

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

En los últimos años en cualquier obra de ingeniería civil se debe contemplar el no dañar (o en lo menor posible) el medio ambiente, por lo cual una de las ramas principales de la ingeniería que es la construcción vial debe ser mejorada. Esta área es una de las más agresivas con el medio ambiente, debido a que en la construcción de una vía se daña considerablemente el lugar en donde es emplazada la obra, destruyendo así parte de nuestra valiosa fauna silvestre.

De la fabricación de mezclas asfálticas convencionales empleadas en la ciudad de Tarija (mezclas asfálticas en caliente), surge la necesidad de realizar un estudio de investigación que genere beneficios importantes en aspectos sobre todo ambientales, disminuyendo la emisión de gases tóxicos producido por las altas temperaturas a las que son sometidas las mezclas asfálticas para el proceso de pavimentado.

Europa y Estados Unidos ya realizaron estudios en búsqueda de nuevas alternativas para la pavimentación, tomando en cuenta que reduciendo las temperaturas a la que se elaboran las mezclas asfálticas se podrá disminuir el gran daño que se le está causando al ecosistema. La reducción en la emisión de gases tóxicos, también el ahorro en el consumo de combustible en los procesos de mezclado y compactación, son una de las principales ventajas de estos estudios. Tal vez no es una solución total para la contaminación, pero definitivamente si es un alivio y una forma de reducirla considerablemente.

Con este proyecto se buscará crear una mezcla asfáltica a menor temperatura que las denominadas mezclas asfálticas calientes, y que entren en la clasificación de mezclas asfálticas tibias o semicalientes que se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los (100°C), hasta cerca de los (150°C).

Conociendo que las mezclas asfálticas elaboradas a menores temperaturas que las especificadas para las mezclas asfálticas convencionales, el asfalto difícilmente se adhiere a los demás componentes y no logran una mezcla homogénea, produciendo

además una mezcla de difícil manipulación. Por este motivo se incorporará a la mezcla asfáltica el mineral natural Zeolita, el cual durante el proceso de fabricación de la mezcla libera progresivamente agua, ayudando a disminuir la viscosidad de la sustancia bituminosa, facilitando la manejabilidad de la mezcla y permitiendo un mezclado a menor temperatura.

1.2. Justificación.

En la ciudad de Tarija la metodología que se utiliza para mezclas asfálticas es la convencional (mezclas asfálticas calientes), la cual emite gases tóxicos y un elevado consumo de combustible para conseguir estas elevadas temperaturas.

Lo que se quiere lograr con este estudio es reducir estas altas temperaturas, creando una mezcla asfáltica denominada tibia (100°C a 150°C) con el fin de mitigar en porcentaje la emisión de gases tóxicos emitidos por las mezclas asfálticas calientes, lo cual va incidir directamente con el medio ambiente.

Para lograr reducir la temperatura de las mezclas asfálticas se incorporará a la mezcla un mineral natural llamado Zeolita. Este mineral tiene iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Gracias a esta estructura molecular la zeolita tiene la capacidad de desprender agua de manera continua a medida que se calienta a temperaturas relativamente bajas.

La adición de la zeolita durante el proceso de fabricación de la mezcla ayuda a disminuir la viscosidad de la sustancia bituminosa, facilita la manejabilidad de la mezcla y permite un mezclado a temperatura inferior a la de una mezcla convencional.

1.3. Planteamiento del problema.

1.3.1. Situación problemática.

Para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales se necesitan temperaturas muy elevadas, lo cual origina problemas ambientales con altos índices de contaminación, que se caracteriza por el aumento de energía en la elaboración de las mezclas, consumo de combustible y emisión de gases tóxicos, entre los cuales están: El dióxido de

nitrógeno u óxido de nitrógeno (NO_2), Dióxido de azufre u óxido de azufre (SO_2) y dióxido de carbono (CO_2); así mismo se genera emisiones contaminantes de los compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes del betún, lo cual produce sobrecalentamiento de la atmosfera.

Se conjetura que su causa más importante son las altas temperaturas, que se necesita, para que el asfalto al estar en un estado fluido, recubra completamente el agregado de forma homogénea y así mismo, permita una buena manejabilidad durante el proceso de extensión y compactación.

En este estudio, se adicionará a la mezcla asfáltica un porcentaje de un mineral natural (Zeolita) que libera agua de hidratación la cual hace que el asfalto se espume, permitiendo la reducción de la temperatura de fabricación.

1.3.2. Problema.

¿Mediante la incorporación de Zeolita (mineral natural) a la mezcla asfáltica, se reducirá la temperatura para su fabricación, disminuyendo también así la emisión de gases para mitigar no en su totalidad, pero si en parte a la contaminación ambiental?

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Analizar la elaboración de las mezclas asfálticas agregando Zeolita natural a temperaturas menores que las mezclas asfálticas convencionales, según la metodología de diseño Marshall.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Recopilar la información según la metodología que se va a seguir para lograr mezclas asfálticas tibias o semicalientes.
- Caracterizar los materiales que se van a emplear para verificar si cumplen con las especificaciones de los ensayos desarrollados en los manuales de la Administradora Boliviana de carreteras, considerando los ensayos disponibles en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

- Realizar pruebas a la Zeolita natural para conocer sus características.
- Determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla convencional, según la metodología de diseño Marshall.
- Elaborar mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a la convencional basado en la metodología de diseño Marshall, incorporando distintos porcentajes de Zeolita.
- Evaluar los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas con Zeolita, con el fin de determinar si disminuyendo la temperatura de fabricación estas cumplen con los parámetros de la metodología de diseño Marshall.
- Realizar el análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica convencional y de las mezclas asfálticas con zeolita.

1.5. Hipótesis.

Implementando Zeolita a la mezcla asfáltica convencional, se podrá reducir la temperatura que necesita la mezcla para que sea homogénea y manejable, ayudando a disminuir la viscosidad de la sustancia bituminosa, sin alterar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

1.6. Definición de variables independientes y dependientes.

Variable independiente.

- Incorporación de zeolita.

Variable dependiente.

- Temperatura de la mezcla asfáltica.

Conceptualización y operacionalización de las variables.

Tabla 1. 1: Conceptualización y operacionalización de variables

Variable	Conceptual	Dimensión	Indicador	Técnicas
Independiente	Se refiere a la implementación de zeolita en la mezcla asfáltica	Zeolita	Caracterización de la zeolita	Granulometría
Incorporación de Zeolita				Cemento asfáltico	Caracterización del cemento asfáltico	Peso específico
		Punto de ablandamiento		
		Penetración		
		Punto de inflamación		
		Ductilidad		
		Densidad		
		Materiales pétreos	Caracterización de los agregados	Granulometría
				Densidad
Mezclas asfálticas		Caracterización de las mezclas asfálticas	Desgaste a los ángeles	
	Equivalente de arena			
dependiente	Se refiere a la temperatura de fabricación de mezclas asfálticas con zeolita	Mezclas asfálticas	Caracterización de las mezclas asfálticas	Metodología Marshall
Temperatura de fabricación				Metodología Marshall

Fuente: Elaboración propia

1.7. Diseño metodológico.

1.7.1. Componentes.

1.7.1.1. Unidad de estudio.

Mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de Zeolita (mineral natural), con el fin de reducir su temperatura de producción.

1.7.1.2. Población.

Mezclas asfálticas (clasificadas según su temperatura).

1.7.1.3. Muestra.

Probetas (briquetas) fabricadas a distintas temperaturas con Zeolita que entren en el rango de mezclas asfálticas semicalientes o tibias (100°C - 150°C).

1.7.1.4. Muestreo.

Se fabricarán briquetas con y sin Zeolita a distintas temperaturas, donde el agregado pétreo y cemento asfáltico STRATURA BETUPEN PLUS (85-100) se obtuvo de la planta fabricadora de mezclas asfálticas Charaja de la ciudad de Tarija, el mineral natural Zeolita se obtuvo de la empresa argentina Diatec SRL ubicado en los Olivos que es un barrio situado en el partido de Vicente López provincia argentina de Buenos Aires.

1.7.2. Métodos y técnicas empleadas.

1.7.2.1. Definición y elaboración del método.

Método inductivo: Es el método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares. En el que se pueden distinguir los siguientes pasos esenciales: la observación de los hechos para su registro, la clasificación y el estudio de estos hechos, la derivación inductiva que parte de los hechos y permite llegar a una generalización, y la contrastación. En nuestro análisis el método seguirá las siguientes etapas:

- Ensayos a los componentes de las mezclas asfálticas

- Implementación de la zeolita en la mezcla asfáltica a diferentes temperaturas y porcentajes, para su preparación de probetas según la metodología de diseño Marshall
- Recopilación de datos de las probetas analizadas con y sin zeolita
- Contratación de las mezclas asfálticas

Técnica experimental: Que cuenta con los medios necesarios de instrumentación y equipos adecuados para desarrollar la metodología y obtener los resultados.

- Se realizarán ensayos a los componentes de la mezcla asfáltica, posteriormente se incorporará la zeolita.
- Una vez incorporada la zeolita en la mezcla asfáltica se realizarán las probetas según la metodología Marshall para determinar sus características.

1.7.2.2. Técnicas de muestreo.

Se utilizará el muestreo probabilístico aleatorio simple: donde todos los componentes de las mezclas asfálticas tienen las mismas probabilidades de salir seleccionadas.

- Tanto el agregado grueso y fino, como el cemento asfáltico se obtuvieron de la chancadora y planta de asfaltos CHARAJA de la ciudad de Tarija.
- El mineral Zeolita se obtuvo de la empresa argentina Diatec SRL.

Figura 1.7- 1: Equipo necesario para el muestreo



Fuente: Internet

La cantidad de material que se necesitara de agregados pétreos como de cemento asfáltico estará sujeto a la cantidad de probetas que se analizaran de acuerdo con el método Marshall, teniendo una cantidad de material de respaldo suficiente para repetir y/o realizar otro tipo de ensayo necesario a los componentes de la mezcla.

1.7.3. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos.

Equipo necesario para la mezcla asfáltica:

- Equipo Marshall consta de:
- Una máquina para la aplicación de la carga vertical, diseñada especialmente para esta prueba, cuya capacidad es de 2724 Kg. (6000 Lb.).
- Moldes para la preparación de muestras de 10 cm. (4") de diámetro interior. Cada molde tiene una base metálica y se halla dividida en dos secciones; la sección inferior tiene 7,5 centímetros (3") de altura, y la superior 6,35 cm. (2 ½").
- Un sujetador de molde para facilitar la compactación de la mezcla.
- Un martillo o pisón de base circular con 9,8 cm. (3 7/8") de diámetro, 4,5 Kg. (10 Lb.) de peso y 46 cm. (18") de caída libre.
- Un dispositivo para las pruebas de estabilidad, especialmente diseñado, y formado por dos segmentos semicirculares cuyo diámetro interior mide 5 cm. (2").
- Un medidor de escurrimiento acoplado al dispositivo anterior.

Figura 1.7- 2: Equipo Marshall



Fuente: Internet

Los equipos e instrumentos necesarios para los distintos ensayos previos a la mezcla asfáltica están desarrolladas en los manuales técnicos brindados por la Administradora Boliviana de Carreteras.

1.7.4. Procedimientos de aplicación.

- Se realizará ensayos a los componentes de la mezcla asfáltica convencional, tanto a los agregados gruesos como finos y también al cemento asfáltico, para conocer sus características y ver si estos cumplen con las especificaciones dadas para poder utilizarlas en la fabricación de mezclas asfálticas.
- La zeolita natural será sometida a distintos ensayos para conocer sus características.
- Según la metodología de diseño Marshall, se fabricarán mezclas asfálticas convencionales para encontrar el contenido óptimo de asfalto.
- Conociendo el contenido óptimo de asfalto se incorporará la zeolita como aditivo a los materiales de la mezcla asfáltica a diferentes temperaturas (130°C y 100°C), con el fin de conocer el rango de temperaturas donde la mezcla sea manejable y homogénea. Teniendo en cuenta también el porcentaje de zeolita que se utilizara para las distintas temperaturas, partiendo de la tecnología Aspha Min, el cual utiliza una cantidad de zeolita de 0.3% de la mezcla.
- Una vez fabricadas las briquetas con distintos porcentajes de zeolita, se procederá a sus rupturas en la prensa Marshall, con el fin de saber su estabilidad y fluencia.
- Recopilado todos los datos de las briquetas con zeolita, se contrastará los resultados con los de una mezcla asfáltica convencional, y comprobar si es factible incorporar la zeolita a mezclas asfálticas cumpliendo las especificaciones dadas por la metodología de diseño Marshall.

1.7.5. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información.

Los resultados de los ensayos efectuados a los componentes de la mezcla asfáltica (agregado grueso y fino, cemento asfáltico) y del mineral natural “Zeolita”, serán

analizados con el fin de caracterizar los materiales y verificar si son aptos para la fabricación de una mezcla asfáltica.

Del método de diseño Marshall se obtendrán graficas de las mezclas asfálticas, analizando los resultados de:

- Estabilidad vs. Contenido de asfalto.
- Flujo vs. Contenido de asfalto.
- Peso unitario de la mezcla total vs. Contenido de asfalto.
- Porcentaje de vacíos de aire vs. Contenido de asfalto.
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto.
- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto.

