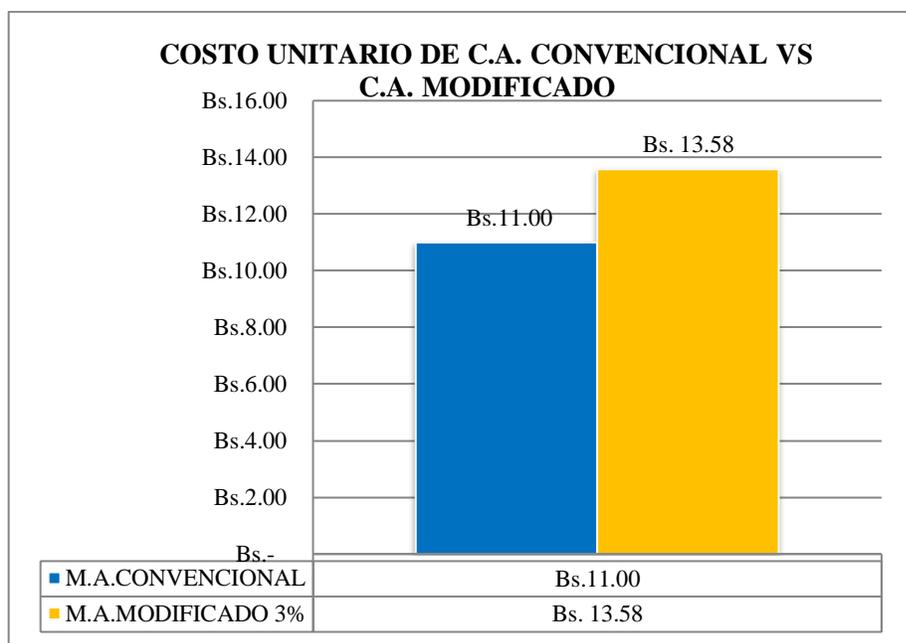
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
<b>DATOS GENERALES</b>					
<b>Proyecto :</b>	Análisis de un cemento asfáltico modificado				
<b>Actividad :</b>	Adición de nanoarcilla de bentonita				
<b>Cantidad :</b>	200 kg				
<b>Moneda :</b>	Bs.				
<b>1. MATERIALES</b>					
	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
1	Cemento asfáltico 85-100	Kg	194,000	11,000	2134,000
2	Aditivo de nanoarcilla de bentonita	Kg	6,000	2,670	16,020
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>2150,02</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>					
	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
1	Técnico	Hrs	0,090	20,500	1,845
2	Ayudante	Hrs	0,090	15,000	1,350
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>3,195</b>
CARGAS SOCIALES = (55,00 % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				55%	1,757
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (14,94 % DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,94%	0,740
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>5,692</b>
<b>3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					
	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
1	Planta Mezcladora de cemento asfáltico	Hrs	0,090	250,000	22,500
*	HERRAMIENTAS = (5,00 % DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			5,00%	0,285
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					<b>22,785</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
					<b>COSTO TOTAL</b>
*	GASTOS GENERALES = 10 % DE 1 + 2 + 3			10,00%	2178,497
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>217,850</b>
<b>5. UTILIDAD</b>					
					<b>COSTO TOTAL</b>
*	UTILIDAD = 10,00 % DE 1 + 2 + 3 + 4			10,00%	2396,346
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>239,635</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>					
					<b>COSTO TOTAL</b>
*	IMPUESTOS IT = 3,09 % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3,09%	2635,981

<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>81,452</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)</b>	<b>2717,433</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)</b>	<b>2717,43</b>
(*) El proponente deberán señalar los porcentajes pertinentes a cada rubro	
Nota.- El Proponente declara que el presente Formulario ha sido llenado de acuerdo con las especificaciones técnicas, aplicando las leyes sociales y tributarias vigentes, y es consistente con el Formulario B-3.	

Fuente: Elaboración propia

El costo por cada tambor de 200 kg de cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita, es de 2717,43 Bs dando el precio unitario por 1 kilo de 13,58 Bs.

**Figura 4.6:** Comparación de costos de cemento asfáltico normal y cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita



Elaboración: Fuente propia

El siguiente análisis se divide en los siguientes aspectos clave:

**Costos iniciales**

Cemento asfáltico convencional:

Precio por unidad: 11Bs.

Usualmente más accesible debido a su composición estándar.

Costo de producción y transporte menores

Cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita:

Precio por unidad: 13,58 Bs (23,5% más caro).

Costos de producción más altos debido al uso de la nanoarcilla y su integración en la mezcla.

Incremento de costos por materiales adicionales y procesos tecnológicos.

### **Propiedades técnicas**

Cemento asfáltico convencional:

Resistencia estándar a deformaciones y fatiga

Menor tolerancia a condiciones extremas (temperatura, humedad, aumento del flujo vehicular)

Vida útil limitada bajo condiciones adversas (desintegración, fisuración temprana)

Cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita:

Mejor resistencia mecánica: La nanoarcilla de bentonita aumenta la rigidez del material, reduciendo las deformaciones.

Mayor durabilidad: Mejora la resistencia al envejecimiento y a la fatiga, prolongando la vida útil del pavimento.

Resistencia a altas temperaturas: Reduce el ablandamiento en climas cálidos, lo que minimiza fallas en verano.

### **Beneficios económicos a largo plazo**

Cemento asfáltico convencional:

Menor costo inicial, ideal para proyectos de bajo presupuesto.

Costo de mantenimiento más frecuentes debido al deterioro acelerado.

Mayor probabilidad de rehabilitaciones en el corto y mediano plazo.

Cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita:

Reducción de costos de mantenimiento: La mayor durabilidad y resistencia pueden disminuir intervenciones futuras.

Vida útil prolongada: Aunque el costo inicial es mayor, el ciclo de vida del pavimento será más largo.

Beneficios sociales: Menores interrupciones del tráfico debido a reparaciones frecuentes.

### **Relación costo-Beneficio**

Costo adicional: El material modificado es un 23,5% más caro, pero sus beneficios compensan este incremento en proyectos donde la durabilidad y la resistencia son prioritarias.

Beneficios a largo plazo: Si se considera la vida útil extendida del pavimento y los menores costos de mantenimiento, el costo total por año del material modificado puede resultar inferior al del convencional.

#### 4.5. ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA NORMAL 85-100 Y EL MODIFICADO.

**Tabla 4.4:** Resultado de las 18 briquetas de la Mezcla asfáltica modificada

Propiedades	Mezcla modificada						Especificaciones
	0%	0,50%	1%	2%	3%	4%	
Estabilidad	3711,02	3795,25	3847,77	3867,99	3886,28	3856,68	<b>Min. 1800 (lb)</b>
Fluencia	11,00	10,33	10,00	10,00	10,00	10,33	<b>8- 16 (0,01 pulg)</b>
% de Vacíos mezclas total	3,95	3,94	3,79	3,70	3,67	2,74	<b>3-5 (%)</b>
R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	75,77	75,81	76,58	76,74	77,19	82,05	<b>75-82 (%)</b>
V.A.M. (Vacíos de Agregado Mineral) (%)	16,32	16,31	16,17	15,91	16,07	15,26	<b>Min. 13 (%)</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.5:** Promedio de las 30 briquetas de la mezcla asfáltica modificada