Con la finalidad de obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico para la producción de mezclas asfálticas.

De igual manera se analizarán los resultados de las mezclas con zeolita a las diferentes temperaturas de producción, obteniendo así un porcentaje de zeolita como aditivo.

Una vez recopilados todos los datos de las mezclas asfálticas con y sin zeolita, se realizará una comparación de sus características tomando en cuenta si los valores de la mezcla asfáltica con zeolita cumplen con los parámetros de una mezcla calificada.

1.8. Alcance de la investigación.

Dar a conocer el fenómeno que está causando una situación problemática a nuestro medio, dando lugar a un objetivo de cómo resolver dicho problema, fundamentada por una hipótesis y sustentada por las variables operacionales.

Recopilar la teoría básica sobre la definición y características de una mezcla asfáltica, tomando en cuenta también los ensayos necesarios para caracterizar los componentes de dichas mezclas.

También recopilar la teoría básica de mezclas asfálticas semicalientes o tibias, mencionando las tecnologías o métodos ya realizados en otros países dando a conocer sus ventajas y beneficios.

Realizar los ensayos correspondientes para la caracterización de los materiales, efectuar las pruebas a la zeolita para observar su comportamiento y mediante el método Marshall realizar los ensayos a las probetas (briquetas) con y sin zeolita. Posteriormente generar las gráficas a partir del método Marshall para las mezclas asfálticas con y sin zeolita, para su posterior análisis y contrastación.

Analizar los resultados de los ensayos, teniendo en cuenta los parámetros que necesita una mezcla asfáltica para considerarla óptima.

Realizar las conclusiones y debidas recomendaciones según la experiencia adquirida en la investigación.

**CAPITULO II: CARACTERÍSTICAS Y
DEFINICIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

CAPITULO II: CARACTERÍSTICAS Y DEFINICIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Mezclas asfálticas.

También conocido como hormigón bituminoso, hormigón asfáltico, concreto bituminoso o agregado asfáltico consiste en una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato. Se fabrican en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden en capas y se compactan.¹

Debido a sus propiedades las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos.

Su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por esta.

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

- Según fracciones de agregado pétreo empleado.
- Según la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.
- Según el tamaño máximo del agregado pétreo.
- Según la estructura del agregado pétreo.
- Según la granulometría.
- Según su temperatura.

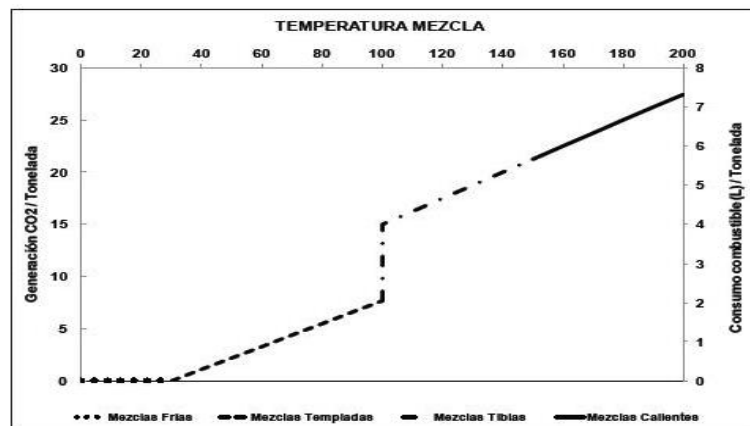
¹ Kraemer et al., 2004.

2.2. Clasificación de las mezclas asfálticas según su temperatura.

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar en base a los diferentes rangos de reducción de temperatura que se consiguen. Directamente relacionados con estos rangos de reducción se puede hallar el consumo de combustible por tonelada.

- **Mezclas asfálticas frías (Cold Mixes):** se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperaturas ambiente (hasta 40°C) y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan emulsiones.
- **Mezclas templadas (Half-Warm Mix Asphalt):** este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.
- **Mezclas tibias o semicalientes (Warm Mix Asphalt):** se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los (100°C), hasta cerca de los (150°C). Sera este tipo de mezclas en las que nos centremos.
- **Mezclas calientes (Hot Mix Asphalt):** las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los (160°C). Son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como el recubrimiento de áridos.

Gráfica 2. 1: Temperatura de fabricación, consumo de combustible y cantidad de emisiones de gases efecto invernadero



Fuente: Ing. Desarro. Vol. 31 no. 1 Barranquilla Jan/June 2013

2.3. Componentes de las mezclas asfálticas.

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 son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de los componentes afecta el conjunto. Es por esto, que debe tenerse muy presente la calidad del ligante asfáltico y el polvo mineral, los cuales son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo.²

2.3.1. Definición y caracterización del cemento asfáltico.

Es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados.

El cemento asfáltico ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías debido principalmente a que es un material altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, que posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento), por lo que:

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

El asfalto puede ser caracterizado de tres maneras, según el reglamento técnico centroamericano RTCA 75.01.22:047. Estas formas de caracterizar el asfalto resultan

² ASPHALT INSTITUTE (1973). "Manual del Asfalto". Traducido por Manuel Velázquez. PROAS. Ediciones URMO. España.

útiles si la interpretación de los resultados es apropiada, el asfalto se puede caracterizar por grado de viscosidad, por grado de penetración y por grado de desempeño. Independientemente cada caracterización intenta evaluar la consistencia del asfalto a una o varias temperaturas, así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, susceptibilidad al envejecimiento y seguridad.³

Caracterización por grado de viscosidad.

El principio fundamental de la caracterización por grado de viscosidad es determinar la viscosidad absoluta a 60°C y asignar como resultado o consistencia obtenida el grado AC correspondiente, para luego verificar los demás requisitos para este grado AC (por ejemplo, AC30) en el resto de ensayos verificados.

Tabla 2. 1 Especificaciones para el cemento asfáltico. Clasificados por su viscosidad a 60°C

Característica	Unid.	Método ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250+-50	500+-100	1000+-200	2000+-400	3000+-600	4000+-800
Viscosidad, 135°C min	mm ² /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25°C, 100g, 5s min	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99	99	99	99	99	99
Pruebas sobre residuos del ensayo de horno sobre película delgada		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100	100	75	50	40	25

Fuente: La Gaceta N°245, Costa Rica: RTCA 75.01.22:22:047, ley 8489 productos de petróleo asfaltos especificaciones, CR, 2005.

³ QUIM. JORGE SALAZAR DELGADO, LanammeUCR. 2011. *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según reglamento técnico centroamericano (RTCA 75.01.22:047).*

Caracterización por grado de penetración.

La cantidad de muestra necesaria para la realización de las pruebas es un galón (3,79 litros) de asfalto. Adicionalmente se recomienda tener una muestra del mismo asfalto para utilizarlo como testigo. El principio fundamental es clasificar el asfalto de acuerdo con los resultados del ensayo de penetración a 25°C. Se debe verificar el cumplimiento de los de más parámetros especificados.

Tabla 2. 2: Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su grado de penetración

Característica	Unid.	Método ASTM	Grado de penetración				
			40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
			Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min-Max
Penetración, 25°C, 100g, 5s min	-	D-5	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Punto de inflamación	°C	D-92	232----	232----	232----	218----	177----
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	Cm	D-113	100----	100----	100----	100----	100----
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99----	99----	99----	99----	99----
Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada	%	D-5 después de realizar D-1754	55+----	52+----	47+----	42+----	37+----
Ductilidad 25°C, 5 cm(min), después de prueba de horno sobre película delgada	Cm	D-113 después de realizar D-1754	-----	50-----	75----	100----	100----

Fuente: La Gaceta N°245, Costa Rica: RTCA 75.01.22:22:047, ley 8489 productos de petróleo asfaltos especificaciones, CR, 2005.

Grado de desempeño.

La cantidad de muestra necesaria para la realización de las pruebas es de medio galón (alrededor de 2 litros) de asfalto. Se recomienda tener una muestra adicional del mismo asfalto para utilizarlo como testigo.

El principio fundamental es realizar los envejecimientos en el horno de película delgada rotacional (RTFO) y en el recipiente de envejecimiento presurizado (RTFO+PAV) (de sus siglas en ingles), medir las propiedades reológicas de la muestra en condición original, la muestra acondicionada RTFO y la muestra acondicionada RTFO+PAV y buscar con base a estos el rango de clasificación en el cual se cumplen los requerimientos, a los demás ensayos se les debe verificar el cumplimiento.

Para conocer las características del cemento asfáltico, la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) nos brinda un manual de los diferentes ensayos que se pueden realizar, tanto a cementos asfálticos no modificados y modificados.

Teniendo en cuenta que los ensayos mínimos que se realizaron para cementos asfálticos no modificados son:⁴

**2.3.1.1. A0102 Método para determinar la densidad (ASTM D71-94
AASHTO T229-97).**

Objeto: Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Informe:

- a) La densidad, aproximada a 1 (kg/m³).
- b) La temperatura de ensaye.

⁴ ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS *manual de ensayos de suelos y materiales* asfaltos*. Edición APIA XXI Ingenieros y arquitectos consultores.

2.3.1.2. A0103 Método de ensaye de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97).

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

El ensaye de penetración se usa como medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

Precisión: Use el siguiente criterio para juzgar si los resultados de penetración son aceptables para asfaltos a 25°C.

- Precisión para un solo operador: El coeficiente de variación determinado para un solo operador, es de 1,4% para penetraciones sobre 60 y la desviación estándar para un solo operador, desde 0,35 para penetraciones bajo 50. Por lo tanto, los resultados de dos ensayes adecuadamente ejecutados por el mismo operador, con el mismo material de cualquier penetración y usando el mismo equipo, no deberían diferir uno del otro en más de 4% de su media o 1 unidad en otros casos.
- Precisión entre los laboratorios: El coeficiente de variación encontrado entre laboratorios es de 3,8% para penetraciones sobre 60 y la desviación estándar entre laboratorios es de 1,4 para penetraciones bajo 50. Por lo tanto, los resultados de dos ensayes adecuadamente ejecutados, con el mismo material de cualquier penetración y en dos laboratorios diferentes, no deberían diferir uno del otro en más de 11% de su media o 4 unidades en otros casos.

2.3.1.3. A0106 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96).

Objeto: El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites, combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C determinado por medio de este método de ensaye.

Cálculos: Corrija el punto de inflamación o el punto de combustión o ambos de acuerdo a la corrección por presión barométrica.

Informe la corrección del punto de inflamación o punto de combustión o ambos, como el punto de inflamación o combustión de la copa abierta de Cleveland.

Precisión: Use los siguientes datos para juzgar la aceptabilidad de resultados (95% confianza).

Repetibilidad: Resultados duplicados por el mismo operador serán considerados sospechosos si difieren en más de las siguientes cantidades.

Punto de Inflamación = 8°C

Punto de Combustión = 8°C

Reproducibilidad: Los resultados presentados por cada laboratorio, serán considerados sospechosos si difieren en más de las siguientes cantidades.

Punto de Inflamación = 16°C

Punto de Combustión = 14°C

2.3.1.4. A0105 Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00).

Objeto: La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensaye 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.

Informe:

- Un ensaye normal es aquel en el cual el material entre los dos clips se ha estirado hasta el punto de convertirse en un hilo y la ruptura ocurre en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal. Se informará el

promedio de tres ensayos normales como la ductilidad de la muestra, indicando la temperatura de ensaye.

- Si el material bituminoso llega a tener contacto con la superficie del agua o el fondo del baño, el ensaye no será considerado normal. Se ajustará la densidad del agua del baño agregando alcohol metílico o cloruro de sodio de modo que el material bituminoso no llegue a la superficie del agua ni toque el fondo del baño durante el ensaye.
- Si no obtiene un ensaye normal en tres ensayos sucesivos en iguales condiciones, informe la ductilidad como no obtenible bajo esas condiciones de ensaye.

2.3.1.5. A0110. Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96).

Objetivo: Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

Definición: Punto de ablandamiento es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

Precisión: El siguiente criterio se debe utilizar para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad).

Repetibilidad. La duplicidad del punto de ablandamiento obtenido por el mismo operador no se considerará dudoso a menos que difiera de esta más de 1°C (desviación normal estimada 0,73%).

Reproducibilidad. Los puntos de ablandamiento informados por cada uno de los laboratorios, no se considerarán dudosos a menos que los dos informes difieran en más de 2°C (desviación normal estimada 1,26%).

2.3.2. Definición y caracterización de los materiales pétreos.

Son aquellos que provienen de la roca, de una piedra o de un peñasco; habitualmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, principalmente en la naturaleza, aunque de igual modo existen otros que son procesados e industrializados por el ser humano.⁵

Es necesario tener en cuenta que, para la realización de obras importantes, la clasificación visual de los agregados debe ser completada con ensayos de laboratorio que determinen características funcionales.