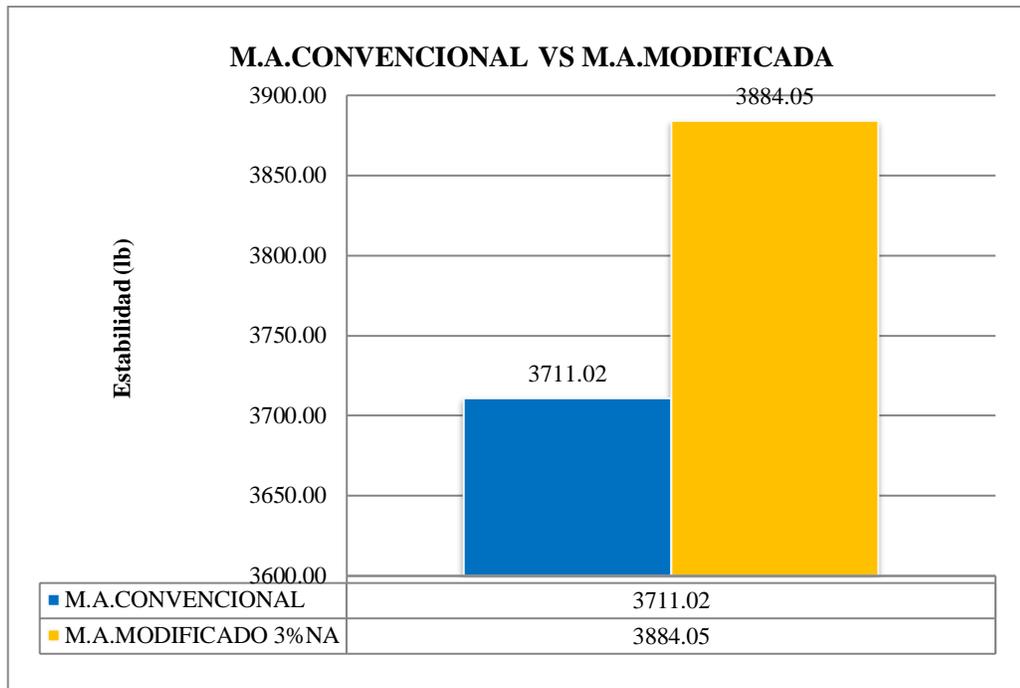
Ensayo	Valor promedio con el porcentaje óptimo nanoarcilla de bentonita	Especificaciones
Estabilidad Marshall(lb)	3884,05	<b>Min. 1800 (lb)</b>
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,32	-
% de Vacíos de mezcla total (%)	3,49	<b>3- 5 (%)</b>
R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	78,10	<b>75 - 82 (%)</b>
Fluencia (pulg)	9,84	<b>8- 16 (0,01 pulg)</b>
V.A.M. (Vacíos de agregado mineral) (%)	15,91	<b>Min. 13 (%)</b>

Fuente: Elaboración propia

## 4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA NORMAL 85-100 Y EL MODIFICADO.

### 4.6.1. Estabilidad

Figura 4.7: Comparación de los resultados de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Se analiza que la estabilidad mejora con la adición de aditivo nanoarcilla de bentonita al cemento asfáltico que se utilizó en la mezcla asfáltica modificada, como se evidencia en la gráfica la estabilidad de la mezcla asfáltica con un valor de 3884,05 lb. a comparación del valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional de 3711,02 lb.

Este incremento en la estabilidad no solo indica una mejor resistencia a las cargas, sino que también puede implicar una mayor vida útil y desempeño del material en aplicaciones pavimentarias.

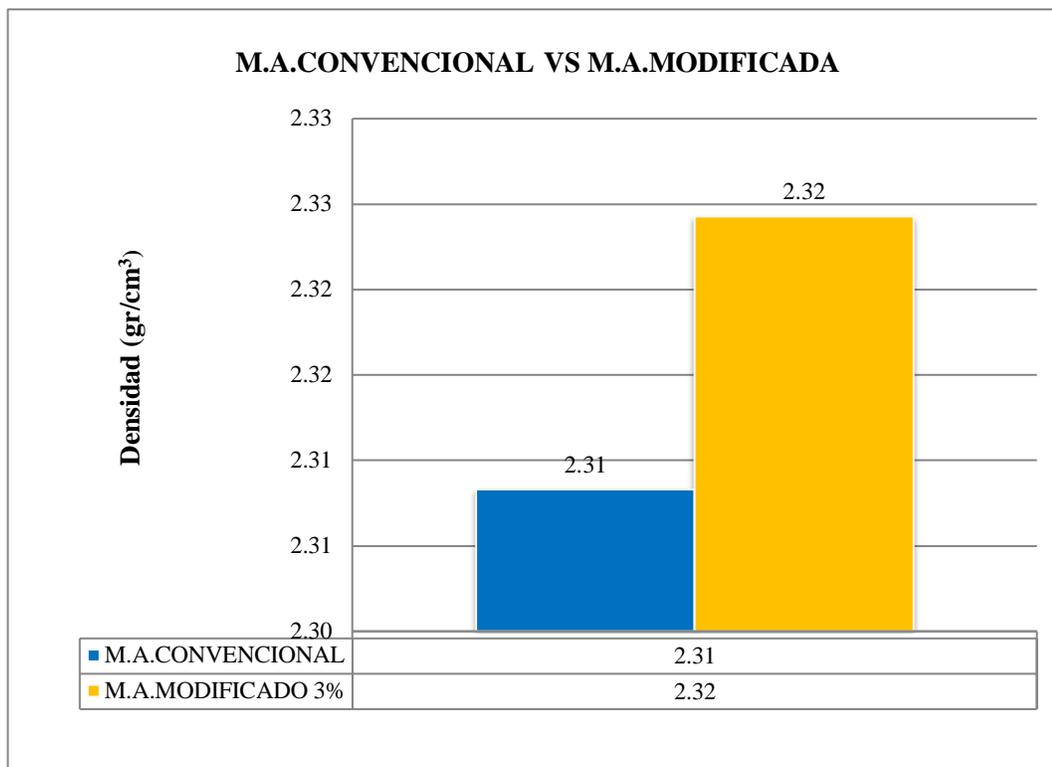
La mejora en estabilidad de 175,26 lb demuestra que el aditivo tiene un impacto positivo significativo, reforzando los parámetros mecánicos y la calidad de la mezcla.

Un mayor valor de estabilidad puede traducirse en una mejor resistencia al desgaste y a las deformaciones bajo tráfico.

Esto es crucial para aplicaciones que requieren materiales con alta capacidad de carga y durabilidad.

#### 4.6.2. Densidad

Figura 4.8: Comparación de los resultados de la densidad



Fuente: Elaboración propia

Se analiza que la densidad de la mezcla asfáltica modificada incrementa lo que da un claro indicador que el cemento asfáltico modificado con el aditivo nanoarcilla de bentonita al 3%, mejora la densidad de la mezcla asfáltica con un valor de 2,32 gr/cm<sup>3</sup>, la mezcla convencional tiene un valor de 2,31 gr/cm<sup>3</sup>.

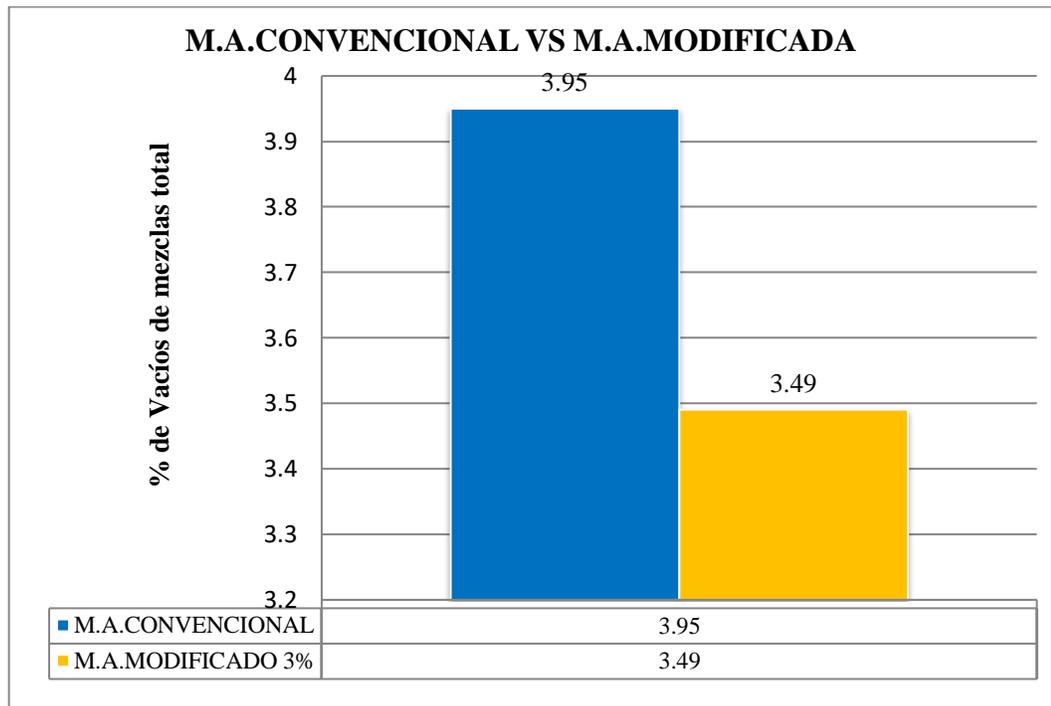
El uso del aditivo de nanoarcilla de bentonita al 3% ha logrado un incremento en la densidad de la mezcla asfáltica en **0,01 g/cm<sup>3</sup>**. Aunque el incremento es pequeño, es significativo para aplicaciones que requieren mejoras en la calidad de la mezcla.