Para conocer las características de los materiales pétreos, la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) nos brinda un manual de los diferentes ensayos que se pueden realizar, tanto para los agregados gruesos y finos.⁶

Teniendo en cuenta que los ensayos mínimos que se realizaron para los agregados gruesos y finos son:

2.3.2.1. A0506 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E AASHTO T27-99).

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

Expresión gráfica: La expresión gráfica de la granulometría de un pétreo se debe en un sistema de coordenadas ortogonales, cuya abscisa, a escala logarítmica, indica las aberturas nominales y cuya ordenada, a escala lineal, indica los valores de la granulometría.

⁵ Tecnologías. Materiales: Los pétreos. Versión impresa.

⁶ ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS *manual de ensayos de suelos y materiales* asfaltos*. Edición APIA XXI Ingenieros y arquitectos consultores

2.3.2.2. A0519 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91).

Objeto: Este método establece los procedimientos para determinar las densidades. Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Precisión: Acepte la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos gruesos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de los dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas, sea:

- a) Igual o inferior que 20 kg/m³ en la determinación de densidades.
- b) Igual o inferior que 3 decimales porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

2.3.2.3. A0520 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00).

Objeto: Este método establece los procedimientos para determinar las densidades. Es aplicable a los áridos finos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Precisión: Acepte la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos finos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de los dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas, sea:

- a) Igual o inferior que 20 kg/m³ en la determinación de densidades.
- b) Igual o inferior que 4 decimales porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

2.3.2.4. A0511 Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99).

Objeto: Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,36 mm, de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, mediante la máquina de Los Ángeles.

Cálculos: Calcule el desgaste del árido como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, aproximando a un decimal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{(\%)} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

Donde:

P = Pérdida de masa de la muestra (%).

m_i = Masa inicial de la muestra (g).

m_f = Masa final de la muestra (g).

2.3.2.5. A0509 Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00).

Objeto: Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (Nº4).

Precisión: Debe aceptarse la determinación del equivalente de arena solamente cuando la diferencia entre dos resultados obtenidos por el mismo operador, en ensayos paralelos sobre muestras gemelas, sea igual o inferior a 4 puntos.

2.3.3. Definición y caracterización del filler.

Los filler son sustancias finamente divididas las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en él, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Usualmente sus sustancias minerales; materiales orgánicos tales como madera o corcho, raramente se utilizan.⁷

⁷ Revista ARQHYS. 2012, 12. Mezclas de asfaltos y fillers.

Típicos fillers minerales: cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc.

El efecto general de la adicción de fillers es endurecer el asfalto.

Para conocer las características del filler, la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) nos brinda un manual de los diferentes ensayos que se pueden realizar.⁸

Teniendo en cuenta que los ensayos mínimos que se realizaron para los agregados gruesos y finos son:

2.3.3.1. A0520 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00).

Objeto: Este método establece los procedimientos para determinar las densidades. Es aplicable a los áridos finos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Precisión: Acepte la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos finos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de los dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas, sea:

- c) Igual o inferior que 20 kg/m³ en la determinación de densidades.
- d) Igual o inferior que 4 decimales porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

2.4. Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.

Desarrollado por Bruce Marshall para el departamento de Carreteras del estado de Mississippi en la década de 1930, el cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU., empezó a estudiarlo en 1943 durante la segunda guerra mundial.⁹

- Se evaluó el esfuerzo de compactación.

⁸ ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS *manual de ensayos de suelos y materiales* asfaltos*. Edición APIA XXI Ingenieros y arquitectos consultores

⁹ Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types, Manual Series No. 2. Sixth Edition (Asphalt Institute).

- Se adopto el martillo de 10 lbf con 50 golpes por cada cara de las muestras.
- Se adopto el criterio de 4% de vacíos causados por el tráfico vehicular.

ASTM D6927-06 Método de ensayo para la estabilidad y el flujo Marshall de mezclas bituminosas.

Marshall original:

- Mezcla asfáltica en caliente con tamaño máximo de 25.0 mm o menos.
- Se han desarrollado metodologías para el tamaño máximo hasta 38.0 mm.

El método Marshall permite el diseño de mezclas en laboratorio y el control de calidad en campo.

El método es empírico y su significado se pierde completamente si el procedimiento no se respeta en su totalidad.

Selección y evaluación de los agregados.

- Todos los materiales deben satisfacer las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de los agregados deben satisfacer la granulometría de las especificaciones.
- Para los análisis de peso unitario y vacíos se debe determinar el peso específico bulk de las fracciones de agregado (Gsb) y del cemento asfáltico (Gb).

Selección y evaluación del asfalto.

- Adecuado para las condiciones del proyecto.
- Temperaturas de mezcla y compactación en laboratorio.

Elaboración de mezclas de prueba.

- Se calientan los agregados y el asfalto.
- Se elaboran especímenes cilíndricos compactos de 64 mm de alto x 102 mm de diámetro (briquetas).

Las principales características del método Marshall son:

- Análisis de peso unitario y vacíos de los especímenes compactados.
- Ensayo de la estabilidad y el flujo de los especímenes compactados.

El objetivo del diseño es establecer el contenido óptimo de asfalto. Se preparan muestras con diferentes contenidos de asfalto en incrementos de 0.5%.

Se estima el contenido óptimo de asfalto con: experiencia previa, con una fórmula, o con la relación llenante mineral-ligante. Deben elaborarse al menos dos muestras por encima y dos por debajo del óptimo estimado. Una muestra consta de al menos tres especímenes.

Preparación de agregados: seque los agregados a peso constante (105°C – 110°C) y sepárelos en las siguientes fracciones:

Fracción	Rango de tamaños (mm)
1" a ¾"	25 a 19
¾" a 3/8"	19 a 9.5
3/8" a No. 4	9.5 a 4.75
No. 4 a No. 8	4.75 a 2.36
Pasa No. 8	< 2.36

Determine las temperaturas de mezcla con el asfalto y de compactación en laboratorio.

Compactación de especímenes.

- Ponga un disco de papel en la parte superior de la mezcla.
- Ponga el molde sobre el pedestal de compactación.
- Aplique los golpes que correspondan con el martillo de compactación según la especificación de diseño.
- Mantenga el eje del martillo perpendicular a la base durante la compactación.
- Remueva la base y el collar del molde, vuélvelo y vuélvalo a ensamblar para compactar la otra cara del espécimen.
- Luego de compactar remueva la base y los discos de papel y permita que la muestra se enfríe hasta que pueda ser extraída del molde sin deformarse.

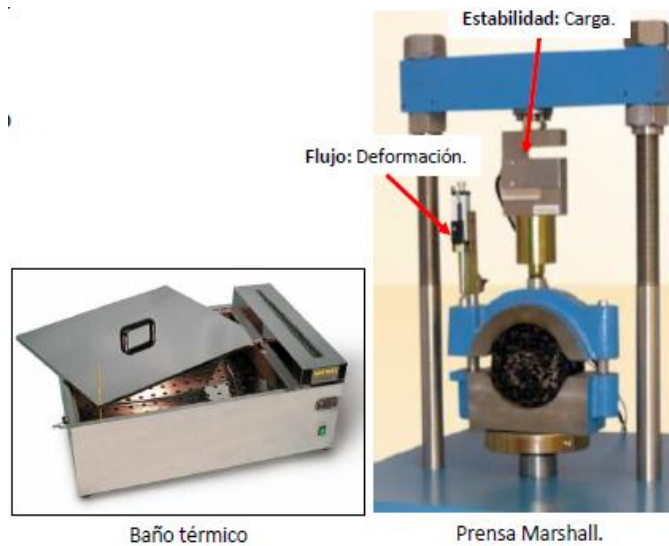
- Remueva el espécimen del molde con un extractor, ponga en una superficie plana y déjelo enfriar durante la noche.

Cada espécimen compactado será sometido a:

- Determinación del peso específico bulk.
- Ensayo de estabilidad y flujo.
- Análisis de densidad y vacíos.

Equipos empleados:

Figura2. 1: Baño térmico, Maquina de ensayo Marshall



FUENTE: Perfil y propiedades. Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Luis Ricardo Vásquez Varela, M.Sc.

Interpretación de los resultados del ensayo:

- Corrija la estabilidad de los especímenes con alturas diferentes de 63.5 mm.
- Promedie las estabilidades corregidas y los flujos medidos en las muestras para un mismo contenido de asfalto.
- Prepare graficas de: Estabilidad vs. Contenido de asfalto; flujo vs. Contenido de asfalto; Peso unitario de la mezcla total vs. Contenido de asfalto; Porcentaje de vacíos de aire vs. Contenido de asfalto; Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

vs. Contenido de asfalto; porcentaje de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto.

- Relación de corrección para la estabilidad Marshall según el volumen de la briqueta.

2.4.1. Caracterización de las mezclas asfálticas.

Para determinar las características de las mezclas asfálticas se deben realizar los ensayos establecidos en los manuales de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), los cuales son:¹⁰

2.4.1.1. A0605 Método para determinar la densidad máxima de mezclas asfálticas sin compactar (ASTM D 2041).

Objeto: Este método permite determinar la densidad máxima teórica de mezclas asfálticas sin compactar, a 25°C, así como el porcentaje de ligante absorbido por los áridos de la mezcla, de modo de cuantificar la cantidad total o efectiva de asfalto requerida por la misma.

Precisión: El criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados de los ensayos de densidad obtenidos mediante este método, es el siguiente:

Rango de aceptabilidad para dos resultados (Kg/m³):

- Precisión para un operador = 11
- Precisión para conjunto de laboratorios = 19

2.4.1.2. A0608 Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall (AASHTO T 245-97).

Objeto: Este método describe la medición de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas, cargadas sobre un manto lateral, usando

¹⁰ ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS *manual de ensayos de suelos y materiales* asfaltos*. Edición APIA XXI Ingenieros y arquitectos consultores.

el aparato Marshall. Este método es aplicable a mezclas asfálticas con árido de tamaño máximo 25mm.

Informe: Debe incluir lo siguiente:

- Carga máxima promedio (newton) de a lo menos 3 probetas, corregidas cuando sea necesario.
- Valor promedio de la fluidez (0,25 mm) de a lo menos 3 probetas.
- Temperatura de mezclado.
- Temperatura de compactación.

2.4.1.3. A0606 Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

Objeto: Este método establece procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

Cálculos: Calcule la densidad de la probeta con la fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{(D-E)}{\rho_w} - \frac{(D-A)}{\rho_p}} * 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Donde:

A = Masa de la probeta seca en aire (g).

D = Masa de la probeta seca más parafina en aire (g).

E = Masa de la probeta seca más parafina en agua (g).

Pp = Densidad de la parafina (25°C) ± 1g/cm³.

Pw = Densidad del agua (1,0 g/cm³).

2.4.1.4. A0613 Método de diseño Marshall.

Objeto: Este método es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno, y describe una metodología para determinar el óptimo de asfalto en las mezclas.

Determinaciones previas:

- Determine la densidad real seca de cada árido que participa en la mezcla y la del filler, si lo hubiera.
- Determine la densidad del cemento asfáltico a 25°C.
- Determine la densidad máxima de la mezcla suelta, para un contenido de asfalto próximo al óptimo previsto.
- Prepare las probetas según la metodología Marshall.
- Determine las densidades de las probetas compactadas.
- Mida la estabilidad y la fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall.

Determinación de contenido óptimo de asfalto.

Capa de rodadura:

- Determine el contenido óptimo de asfalto de la mezcla considerando las curvas de densidad, estabilidad y huecos en la mezcla. De dichas curvas se determinan los porcentajes de asfalto (Pb) que entreguen: máxima estabilidad (Pb1), máxima densidad (Pb2), contenido de asfalto para un 5% de huecos (Pb3). El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

$$Pb \text{ óptimo} = \frac{Pb1 + Pb2 + Pb3}{3}$$

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

Capa de base y capa intermedia (Binder):

- Seleccione como contenido óptimo de asfalto el porcentaje de ligante que, con una tolerancia de $\pm 0,5$ puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla.

2.5. Parámetros estandarizados según norma ASTM.

2.5.1. Granulometría.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.¹¹

Tabla 2. 3 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3616)

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2in (60mm)	1 1/2 in (37.5 mm)	1 in (25.0 mm)	3/4 in (19.0 mm)	1/2 in (12.5 mm)	3/8 in (9.5 mm)	No. 4 (4.76 mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 1/2 in. (63 mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (60 mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 1/2 (37.5 mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
1 in. (25.0 mm)	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
3/4 in. (19.0mm)	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
1/2 in. (12.5 mm)	35 - 65	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
3/8 in. (9.5 mm)	...	...	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...
No. 4 (4.75 mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	36 - 65	44 - 74	65 - 85	80 - 100	...	100
No. 8 (2.36 mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	29 - 58	32 - 67	65 - 100	...	96 - 100
No. 16 (1.18 mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	85 - 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	70 - 95
No. 50 (300 µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	45 - 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	20 - 40
No. 200 (75 µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Fuente: “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas” P. Garnica – H. Delgado.

2.5.2. Especificaciones para mezclas asfálticas convencionales.

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño

¹¹ ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFALTICAS, P.Garnica Anguas-H. Delgado Alamilla. Publicación Técnica Nro. 246. Sanfandila, Qro, 2004.

preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitara hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 2. 4: Criterio de diseño de Mezclas Marshall.