La mejora en la densidad sugiere que el aditivo podría estar contribuyendo al refuerzo de los parámetros mecánicos de la mezcla asfáltica. La mayor densidad generalmente está asociada con una mayor resistencia y durabilidad del material asfáltico.

Estos resultados sugieren que la inclusión de nanoarcilla de bentonita puede ser una estrategia eficaz para optimizar las características de las mezclas asfálticas, lo que podría resultar en una mayor durabilidad y resistencia de las pavimentaciones.

### 4.6.3. % de Vacíos en la mezcla total

Figura 4.9: Comparación de los resultados de % de vacíos en la mezcla total



Fuente: Elaboración propia

Se analiza qué % de vacíos en la mezcla total de la mezcla asfáltica modificada incrementa lo que da un claro indicador que el cemento asfáltico modificado con el aditivo nanoarcilla de bentonita al 3%, mejora el % de vacíos mezcla total de la mezcla asfáltica con un valor de 3,95 %, la mezcla convencional tiene un valor de 3,49 %.

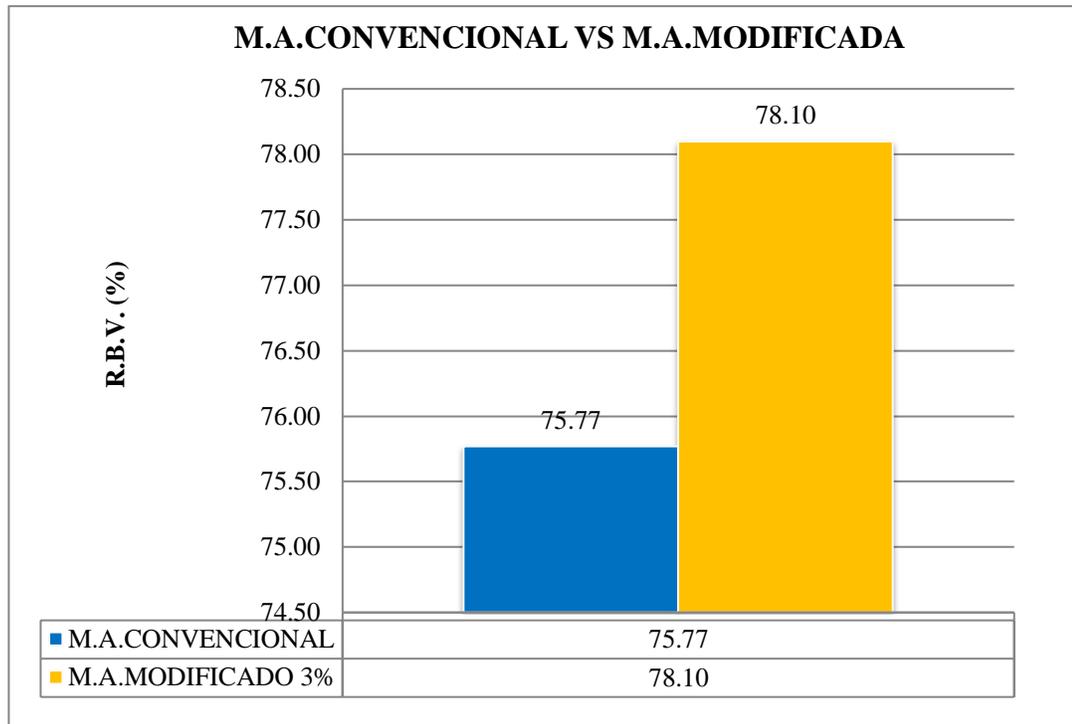
El uso del aditivo de nanoarcilla de bentonita al 3% ha logrado un incremento % de vacíos de mezcla total de la mezcla asfáltica en **0,46%**. Aunque el incremento es pequeño, es significativo para aplicaciones que requieren mejoras en la calidad de la mezcla.