Método Marshall		Trafico ligero		Trafico medio		Tráfico pesado	
		Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla		Min	max	min	max	min	max
Compactación, numero de golpes en cada uno de los especímenes		35		50		75	
Estabilidad	(N)	3336		5338		8006	
	(lb)	750	-	1.200	-	1800	-
Flujo, (0,25 mm) (0,01 in)		8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos		3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales		ver tabla VMA					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto		70	80	65	78	65	75

Fuente: “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas” P. Garnica – H. Delgado.

Tabla 2. 5: Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA).

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacío de aire		
mm	In	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 6	16.0	17.0	18.0
9.50	3/8”	14.0	15.0	16.0
12.50	½”	13.0	14.0	15.0
19.00	¾”	12.0	13.0	14.0
25.00	1.0”	11.0	12.0	13.0
37.50	1.5”	10.0	11.0	12.0

Fuente: “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas” P. Garnica – H. Delgado.

2.6. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño.

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

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar serias consideraciones.

Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:

2.6.1. Vacíos bajos y estabilidad baja.

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia, proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

2.6.2. Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria.

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

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

2.6.3. Vacíos satisfactorios y estabilidad satisfactoria.

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

2.6.4. Vacíos altos y estabilidad satisfactoria.

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden

ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos.

Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

2.6.5. Vacíos altos y estabilidad baja.

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales.

2.7. Definición de zeolita.

El termino zeolita fue acuñado originalmente en 1756 por el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt, quien observo que al calentar rápidamente stilbita, se producen grandes cantidades de vapor de agua que había sido absorbida por el material. Con base a esto, llamo zeolita al material, donde el ζέω griego (zeo) significa "hervir" y λίθος (lithos), "piedra".¹²

Los principales materiales geológicos donde yacen zeolitas son en rocas sedimentarias y en estratos volcánicos de diverso tipo. En cuanto a ambientes geológicos las zeolitas tienden a formarse en ambientes específicos que pueden clasificarse así: lagunas salinas o alcalinas, superficies y suelos salinos o alcalinos, sedimentos de fondo oceánico, zonas donde agua percola en sistemas hidrológicos abiertos, zonas de alteración hidrotermal y durante la diagénesis de sedimentos.

Las Zeolitas son minerales aluminosilicatos micro porosos presente de forma natural en rocas de origen volcánico que contiene oxido de aluminio (Al_2O_3) y cuarzo (SiO_2), con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom. Este mineral tiene iones

¹² Heterogeneous asymmetric epoxidation of cis-ethyl cinnamate over Jacobsen's catalyst immobilized in inorganic porous materials p. 37 [thesis p. 28], § 2.4.1 Zeolites.

grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse de un modo reversible. Las zeolitas naturales se encuentran, tanto en rocas sedimentarias como en volcánicas y metamórficas.

2.7.1. Caracterización de la Zeolita.

Se sometió a la zeolita natural a distintos ensayos para conocer sus propiedades y características relevantes.

2.7.1.1. A0506 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E AASHTO T27-99).

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

Expresión gráfica: La expresión gráfica de la granulometría de un pétreo se debe en un sistema de coordenadas ortogonales, cuya abscisa, a escala logarítmica, indica las aberturas nominales y cuya ordenada, a escala lineal, indica los valores de la granulometría.

2.7.1.2. S0307. Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100).

Objetivo: Este método establece el procedimiento para obtener el peso específico relativo de un suelo.

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso del frasco con marca de enrase. Todas las magnitudes son mensurables en laboratorio. El peso del frasco lleno de agua hasta el enrase es función de la temperatura de prueba, este valor generalmente se extrae de la curva de calibración.

El peso del suelo seco se determina antes de la prueba en materiales gruesos y después de ella en suelos finos plásticos, la razón es que si los suelos arcillosos son secados antes de la prueba estos pueden formar grumos y dentro ellos crear vacíos de aire.

Luego de calculados los pesos específicos a veces se tiene la necesidad de ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20°C, cuya densidad de agua es 0,99791.

2.8. Mezclas asfálticas modificas (semicalientes o tibias).

Las mezclas tibias son un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa durante el tratado de Kyoto y la Comunidad Económica Europea como respuesta para disminuir los gases del efecto invernadero mitigando estos problemas ambientales causados por la humanidad.¹³

2.8.1. Ventajas de las mezclas asfálticas semicalientes.

Hoy en día se pueden enmarcar ciertas ventajas de las mezclas asfálticas semicalientes o tibias frente a las mezclas en caliente:

- Tiene la misma calidad y resistencia.
- Ahorro de energía de mezclado y compactación.
- Ahorro de combustible.
- Menor oxidación del asfalto.
- Usa las mismas especificaciones.
- Menor desgaste de los elementos mecánicos de la planta.
- Facilita la extensión y compactación de la mezcla.
- Pronta apertura al tráfico después de la compactación.
- La pavimentación se puede realizar con un clima más frío.
- Disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reducción en la producción de humos y olores de la fabricación y puesta en obra.
- Mejores condiciones de trabajo de los operarios.
- Puede usar las plantas existentes para la fabricación de mezclas en caliente.

¹³ Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2008

2.8.2. Tecnologías para obtener mezclas asfálticas semicalientes.

Hoy en día se conocen una variedad de tecnologías y métodos para reducir significativamente las temperaturas a las que se producen las mezclas asfálticas, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. 6: Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos.

Proceso de mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado total toneladas producidas a la fecha
Aditivos – ceras					
Sasobit (Fischer-Tropsch cera)	Sasol	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2.5	Variados, 120°C - 130°C	Alemania y otros países por todo el mundo	> 10 millones de toneladas por todo el mundo
Asfalto – B (Montan cera)	Romonta	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2.5% al peso	Variados, 115°C - 135°C	Alemania	Desconocido
Licomont BS 100 (aditivo) o sūbit (acido adiposo amidas)	Clariant	Si, alrededor de 3% del peso	Variados, 115°C - 135°C	Alemania	> 322.500 metros cuadrados desde 1994
3E LT or Ecoflex (propietario)	Colas	Sí, 2% del Peso	Variados, 115°C - 135°C	Francia	Desconocido

Proceso de mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado total toneladas producidas a la fecha
Proceso espumado					
Aspha - min(zeolite)	Eurovia y MHI	Si, alrededor de 0.3% en peso total de la mezcla	Entre 110°C y 135°C	Alemania Francia y Estados unidos	Alrededor de 300.000 Toneladas
ECOMAC mezcla fría antes de echarla	Sreg	Si (tipo y calidad desconocida)	Situado alrededor de 45°C	Francia	Algunas pruebas
LEA, también EBE y EBT (espumoso de una porción de fracción agregada)	LEACO, Fairco, y EIFFAGE Travaux publics	Si, 0.2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión	< 100°C	Francia, España, Italia y Estados unidos	> 100.000 toneladas
LEAB (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Si, añadieron 0.1% en peso	90°C (194°F)	Países bajos	siete proyectos comerciales

LT Asfalto (asfalto espumoso con adición de Higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nynas	Si, añadieron 0.5% - 1% de una pasta de relleno de Higroscopia	90°C	Países bajos e Italia	Desconocido
Mezclas tibias de asfalto espumoso		Inyección de agua alta presión	110 - 120°C	Francia, Noruega, también Canadá, Italia, Luxemburgo, Países bajos, Suecia, Suiza y Reino unido	> 60.000 Toneladas

Proceso de mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado total toneladas producidas a la fecha
Aparición de tecnologías de estados unidos					
EVOTHERM (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead-Westvasco	SI	85 - 115°C	Francia también Canadá, China, Sudáfrica y Estados unidos	> 17.000 Toneladas
Doble – barrel Green	Astec	Inyección de agua a presión vaporizada	116-135°C	Estados unidos	>4.000 Toneladas
Advera (zeolite)	PQ corporation	Si alrededor de 0.25% de peso total de la mezcla	Variados 120 - 130°C	Estados unidos	> 10.000 toneladas
	Mathy Construction	Tensioactivo diluido	110°C (230°F)	Estados Unidos	Solo secciones de prueba

Fuente: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2008

2.8.3. Tecnología Aspha-min (patentado por EUROVIA).

Esta tecnología se basa en la adición de 0.3% de la masa de la mezcla, de una Zeolita sintética en forma de polvo, al mismo tiempo en que el asfalto se vierte en el mezclador. Esta Zeolita al calentarse, libera agua de hidratación la cual hace que el asfalto se espume, permitiendo la reducción de la temperatura de fabricación. Este procedimiento

puede ser empleado con todo tipo de asfaltos ya sean convencionales o modificados, así como en el reciclado de mezclas.¹⁴

Tabla 2. 7: Temperatura de fabricación y extendido.

Temperatura de fabricación y extendido			
T°C de las mezclas	Sin Zeolita	Con Zeolita	Variación
En los camiones	159°C	131°C	-28°C
En la extendedora	157°C	130°C	-27°C

Fuente: (Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-Min ecología en acción).

Tabla 2. 8: Efecto en las propiedades del aglomerado.

Efecto en las propiedades del aglomerado				
Especificación		Sin Zeolita	Con Zeolita	Variación
% huecos	$4 \leq v \leq 8$	6.5	7.3	+0.8
Textura (mm)	≥ 0.8	0.98	1.03	+0.05

Fuente:(comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-Min ecología en acción).

Al igual que en las demás mezclas a menor temperatura de la usual, esta tecnología también presenta gran cantidad de beneficios ambientales y de consumo de combustible. Produce un ahorro de 20% en la cantidad de combustible consumido por la planta, se producen reducción de un 18% a 23% en las emisiones contaminantes de los compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes del betún, también reduce la cantidad de gases tóxicos, entre los cuales están: Dióxido de azufre u óxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno u óxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de carbono (CO₂).

¹⁴ Evaluation of Aspha Min Zeolite for use in warm mix asphalt. Graham C. Hurley – Brian D. Prowell. June 2005

Tabla 2. 9: Emisiones de mezcla asfáltica caliente y mezcla asfáltica semicaliente.

Emisiones de las mezclas en caliente(mg/m3)			
170°C sin zeolita		140°C con zeolita Aspha-min	
Aerosoles	Aerosoles + vapor	Aerosoles	Aerosoles + vapor
< 0.8	0.8 – 2.7	< 0.36	0.36 – 0.6

Fuente: (Comunicación libre: mezclas semicalientes con Aspha-min ecología en acción).

Debido a los resultados obtenidos en obra esta tecnología con Zeolita Aspha-Min ha demostrado su utilidad para la fabricación de mezclas bituminosas, lo cual la ha hecho merecedora a el reconocimiento por parte del director del “Service d’etudes techniques des routes et autoroutes (setra)” otorgando una Carta de Innovación a esta tecnología y resaltando su contribución a la reducción de contaminantes a la atmósfera y por la reducción del consumo energético.

**CAPITULO III: DISEÑO DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS CON Y
SIN ZEOLITA**

CAPITULO III: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON Y SIN ZEOLITA

3.1. Generalidades.

Una vez caracterizado los componentes de mezcla asfáltica se definirá si estos cumplen con las especificaciones dadas para cada ensayo correspondiente, tanto en el agregado grueso, fino y en el cemento asfáltico.

Con los resultados favorables de la caracterización se procede a calcular un porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla convencional (150°C – 160°C) según la metodología de diseño Marshall.

Con el porcentaje óptimo de asfalto, se estableció dos temperaturas de estudio para la incorporación del mineral zeolita (130°C y 100°C), haciendo variar en el porcentaje de zeolita natural partiendo de 0.3% del total del peso de cada briqueta.

Se sometieron las briquetas a la máquina de Marshall para determinar sus respectivas estabilidades y fluencias con el fin de determinar si hay briquetas que cumplan con el parámetro de estabilidad mínimo requerido (1800 lbf), para los distintos porcentajes de zeolita a diferentes temperaturas.

3.2. Ubicación y procedencia de los materiales.

Tanto el agregado grueso y fino, como el cemento asfáltico se obtuvieron de la chancadora CHARAJA, ubicado en la localidad San José de Charaja, perteneciente al municipio de Uriondo de la provincia Avilez.

El cemento asfáltico BETUPEN PLUS (85-100) es de origen brasilero de la petrolera STRATURA.

El mineral Zeolita (natural), se obtuvo de la empresa argentina Diatec SRL ubicado en los Olivos que es un barrio situado en el partido de Vicente López provincia argentina de Buenos Aires.

3.3. Muestreo.

Figura 3. 1: Agregado de 3/4", 3/8" y arena.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 2: Cemento asfáltico (85 - 100).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 3: Mineral zeolita natural.



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Desarrollo para la caracterización de los materiales.

3.4.1. Caracterización del agregado.

3.4.1.1. A0506 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E AASHTO T27-99).

Se selecciono los tamices de acuerdo a los requerimientos correspondientes del material por ensayar, se procedió manualmente y por agregado separado (grava, gravilla y arena).

Tabla 3.4- 1: Granulometría grava.

Peso Total (gr.) = 2000					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	111.80	111.80	5.59	94.41
1/2"	12.5	1025.80	1137.60	56.88	43.12
3/8"	9.50	596.40	1734.00	86.70	13.30
1/4"	6.30	263.30	1997.30	99.87	0.14
Nº4	4.75	2.70	2000.00	100.00	0.00
Nº8	2.36	0.00	2000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	2000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	2000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	2000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	2000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	2000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	2000.00	100.00	0.00
SUMA		2000.00			
PÉRDIDAS		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4- 2: Granulometría gravilla.