Un menor % de vacíos en la mezcla asfáltica ayuda a evitar la acumulación excesiva de agua y la reducción de la adhesión.

Es decir que una reducción del % de vacíos en la mezcla total, significa que hay una distribución más uniforme de asfalto y agregados, mejorando la adhesión interna y resistencia al desgaste. Siempre y cuando establezcan un rango óptimo de vacíos según Norma (3% y 5%), para equilibrar resistencia, durabilidad y desempeño

#### 4.6.4. Relación betumen vacíos

Figura 4.10: Comparación de los resultados de RBV



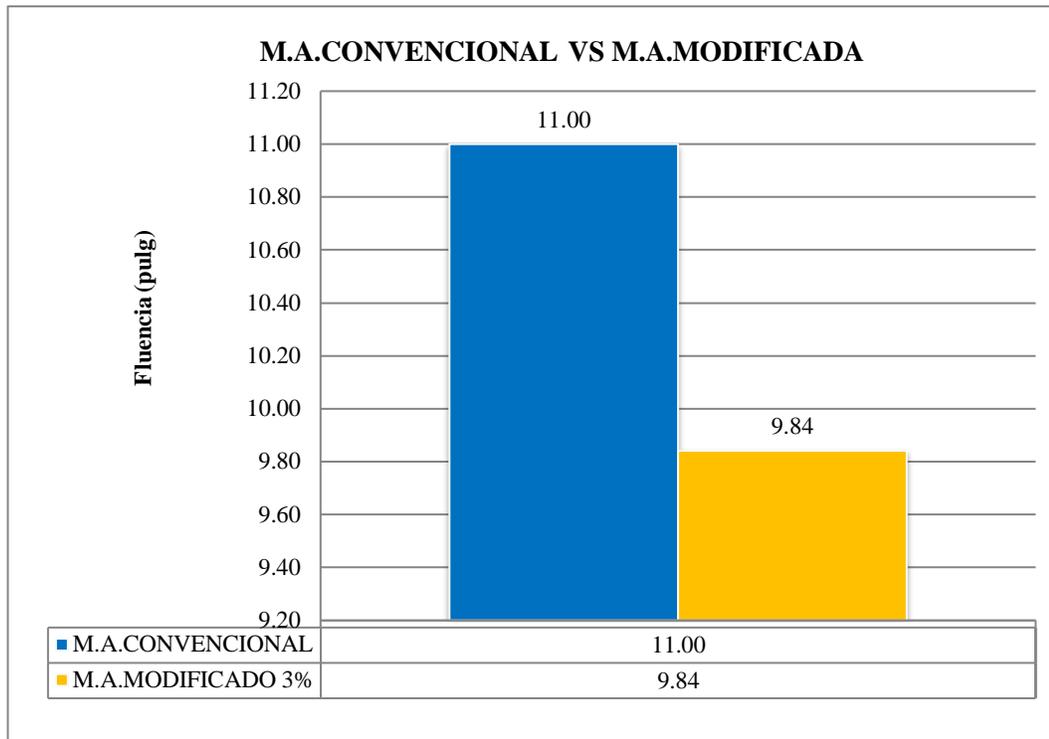
Fuente: Elaboración propia

Se analizó que el aditivo de nanoarcilla de bentonita tiene una influencia de mejora en la mezcla asfáltica modificada, en la relación R.B.V. con un valor de 78,10% y la mezcla asfáltica convencional tiene un valor de 75,77%, el incremento es de 2,33%, lo cual indica una mayor cantidad de betún en relación con los vacíos en la mezcla modificada. Una mayor R.B.V. vacíos sugiere que la mezcla asfáltica modificada tiene una mejor impregnación del betún en los vacíos del agregado. Por lo tanto, se puede concluir que el aditivo de nanoarcilla de bentonita mejora la relación betumes vacíos, donde mejora la durabilidad y reduce el riesgo de daño por desprendimiento (despegue entre el asfalto y los agregados), lo cual es un indicador positivo para la resistencia y longevidad de la mezcla asfáltica.