Peso Total (gr.) = 2000					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/4"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	12.5	27.10	27.10	1.36	98.65
1/4"	9.50	1013.00	1040.10	52.01	48.00
Nº4	4.75	607.80	1647.90	82.40	17.61
Nº8	2.36	306.50	1954.40	97.72	2.28
Nº16	1.18	20.60	1975.00	98.75	1.25
Nº30	0.60	0.70	1975.70	98.79	1.22
Nº50	0.30	1.90	1977.60	98.88	1.12
Nº100	0.15	0.70	1978.30	98.92	1.09
Nº200	0.075	14.60	1992.90	99.65	0.36
BASE	-	7.10	2000.00	100.00	0.00
SUMA		2000.00			
PÉRDIDAS		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4- 3: Granulometría Arena.

Peso Total (gr.) = 2000					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
½	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.30	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	23.70	23.70	1.19	98.82
Nº8	2.36	392.40	416.10	20.81	79.20
Nº16	1.18	424.80	840.90	42.05	57.96
Nº30	0.60	406.60	1247.50	62.38	37.63
Nº50	0.30	341.10	1588.60	79.43	20.57
Nº100	0.15	203.20	1791.80	89.59	10.41
Nº200	0.075	105.60	1897.40	94.87	5.13
BASE	-	102.60	2000.00	100.00	0.00
SUMA		2000.00			
PÉRDIDAS		0.00			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. A0509 Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00).

El material seleccionado fue aquel que paso el tamiz Nro. 4 y dejado al horno hasta peso constante, en probetas se introdujo primeramente el material seguido de la solución del ensaye, se realizó pequeños golpes la base de las probetas con el fin de desalojar todas las burbujas y se procedió a la agitación de las mismas manualmente.

Se dejo reposar por un periodo corto donde se introdujo el pisón en cada probeta de ensayo cuidadosamente hasta que quede apoyado en la arena, de igual manera se retiró el pisón evitando rozamiento con las paredes de las probetas.

Finalmente se dejó por un tiempo en reposo hasta donde se pudo evidenciar la separación de la arcilla con la arena.

Tabla 3.4- 4: Equivalente de Arena.

N° de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)
1	10.3	12.30
2	10.1	11.8
3	10.3	13.10

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

H1 = Es la altura en cm de la arena.

H2 = Es la altura total de la muestra.

3.4.1.3. A0511 Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99).

Este ensaye se lo realizo para la grava y la gravilla, donde fueron sometidos a un lavado para remover el polvo superficial, luego se lo hizo secar en el horno hasta lograr un peso constante.

Se escogió la gradación 5 (20-10) para la grava, con una carga abrasiva de 11 esferas a 500 revoluciones.

Tabla 3.4- 5: Gradación grava.

Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Muestra (gr.)
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
		mi = 5000

Fuente: Elaboración propia.

Se escogió la gradación 6 (10-5) para la gravilla, con una carga abrasiva de 8 esferas a 500 revoluciones.

Tabla 3.4- 6: Gradación gravilla.

Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Muestra (gr.)
3/8	1/4	2500
1/4	No. 4	2500
		mi = 5000

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4. A0519 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91).

Se preparo la muestra con material retenido en el tamiz Nro. 8, se le realizo un lavado con el fin de remover el polvo superficial, se le introdujo a un horno hasta lograr un peso constante.

Se hizo el registro de distintos pesos:

Peso seco, peso superficialmente seco en el cual sumergió la muestra en agua durante un periodo de 24 horas aproximadamente y con un paño absorbente se removió la película visible de agua adherida, y el peso sumergido donde se colocó la muestra en un canastillo en agua.

Masa del árido saturado superficialmente seco (g).	$M_{SSS} =$	2570	gr.
Masa del árido sumergido (g).	$M_{SUM} =$	1595	gr.
Masa del árido seco (g).	$M_S =$	2535	gr.

3.4.1.5. A0520 Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00).

La muestra para el ensayo es a partir del material que paso el tamiz Nro. 8, se registran distintos pesos:

Peso seco, se colocó la muestra en el horno hasta masa constante.

Peso superficialmente seco, seguidamente se cubre el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente necesaria para asegurar su saturación en un tiempo aproximado de 24 horas, se eliminó progresivamente el exceso de agua hasta llevar el material en condición suelta, comprobando con el molde cónico a 25 golpes.

Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).	$M_{SSS} =$	525	gr.
Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g).	$M_a =$	694.6	gr.
Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (g).	$M_m =$	990.7	gr.
Masa de la muestra seca (g).	$M_S =$	483.4	gr.

3.4.2. Caracterización del cemento asfáltico.

3.4.2.1. A0102 Método para determinar la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T229-97).

Previamente se limpiaron los picnómetros y se puso a calentar el cemento asfáltico hasta lograr su estado fluido cuidando que se produzca pérdida por evaporación.

Para realizar este ensayo se registraron los diferentes pesos:

Ensayo	Unid.	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	77.83	80.8	80.8
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	60.02	63.5	62.1
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	78.35	80.8	81.0
Peso Específico	grs./cm ³	1.017	0.996	1.005

3.4.2.2. A0103 Método de ensaye de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97).

Se calentó el cemento asfáltico cuidadosamente hasta lograr un estado fluido, seguidamente se vertió a unas taras donde se dejó reposar por una hora cubiertas para prevenir asentamiento de polvo, se introdujo las taras con el cemento asfáltico a baño maría a una temperatura constante de 25°C.

Se procedió a realizar la práctica de penetración de al menos 3 veces en cada tara con un peso de 100 grs en 5 segundos.

Ensayo Penetración	Unid.	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Lectura N°1	mm.	82	91	93
Lectura N°2	mm.	87	93	92
Lectura N°3	mm.	88	89	92

3.4.2.3. A0105 Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00).

Se armaron los moldes y se les cubrió con una película delgada de desmoldante (talco y vaselina líquida), una vez calentado el cemento asfáltico hasta su estado fluido se vierte en los moldes teniendo en cuenta no desarmarlos, se deja reposar a temperatura ambiente por alrededor de 30 minutos, luego se lo colocó en baño maría durante 30 minutos a una temperatura constante de 25°C, seguidamente se introdujo los moldes en el ductilímetro para realizar el ensayo, observando atentamente el momento en donde se produzca una rotura de la película de cemento asfáltico o si la misma llega a chocar con el fondo del ductilímetro.

Ensayo	Unid.	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	99	106.6	101

3.4.2.4. A0106 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96).

Se hizo una limpieza a la copa de Cleveland con el fin de remover toda suciedad antes de verter el cemento asfáltico hasta la marca de enrase, posteriormente se lo colocó en el calentador para aplicarle calor y una vez que la temperatura del cemento asfáltico va subiendo se le pasa una llama de prueba cada de 2°C hasta notar que el cemento asfáltico llegue a producir una llama azulada, en el momento que se logra evidenciar la llama se anota la temperatura como el punto de inflamación.

Ensayo	Unid.	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>265	>283	>269

3.4.2.5. A0110 Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T35-96).

Se calentó el cemento asfáltico hasta su estado fluido donde se vació en los anillos precalentados y previamente recubiertos de algún líquido desmoldante para evitar que el cemento asfáltico se adhiera a la placa, se introdujo los anillos al aparato y se le dejó en agua fría a 5°C durante unos 15 minutos, después se introdujo las bolas en los anillos y se comenzó a aplicar calor al aparato de manera uniforme hasta que las bolas lleguen a tocar la placa inferior, y se registra la temperatura.

Ensayo	Unid.	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de ablandamiento	°C	43.0	46.0	43.0

3.4.3. Caracterización de la Zeolita.

3.4.3.1. A0506 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E AASHTO T27-99).

Tabla 3.4- 7: Granulometría Zeolita.

Peso Total (gr.) = 150					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
N°10	2	2.10	2.10	1.40	98.60
N°40	0.4	30.60	32.70	21.80	78.20
N°200	0.075	38.70	71.40	47.60	52.40
BASE	-	78.30	149.70	99.80	0.20
SUMA		149.70			
PÉRDIDAS		0.30			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.2. S0307. Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100).

Se calibro el picnómetro en donde se realizó el ensaye. En donde se registraron los siguientes pesos:

Peso del plato vacío (gr)	= 112.1
Peso del plato + muestra seca (gr)	= 192.2
Peso del suelo seco (gr)	= 80.1
Factor de corrección 20°C (k)	= 1.00

3.5. Metodología de diseño Marshall para mezclas asfálticas convencionales.

De acuerdo a nuestro tamaño máximo nominal de agregado se logró identificar el rango de granulometría requerido para realizar una mezcla asfáltica convencional y así determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

3.5.1. Diseño granulométrico Marshall.

Tabla 3.5- 1: Granulometría elaborada

Tamices	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL				Especificaciones	
		Peso Ret. a 2000 gr	Peso Ret. a 2000 gr	Peso Ret. a 2000 gr	al 0.25	al 0.30	al 0.45	Peso Ret. 1.00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	111.80	0.00	0.00	27.95	0.00	0.00	27.95	27.95	1.40	98.60	90	100
1/2"	12.5	1025.70	0.00	0.00	256.43	0.00	0.00	256.43	284.38	14.22	85.78	-	-
3/8"	9.50	596.40	27.10	0.00	149.10	8.13	0.00	157.23	441.61	22.08	77.92	56	80
1/4"	6.30	263.30	1012.80	0.00	65.83	303.84	0.00	369.67	811.27	40.57	59.43	-	-
Nº4	4.75	2.70	607.80	23.70	0.67	182.34	10.67	193.68	1004.95	50.25	49.75	35	65
Nº8	2.36	0.00	306.50	392.40	0.00	91.95	176.58	268.53	1273.48	63.68	36.32	23	49
Nº16	1.18	0.00	20.60	424.80	0.00	6.18	191.16	197.34	1470.82	73.55	26.45	-	-
Nº30	0.60	0.00	0.70	406.60	0.00	0.21	182.97	183.18	1654.00	82.71	17.29	-	-
Nº50	0.30	0.00	1.90	341.10	0.00	0.57	153.50	154.07	1808.07	90.42	9.58	5	19
Nº100	0.15	0.00	0.70	203.20	0.00	0.21	91.44	91.65	1899.72	95.00	5.00	-	-
Nº200	0.075	0.00	14.60	105.60	0.00	4.38	47.52	51.90	1951.62	97.59	2.41	2	8
BASE	-	0.00	7.10	102.20	0.00	2.13	45.99	48.12	1999.74	100.00	0.00	-	-
SUMA		1999.90	1999.80	1999.60	499.98	599.94	899.82	1999.70					
PÉRDIDAS		0.10	0.20	0.40									

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Cálculo de los materiales para el diseño Marshall.

Tabla 3.5- 2: Granulometría elaborada.

Materiales	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00	84.00
Peso de Grava (gr)	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50	279.00
Peso de Gravilla (gr)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Arena (gr)	515.70	513.00	510.30	507.60	504.90	502.20
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Determinación de parámetros previos a la rotura de briquetas.

Se desarrollará el procedimiento que se realizó para las briquetas con un contenido de asfalto de 4.5%, debido que es un cálculo repetitivo para cada briqueta con distintos porcentajes de asfalto.

- Identificación y medición de la altura de las briquetas.

Se enumeraron las briquetas en orden numérico en grupos de 3 briquetas para cada porcentaje de asfalto, se midieron las alturas de 4 puntos diferentes para sacar un promedio y tener un valor representativo de su altura.

N° de probeta	Altura de probeta
1	6.50
2	6.43
3	6.46

- Peso de la briqueta seca.

N° de probeta	Peso seco (grs).
1	1201.2
2	1192.8
3	1198.4

- Peso de la briqueta saturada superficialmente seca.

N° de probeta	Peso sat. Sup. Seca (grs).
1	1205.2
2	1194.1
3	1199.5

- Peso de la briqueta sumergido.

N° de probeta	Peso sumergido (grs).
1	689
2	682
3	685

- Volumen de la briqueta.

$$\text{Vol. Briqueta} = \text{Peso saturado sup. seco} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Vol. Briqueta} = 1205.2 \text{ gr.} - 689 \text{ gr.}$$

$$\text{Vol. Briqueta} = 516.2 \text{ gr.}$$

- Densidad real de la briqueta.

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen de la briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1201.2 \text{ gr.}}{516.2 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 2.32700 \text{ gr/cm}^3$$

- Densidad máxima teórica de la briqueta.

$$\text{Densidad max teo.} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{Peso específico del asf.}}\right) + \left(\frac{100-\% \text{ de asfalto}}{\text{Peso específico total}}\right)}$$

$$\text{Densidad max teo.} = \frac{100}{\left(\frac{4.5 \%}{1.006 \text{ gr/cm}^3}\right) + \left(\frac{100-4.5 \%}{2.66 \text{ gr/cm}^3}\right)}$$

$$\text{Densidad max teo.} = 2.4767 \text{ gr/cm}^3$$

- Porcentaje de vacíos de la mezcla (VM).

$$\text{VM} = \left(\frac{\text{Densidad max. teo.} - \text{Densidad briqueta prom.}}{\text{Densidad max. teo.}}\right) * 100$$

$$\text{VM} = \left(\frac{2.48 \text{ gr/cm}^3 - 2.33 \text{ gr/cm}^3}{2.48 \text{ gr/cm}^3}\right) * 100$$

$$\text{VM} = 6.1 \%$$

- Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM).

$$\text{VAM} = \left(\frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad briqueta prom.}}{\text{Peso específico del asfalto}}\right) + \% \text{ de vacíos (VM)}$$

$$\text{VAM} = \left(\frac{4.5 \% * 2.33 \text{ gr/cm}^3}{1.006 \text{ gr/cm}^3}\right) + 6.1 \%$$

$$\text{VAM} = 16.52 \%$$

- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV).

$$\text{RBV} = \left(\frac{\text{VAM} - \text{VM}}{\text{VAM}}\right) * 100$$

$$\text{RBV} = \left(\frac{16.52 \% - 6.1 \%}{16.52 \%}\right) * 100$$

$$\text{RBV} = 63.0745 \%$$

Tabla 3.5- 3: Parámetros realizados a las briquetas.

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	Probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1	6.50	4.50	4.71	1201.2	1205.2	689	516.2	2.33	2.33	2.48	6.11	16.52	63.04
2	6.43			1192.8	1194.1	682	512.1	2.33					
3	6.46			1198.4	1199.5	685	514.5	2.33					
4	6.38	5.00	5.26	1187.4	1191.3	682	509.3	2.33	2.35	2.48	5.14	16.83	69.48
5	6.55			1194.3	1191.4	686	505.4	2.36					
6	6.50			1191.5	1188.2	684	504.2	2.36					
7	6.27	5.50	5.82	1185.9	1187.5	686	501.5	2.36	2.37	2.48	4.47	17.43	74.33
8	6.34			1198.1	1198.7	692	506.7	2.36					
9	6.35			1199.2	1192.3	688	504.3	2.38					
10	6.39	6.00	6.38	1197.4	1198.5	691	507.5	2.36	2.36	2.46	3.95	18.04	78.11
11	6.28			1191.3	1185.3	684	501.3	2.38					
12	6.32			1190.7	1193.1	687	506.1	2.35					
13	6.39	6.50	6.95	1195.8	1196.6	689	507.6	2.36	2.36	2.45	3.83	19.05	79.92
14	6.40			1197.3	1197.9	691	506.9	2.36					
15	6.33			1191.4	1193.8	687	506.8	2.35					
16	6.31	7.00	7.53	1190.3	1191.0	679	512.0	2.32	2.33	2.42	3.57	19.81	81.97
17	6.49			1193.2	1194.6	685	509.6	2.34					
18	6.38			1191.7	1192.5	682	510.5	2.33					

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4. Rotura de briquetas en la Marquina Marshall.

Para realizar la rotura previamente se puso las briquetas en agua a 60°C por unos 30 minutos, seguidamente se colocó las briquetas en la prensa Marshall donde se registraron la estabilidad y fluencia de cada una.

N° de probeta	Lectura del dial (mm)	Lectura dial del flujo
1	860	150
2	845	170
3	769	140

Las lecturas para la estabilidad son convertidas en unidades de libras fuerza donde además son afectadas con un factor de corrección de acuerdo a la altura de cada probeta ensayada y la carga de dicha prensa.

Las lecturas de fluencia de igual manera son convertidas en unidades de pulg.

Teniendo así los valores reales tanto de la estabilidad y fluencia de cada grupo de briquetas con distintos porcentajes de asfalto.

Tabla 3.5- 4: Estabilidad y fluencia.

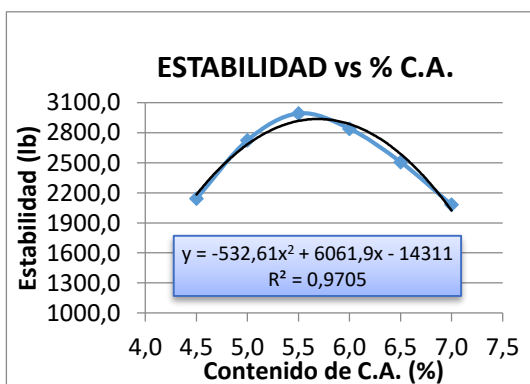
N° de probeta	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
	mm	libras	-	Libras	libras	-	-	0,01 pulg
1	860.00	2297.59	0.96	2211.43	2139.86	150.00	0.06	6.04
2	845.00	2257.19	0.98	2212.05		170.00	0.07	
3	769.00	2052.54	0.97	1996.10		140.00	0.06	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. Determinación del contenido óptimo de asfalto.

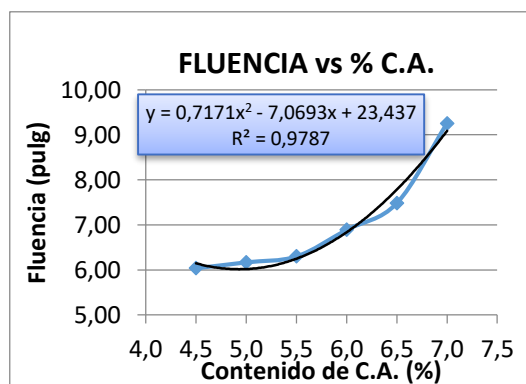
Con los datos previamente calculados se generan las gráficas de curvas según la metodología Marshall, que son:

Gráfica 3.5.5- 1: Estabilidad vs % C.A.



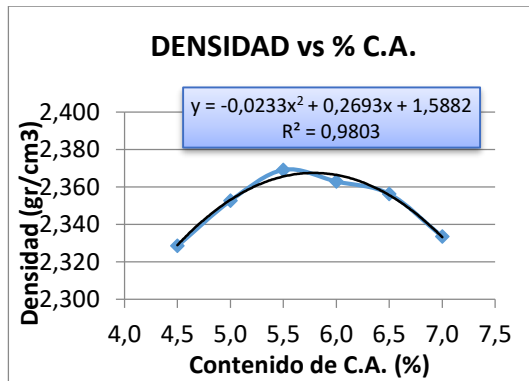
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5.5- 2: Fluencia vs % C.A.



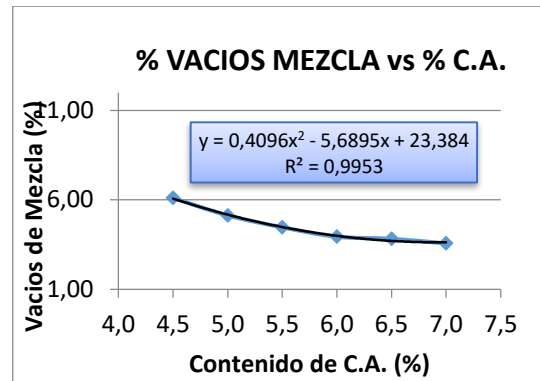
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5.5- 3: Densidad vs % C.A.



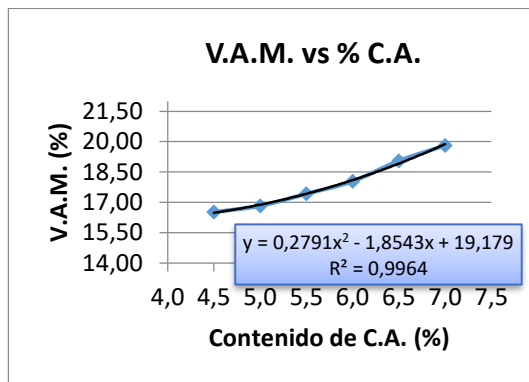
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5.5- 4: % Vacíos vs % C.A.



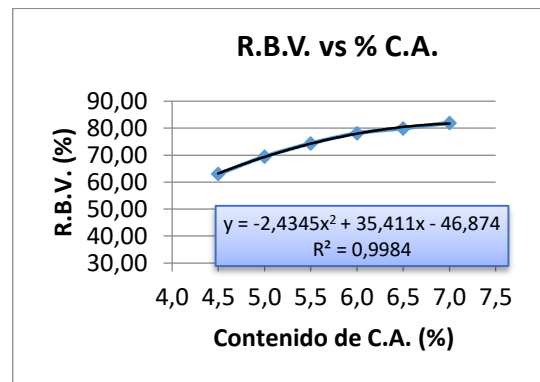
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5.5- 5: V.A.M. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5.5- 6: R.B.V. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia.

3.6. Diseño de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de Zeolita.

Tomando en cuenta el porcentaje óptimo de asfalto, se decidió crear mezclas asfálticas con un porcentaje de Zeolita del 0.3% del total de la mezcla, como referencia de la tecnología Aspha Min, se fueron incrementando los porcentajes de Zeolita paulatinamente de 1% hasta 5% para las temperaturas de preparación de 130°C y 100°C.

3.6.1. Mezclas asfálticas con zeolita a 130°C.

Tabla 3.6.1- 1: Cantidades de material con el % óptimo de asfalto T=130°C.

Porcentaje de cem. Asf (%).	5.82
Porcentaje de Agregado (%)	94.18
Peso del Cemento Asf. (gr)	69.84
Peso de Grava (gr)	282.54
Peso de Gravilla (gr)	339.05
Peso de Arena (gr)	508.57
Peso total briqueta (gr)	1200

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que en la preparación de las mezclas asfálticas convencionales se hizo grupos de 3 briquetas con distintos porcentajes de zeolita como aditivo.

Se identificaron las briquetas en grupos de 3, se tomó la altura promedio de las briquetas midiendo en 4 puntos diferentes, se realizaron los pesos correspondientes, peso seco, peso saturado superficialmente seco y peso sumergido.

Tabla 3.6.1- 2: Parámetros realizados a las briquetas con zeolita a 130°C.

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
		base Mezcla	zeolita adicional	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	Probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%
1	6.84	5.82	0.299	1199.6	1208.9	659	549.9	2.18	2.18	2.59	15.79	28.40	44.41
2	7.02			1200.2	1212.3	663	549.3	2.18					
3	6.78			1199.1	1206.5	655	551.5	2.17					
4	6.73	5.82	0.990	1199.3	1211.6	678	533.6	2.25	2.22	2.59	14.42	27.24	47.06
5	7.10			1204.7	1220.4	663	557.4	2.16					
6	6.82			1201.2	1212.7	676	536.7	2.24					
7	6.73	5.82	1.961	1215.3	1222.5	682	540.5	2.25	2.25	2.59	13.11	26.12	49.82
8	6.80			1217.7	1225.3	685	540.3	2.25					
9	6.75			1216.1	1224.3	683	541.3	2.25					
10	6.92	5.82	2.913	1236.6	1245.2	696	549.2	2.25	2.27	2.59	12.23	25.37	51.82
11	6.71			1235.4	1237.9	702	535.9	2.31					
12	6.81			1235.5	1238.6	692	546.6	2.26					
13	6.84	5.82	3.846	1240.9	1248.2	691	557.2	2.23	2.28	2.59	12.08	25.25	52.16
14	6.43			1160.6	1164.5	656	508.5	2.28					
15	6.59			1195.4	1201.3	686	515.3	2.32					
16	7.06	5.82	4.762	1255.3	1259.4	697	562.4	2.23	2.25	2.59	12.96	26.00	50.15
17	6.94			1255.0	1259.8	709	550.8	2.28					
18	7.01			1255.1	1258.9	701	557.9	2.25					

Fuente: Elaboración propia.

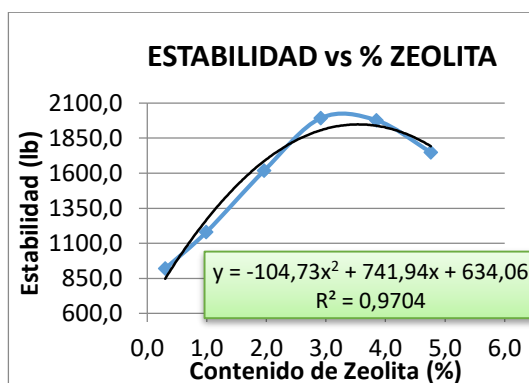
Tabla 3.6.1- 3: Estabilidad y Fluencia en briquetas con zeolita T= 130°C.

Estabilidad Marshall					Fluencia		
lectura del dial	Carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
mm	Libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg
431	1142.40	0.888	1014.54	919.1	160	0.063	6.43
370	978.11	0.854	835.70		170	0.067	
380	1005.00	0.903	907.05		160	0.063	
556	1479.00	0.915	1353.26	1179	180	0.071	6.96
470	1247.40	0.839	1047.06		170	0.067	
480	1274.30	0.893	1137.33		180	0.071	
694	1850.60	0.915	1693.28	1618	200	0.079	7.74
668	1780.60	0.898	1598.06		200	0.079	
644	1715.90	0.910	1561.51		190	0.075	
770	2055.20	0.873	1794.63	1993	210	0.083	8.14
895	2391.80	0.920	2200.49		200	0.079	
830	2216.80	0.895	1984.04		210	0.083	
721	1923.30	0.888	1708.07	1978	200	0.079	8.01
862	2303.00	0.980	2256.91		200	0.079	
780	2082.20	0.945	1967.64		210	0.083	
643	1713.20	0.847	1450.95	1749	180	0.071	7.48
941	2515.70	0.869	2187.15		200	0.079	
705	1880.20	0.856	1610.02		190	0.075	

Fuente: Elaboración propia.