Siempre y cuando establezcan un rango óptimo de R.B.V. según Norma (75- 82 %), para equilibrar resistencia, durabilidad y desempeño.

#### 4.6.5. Fluencia

**Figura 4.11:** Comparación de los resultados de Fluencia



Fuente: Elaboración propia

Se analizó que el aditivo de nanoarcilla de bentonita tiene una influencia de mejora en la mezcla asfáltica modificada, en la fluencia con un valor de 9,84 pulg y la mezcla asfáltica convencional tiene un valor de 11pulg, el incremento es de 1,16%, lo cual indica una menor deformación en la mezcla modificada.

Una menor fluencia sugiere que la mezcla asfáltica modificada tiene una mejor resistencia a la deformación plástica bajo carga, lo cual afecta la resistencia al rutado y la estabilidad a largo plazo del pavimento.

El uso de nanoarcilla de bentonita al 3% en la mezcla asfáltica proporciona mejoras significativas en la estabilidad, densidad, % de vacíos en la mezcla total y relación betún-vacíos. Estos resultados sugieren que la modificación con nanoarcilla no solo incrementa la capacidad de carga de la mezcla, sino que también mejora su cohesión interna y resistencia a condiciones de tráfico y clima extremas. Por lo tanto, la adición del 3% de nanoarcilla parece ser una estrategia efectiva para optimizar el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica.

El uso de nanoarcilla de bentonita al 3% en la mezcla asfáltica proporciona mejoras significativas en la densidad, estabilidad y relación betún-vacíos. Estos resultados sugieren que la modificación con nanoarcilla no solo incrementa la capacidad de carga de la mezcla, sino que también mejora su cohesión interna y resistencia a condiciones de tráfico y clima extremas. Por lo tanto, la adición del 3% de nanoarcilla parece ser una estrategia efectiva para optimizar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

De acuerdo con el estudio correspondiente el análisis de las propiedades mecánicas del cemento asfáltico con adición de nanoarcilla de bentonita se llegó a las siguientes conclusiones:

- El objetivo general que se planteó en la investigación se cumple en su cabalidad, porque se logró realizar ensayos de caracterización del cemento asfáltico en diferentes porcentajes (0,5%, 1%, 2%, 3% y 4%), y precisar un porcentaje óptimo (3%) de adición dando como resultado un cemento asfáltico mejorado que nos brindará más seguridad al implementarlo en las obras viales de pavimentos flexibles.
- Los objetivos específicos planteados se cumplieron, se recopiló información de los cementos asfálticos modificados con polímeros naturales, que sirvió para respaldo de la investigación planteada, ya que no hay normas establecidas para la modificación de los cementos asfálticos con nanoarcilla de bentonita.
- A medida que aumenta el porcentaje de nanoarcilla, la penetración disminuye, lo que indica un aumento en la rigidez del cemento asfáltico modificado. La penetración se reduce significativamente a partir del 2% y 3% de adición, lo que sugiere que estos porcentajes incrementan notablemente la capacidad del asfalto para soportar mayores cargas y resistir deformaciones.
- La ductilidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de nanoarcilla, especialmente a partir del 4%, lo que implica una pérdida de plasticidad y elasticidad. Esto sugiere que un exceso de aditivo afecta negativamente la capacidad del cemento asfáltico para estirarse sin romperse. Por tanto, es recomendable mantener la adición por debajo del 4% para no comprometer la elasticidad.
- Con el aumento de los porcentajes de nanoarcilla, el punto de inflamación se eleva, lo que mejora la seguridad del asfalto en términos de resistencia a altas temperaturas. Esto es ventajoso para manipular el material en condiciones exigentes. Sin embargo, los valores obtenidos ya son seguros según las normas

estándar. A partir del 1% de adición de nanoarcilla, el punto de ablandamiento del asfalto aumenta, lo que sugiere una mayor resistencia del cemento modificado a las altas temperaturas.

- El porcentaje óptimo de aditivo de nanoarcilla de bentonita es del 3%, ya que ofrece un equilibrio entre mejoras en rigidez, resistencia a altas temperaturas y mantenimiento de la consistencia, sin comprometer gravemente otras propiedades importantes como la ductilidad. A partir del 4%, los beneficios adicionales se ven contrarrestados por una pérdida significativa de elasticidad y cohesión del material.
- El precio unitario se estimó tomando en cuenta todos los materiales y mano de obra necesaria para la modificación del cemento asfáltico, dando como resultado el precio por 1 kilogramo es de 13,58 Bs. Lo que se concluye que el asfalto modificado con nanoarcilla de bentonita es más caro con el costo inicial (11 Bs por kilogramo), pero su rendimiento superior lo convierte en una opción más eficiente en términos de costos a largo plazo. Se recomienda su uso en proyectos donde se prioricen la durabilidad, la calidad y la sostenibilidad, mientras que el cemento convencional puede ser más adecuado para proyectos con restricciones presupuestarias o de menor escala.
- Las 3 briquetas de la mezcla asfáltica convencional y las 30 briquetas de la mezcla asfáltica modificada, se realizaron con el contenido óptimo de cemento asfáltico que se obtuvo de realizar las 18 briquetas de una mezcla asfáltica convencional, y calcular por el método Marshall, el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5,49%.
- Se evaluó los parámetros mecánicos de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada, donde se denota mejoras en los parámetros mecánicos de la estabilidad con un valor de 3885,04 libras de la mezcla asfáltica modificada investigada a comparación de la mezcla convencional con un valor de estabilidad de 3711,02 libras, la densidad de la mezcla asfáltica modificada investigada con un valor de 2,32 gr/cm<sup>3</sup> a comparación de la mezcla convencional con un valor de 2,31 gr/cm<sup>3</sup> y la relación de betumen vacío de la mezcla asfáltica modificada con un valor de 78,10 % a comparación de la mezcla

convencional con un valor de 75,77 % donde se denota que al adicionar nanoarcilla de bentonita al cemento asfáltico mejora la mezcla asfáltica dándonos una mezcla asfáltica con propiedades reforzadas, donde la estabilidad es la que se incrementa de manera significativa dando como resultado una mezcla asfáltica más reforzada.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Es recomendable seguir las normas ASTM Y AASHTO para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico.
- Es recomendable no añadir un porcentaje mayor al 4% de nanoarcilla de bentonita, porque la disminución de la ductilidad es crítica, lo que podría afectar la capacidad del material para adaptarse a deformaciones en campo.
- Según el análisis de sus propiedades mecánicas y su costo, se recomienda su uso en proyectos donde prioricen la durabilidad, la calidad y la sostenibilidad, mientras que el cemento convencional puede ser más adecuado para proyectos con restricciones presupuestarias o de menor escala.
- Es recomendable calcular un contenido mínimo de cemento asfáltico, para calcular el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla asfáltica.
- Es recomendable realizar los ensayos a los agregados a ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas para conocer su calidad y propiedades, además de comprobar si cumplen con los requerimientos para su empleo.
- Se recomienda que las instituciones encargadas de la construcción de carreteras consideren la adopción de especificaciones técnicas que incluyan el uso de nanoarcillas como aditivos en mezclas asfálticas, estableciendo parámetros claros de dosificación y evaluación.
- Se recomienda investigar la combinación de nanoarcilla de bentonita con otros aditivos para ampliar su rango de aplicación en distintas condiciones climáticas y de tráfico.
- Se recomienda implementar un programa de seguimiento y monitoreo a largo plazo para evaluar el envejecimiento y las deformaciones de los pavimentos construidos con el cemento asfáltico modificado con nanoarcilla.

- Los estudios realizados hasta este momento se han concentrado en el desarrollo de proyectos netamente investigativos, por lo que no se conoce de experiencias en proyectos donde se haya implementado el uso de nanoarcillas como modificadoras de ligantes y mezclas asfálticas, por lo cual se recomienda implementar la modificación a proyectos de pequeño alcance con cortos períodos de vida útil, para así confirmar con experiencias en campo los resultados obtenidos en laboratorio.