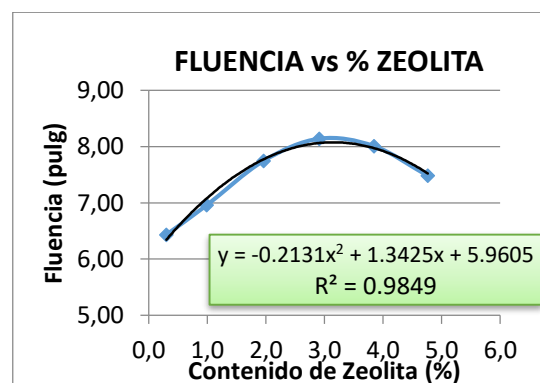
3.6.2. Determinación del porcentaje de zeolita para mezclas a 130°C.

Gráfica 3.6.2- 1: Estabilidad vs %Zeolita T=130°C.



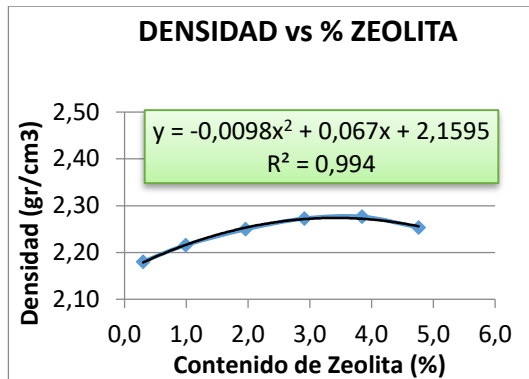
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.2- 2: Fluencia vs %Zeolita T=130°C.



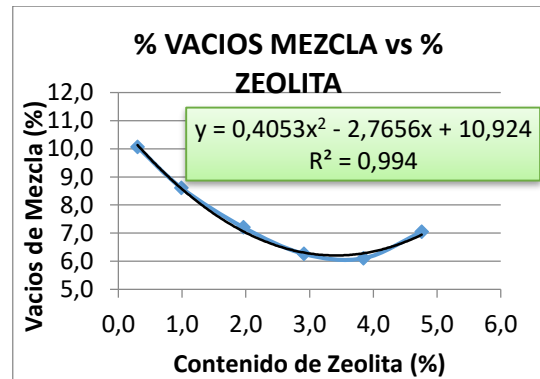
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.2- 3: Densidad vs %Zeolita T=130°C.



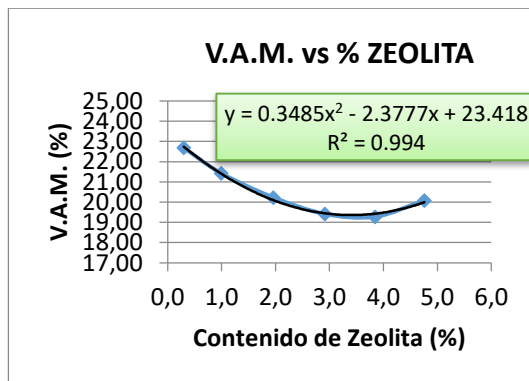
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.2- 4: %Vacíos Mezcla vs %Zeolita T=130°C.



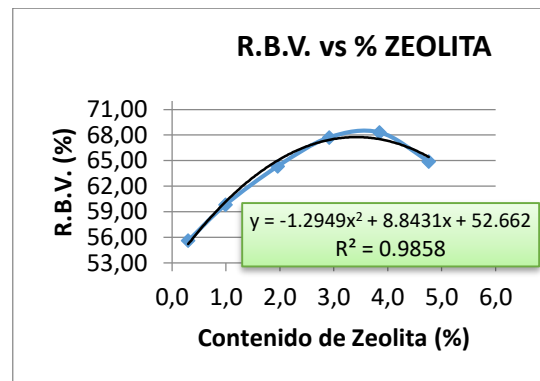
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.2- 5: V.A.M. vs % Zeolita T=130°C.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.2- 6: R.B.V. vs % Zeolita T=130°C.



Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Mezclas asfálticas con zeolita a 100°C.

Tabla 3.6.3- 1: Cantidades de material con el % óptimo de asfalto T=100°C.

Porcentaje de cem. Asf. (%)	5.82
Porcentaje de Agregado (%)	94.18
Peso del Cemento Asf. (gr)	69.84
Peso de Grava (gr)	282.54
Peso de Gravilla (gr)	339.05
Peso de Arena (gr)	508.57
Peso total briqueta (gr)	1200

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6.3- 2: Parámetros realizados a las briquetas con zeolita a 100°C.

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
		base Mezcla	zeolita adicional	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
		%	%	grs.	grs.	grs.		cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%
1	6.79	5.82	0.299	1199.9	1203.9	659	544.9	2.20	2.22	2.59	14.31	27.15	47.27
2	6.83			1200.1	1205.6	663	542.6	2.21					
3	6.85			1199.8	1206.3	671	535.3	2.24					
4	7.01	5.82	0.990	1202.4	1214.2	670	544.7	2.21	2.23	2.59	13.73	26.65	48.48
5	6.83			1204.7	1211.1	678	533.1	2.26					
6	6.90			1202.9	1213.7	675	538.7	2.23					
7	6.83	5.82	1.961	1223.0	1228.6	687	541.6	2.26	2.26	2.59	12.53	25.64	51.10
8	6.78			1199.6	1205.9	672	533.9	2.25					
9	6.81			1203.8	1209.0	683	526.0	2.29					
10	7.05	5.82	2.913	1235.4	1242.5	695	547.5	2.26	2.29	2.59	11.57	24.82	53.36
11	6.69			1221.3	1224.5	698	526.5	2.32					
12	6.86			1228.2	1234.9	699	535.9	2.29					
13	6.79	5.82	3.846	1238.6	1243.6	705	538.6	2.30	2.29	2.59	11.46	24.72	53.64
14	6.81			1239.7	1242.7	701	541.7	2.29					
15	6.78			1237.9	1241.9	701	540.9	2.29					
16	6.96	5.82	4.762	1255.1	1257.5	710	548.0	2.29	2.29	2.59	11.51	24.77	53.51
17	6.94			1252.1	1255.1	709	546.1	2.29					
18	6.90			1250.7	1254.2	708	546.2	2.29					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6.3- 3: Estabilidad y Fluencia en briquetas con zeolita T= 100°C.

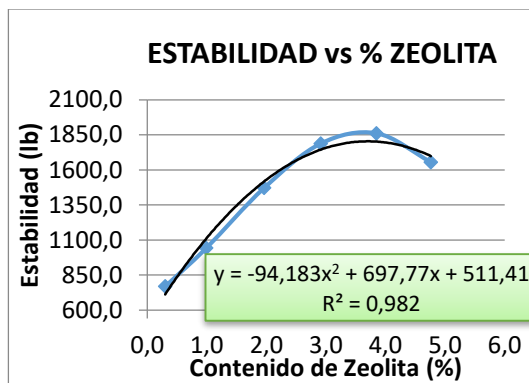
Estabilidad Marshall					Fluencia		
lectura del dial	Carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
mm	libras	-	Libras	libras	-	-	0,01 pulg
276	724.99	0.900	652.49	768.7	190	0.075	7.09
345	910.79	0.890	810.61		170	0.067	
360	951.19	0.886	843.04		180	0.071	
376	994.27	0.856	851.40	1042	190	0.075	7.35
494	1312.00	0.890	1167.70		190	0.075	
476	1263.60	0.877	1108.01		180	0.071	
623	1659.40	0.890	1476.86	1471	190	0.0748	7.74
639	1702.50	0.903	1536.49		220	0.0866	
587	1562.50	0.895	1398.39		180	0.0709	
744	1985.20	0.849	1685.06	1787	200	0.0787	8.27
772	2060.60	0.925	1906.07		210	0.0827	
750	2001.40	0.884	1770.02		220	0.0866	
795	2122.60	0.900	1910.30	1860	230	0.0906	8.53
720	1920.6	0.895	1718.93		210	0.0827	
810	2162.9	0.903	1952.06		210	0.0827	

694	1850.6	0.866	1602.05	1655	220	0.0866	8.66
724	1931.4	0.869	1679.13		230	0.0906	
720	1920.6	0.877	1684.17		210	0.0827	

Fuente: Elaboración propia.

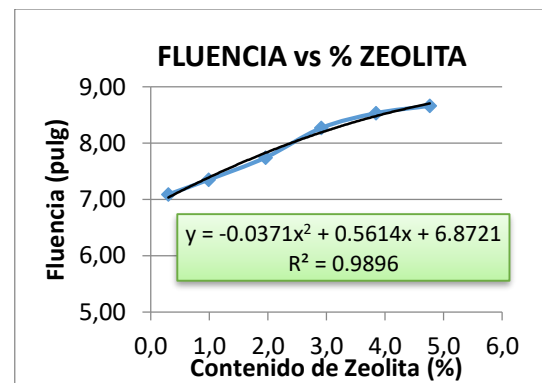
3.6.4. Determinación del porcentaje de zeolita para mezclas a 100°C.

Gráfica 3.6.4- 1: Estabilidad vs %Zeolita T=100°C.



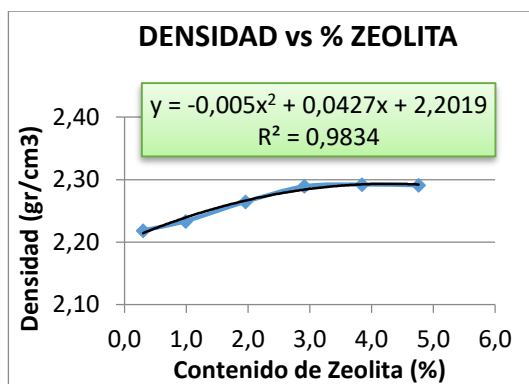
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.4- 2: Fluencia vs %Zeolita T=100°C.



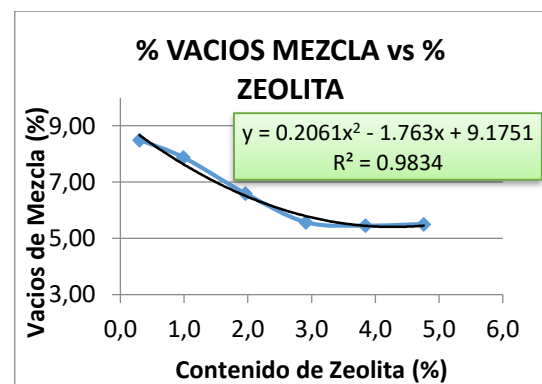
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.4- 3: Densidad vs %Zeolita T=100°C.



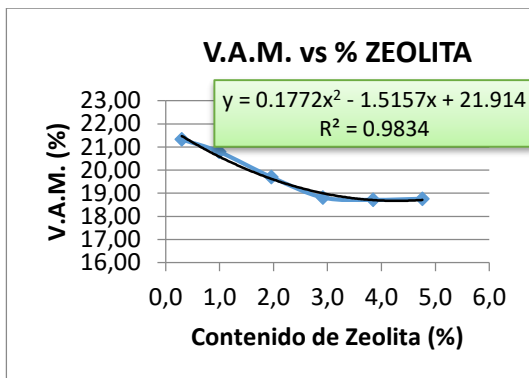
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.4- 4: %Vacíos Mezcla vs %Zeolita T=100°C.



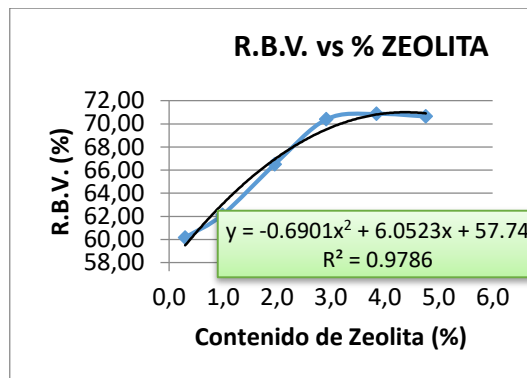
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.4- 5: V.A.M. vs % Zeolita T=100°C.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6.4- 6: R.B.V. vs %Zeolita T=100°C.



Fuente: Elaboración propia.

3.7. Análisis de Resultados.

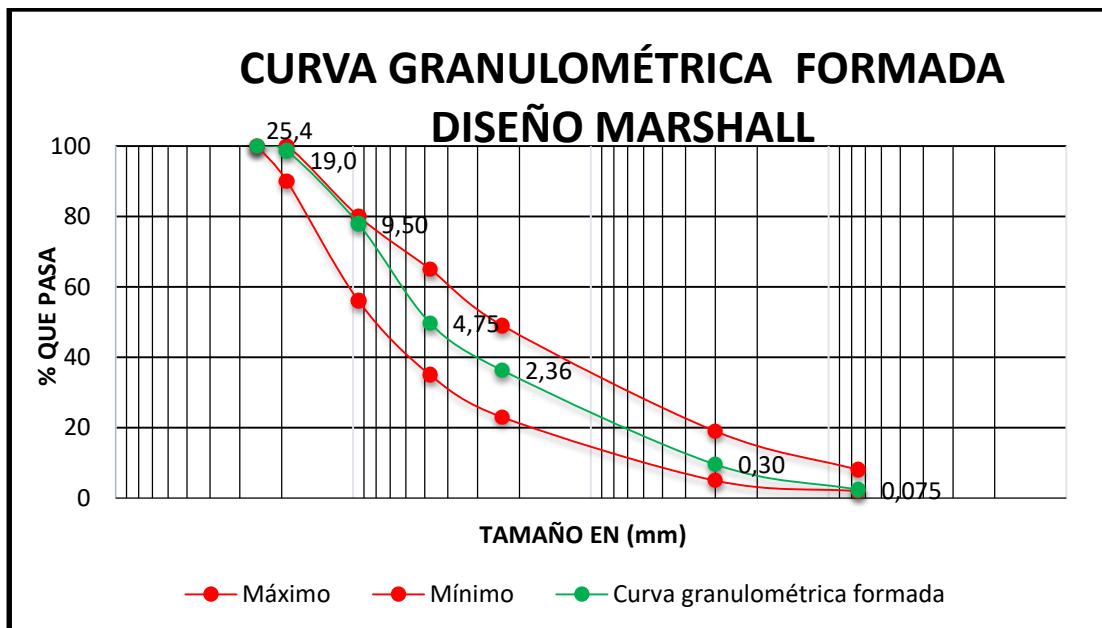
3.7.1. Caracterización de los agregados.

Tabla 3.7.1- 1: Límites para un TMN 3/4".

Abertura de la malla	Tamaño máx nominal
	3/4 in (19.0 mm)
1 in (25.0 mm)	100
3/4 in (19.0 mm)	90 – 100
1/2 in (12.5 mm)	...
3/8 in (9.5 mm)	56 – 80
No. 4 (4.75 mm)	35 – 65
No. 8 (2.36 mm)	23 – 49
No. 16 (1.18 mm)	...
No. 30 (600 μm)	...
No. 50 (300 μm)	5 – 19
No. 100 (150 μm)	...
No. 200 (75 μm)	2 – 8

Fuente: “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas” P. Garnica – H. Delgado.

Gráfica 3.7.1- 1: Granulometría Diseño Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

La granulometría formada por un 25% de grava, 30% de gravilla y 45% de arena cumple con las especificaciones emitidas por la ASTM para un tamaño máximo nominal de 3/4".

Tabla 3.7.1- 2: Tabla resumen de los agregados.

Ensayo	Agregados			Especificaciones		Designación AASHTO
	Unidad	Resultados	Promedio	mín	Máx	
Peso específico del agregado grueso	gr/cm ³	2.636	2.64	-	-	T-85
		2.600				
		2.697				
Peso específico del agregado fino (arena)	gr/cm ³	2.633	2.66	-	-	T-84
		2.546				
		2.789				
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	22.91	22.91		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	22.82	22.82		40	T-96
Equivalente de arena	%	83.74	82.65	50		T-176
		85.59				
		78.63				

Fuente: Elaboración propia.

El agregado pétreo y la arena proporcionado por la chancadora y planta de asfaltos CHARAJA cumplen con las especificaciones de los ensayos realizados según AASHTO, donde uno de los parámetros más importantes como ser el desgaste de los ángeles se obtiene un valor promedio tanto para la grava y gravilla de 23%, para poder utilizarlas en el diseño de mezclas asfálticas.

3.7.2. Caracterización del cemento asfáltico BETUPEN PLUS (85-100).

Tabla 3.7.2- 1: Tabla resumen Cemento asfáltico.

Ensayo	Uni	Ens 1	Ens 2	Ens 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	32.9	34.0	33.8			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	77.83	80.8	80.8			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	60.02	63.5	62.1			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	78.35	80.8	81.0			
Peso Específico	grs./cm ³	1.017	0.996	1.005	1.006	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>265	>283	>269	>272	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	99	106.6	101	102	>100	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	82	91	93			
	Lectura N°2	87	93	92			
	Lectura N°3	88	89	92			
	Promedio	mm.	86	91	92	89.7	85	100
Punto de ablandamiento	°C	43.0	46.0	43.0	44	42	53

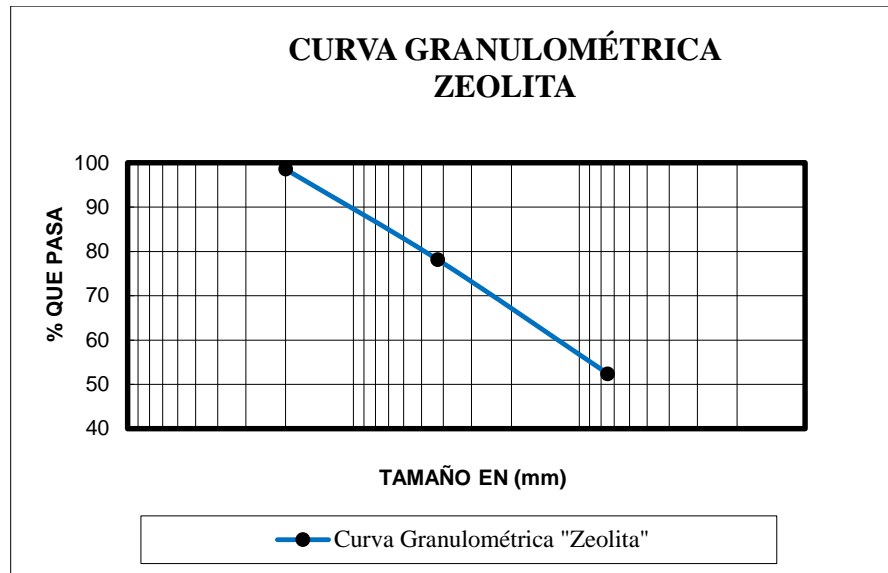
Fuente: Elaboración propia.

El cemento asfáltico BETUPEN PLUS (85-100) de origen brasilero, fue clasificado por grado de penetración obteniendo un promedio de 89.7 mm, corroborando que es un cemento asfáltico (85-100), dando así cumplimiento al resto de la caracterización,

según especificaciones de la Norma AASHTO, pudiendo ser utilizado en el diseño de una mezcla asfáltica.

3.7.3. Caracterización de la Zeolita.

Gráfica 3.7.3- 1: Curva granulométrica Zeolita.



Fuente: Elaboración propia.

Peso específico.

Numero de ensayo	1	2	3	4	Promedio
Temperatura ensayada (T °C)	29.00	24	23	20	24
Peso del suelo seco W _s (gr)	192.20	192.20	192.20	192.20	192.20
Peso del frasco + agua W _{fw} (gr)	677.37	677.37	677.37	677.37	677.28
Peso del frasco + agua + suelo W _{fsw} (gr)	713.40	713.60	713.70	713.80	713.63
Peso específico del suelo ρ _s (gr/cm ³)	1.231	1.232	1.233	1.234	1.23
Factor de corrección K	0.9977	0.9973	1.0002	1.0009	0.9990
Gravedad específica	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23

Los ensayos realizados a la zeolita, nos muestran que por su granulometría es un mineral fino debido que un 52,40% pasa el tamiz Nro. 200 y tiene un peso específico bajo de 1,23 gr/cm³.

3.7.4. Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de asfalto.

Tabla 3.7.4- 1: Tabla Resumen Diseño Marshall.

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4.5	2.329	2139.86	6.04	6.11	63.04	16.52
5.0	2.353	2723.27	6.17	5.14	69.48	16.83
5.5	2.369	2991.30	6.30	4.47	74.33	17.43
6.0	2.363	2839.10	6.89	3.95	78.11	18.04
6.5	2.356	2506.87	7.48	3.83	79.92	19.05
7.0	2.334	2079.18	9.25	3.57	81.97	19.81

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7.4- 2: Porcentaje óptimo del cemento asfáltico.

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	2937.367	5.70
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.366	5.78
	Vacíos de la mezcla (%)	4.000	5.99
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5.82

Fuente: Elaboración propia.

De la mezcla asfáltica convencional se pudo determinar un porcentaje óptimo de cemento asfáltico igual a 5.82%, valor con el cual se da cumplimiento con los parámetros según la metodología de diseño Marshall.

3.7.5. Mezcla asfáltica con Zeolita a 130°C.

Tabla 3.7.5- 1: Resumen Diseño Marshall con Zeolita T=130°C.

Contenido de zeolita adicional	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.299	2.180	919.10	6.43	10.07	55.61	22.68
0.990	2.216	1179.22	6.96	8.61	59.82	21.43
1.961	2.250	1617.62	7.74	7.21	64.35	20.22
2.913	2.272	1993.05	8.14	6.27	67.72	19.41
3.846	2.276	1977.54	8.01	6.11	68.31	19.28
4.762	2.253	1749.37	7.48	7.05	64.91	20.08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7.5- 2: Porcentaje de Zeolita T=130°C.

	Ensayo	Valor de Diseño	% de Zeolita
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE ZEOLITA	Estabilidad Marshall (Lb)	1948.093	3.54
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.274	3.45
	Vacíos de la mezcla (%)	6.206	3.42
	% óptimo de Zeolita	Promedio =	3.47

Fuente: Elaboración propia.

Con el porcentaje óptimo de asfalto se pudo evidenciar que agregando un 3,47% de zeolita a una temperatura de 130°C, la mezcla asfáltica cumple con los parámetros de la metodología de diseño Marshall, obteniendo como característica principal una estabilidad mayor a la mínima aceptable de 1.800 lbf.

3.7.6. Mezcla asfáltica con Zeolita a 100°C.

Tabla 3.7.6- 1: Resumen Diseño Marshall con Zeolita T=100°C.

Contenido de zeolita adicional	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0.299	2.218	768.71	7.09	8.50	60.17	21.33
0.990	2.233	1042.37	7.35	7.88	62.13	20.80
1.961	2.264	1470.58	7.74	6.60	66.51	19.70
2.913	2.289	1787.05	8.27	5.57	70.40	18.81
3.846	2.292	1860.43	8.53	5.45	70.87	18.71
4.762	2.291	1655.12	8.66	5.50	70.65	18.76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7.6- 2: Porcentaje Zeolita T=100°C.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE ZEOLITA	Ensayo	Valor de Diseño	% de Zeolita
	Estabilidad Marshall (Lb)	1803.794	3.70
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.293	4.27
	Vacíos de la mezcla (%)	5.405	4.33
	% óptimo de Zeolita	Promedio =	4.10

Fuente: Elaboración propia.

Con el porcentaje óptimo de asfalto se pudo evidenciar que agregando un 4,10% de zeolita a una temperatura de 100°C, la mezcla asfáltica cumple con los parámetros de la metodología de diseño Marshall, tomando en cuenta que la estabilidad apenas cumple con la mínima aceptable de 1.800 lbf,

3.7.7. Análisis de costos de la mezcla asfáltica con y sin Zeolita.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE UNA CARPETA ASFÁLTICA CONVENCIONAL (SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE)

Cantidad: -
Unidad: m3
Moneda: Bolivianos

1.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0.1540	8,352.00	1,286.21
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m3	0.4800	162.00	77.76
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m3	0.3500	162.00	56.70
ARENA CLASIFICADA	m3	0.4900	173.00	84.77
DIESEL	lt	18.0000	3.72	66.96
TOTAL MATERIALES				1,572.40

2.- MANO DE OBRA

CHOFER	hr	0.0012	15.14	0.02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0.8201	23.28	19.09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0.0820	18.30	1.50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0.0900	23.28	2.10
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0.0280	15.14	0.42
CAPATAZ	hr	1.8000	22.60	40.68
PEÓN	hr	0.0720	11.98	0.86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64.67
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			55,00 %	35.57
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	14.98
TOTAL MANO DE OBRA				115.22

3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS

CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS \geq 950	hr	0.0001	422.27	0.04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2 /hr	hr	0.0350	301.36	10.55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m3	hr	0.0280	458.75	12.85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m2/hr	hr	0.0280	67.93	1.90
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0.0900	962.34	86.61
RODILLO NEUMÁTICO TSP \geq 1000	hr	0.0840	332.33	27.92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0.0750	683.06	51.23
VOLQUETA \geq 8 m3	hr	0.0300	223.06	6.69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	5.76
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				203.55

4.- GASTOS GENERALES

GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	340.41
TOTAL GASTOS GENERALES				340.41

5.- UTILIDAD

UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)			10,00 %	223.16
TOTAL UTILIDAD				223.16

6.- IMPUESTOS

IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	75.85
TOTAL IMPUESTOS				75.85
TOTAL PRECIO UNITARIO				2,530.58

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE UNA CARPETA ASFÁLTICA CON ZEOLITA A 130°C
(SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE)**

Cantidad: -
Unidad: m³
Moneda: Bolivianos

1.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0.1487	8,352.00	1,241.58
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m ³	0.4633	162.00	75.06
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m ³	0.3379	162.00	54.73
ARENA CLASIFICADA	m ³	0.4730	173.00	81.83
DIESEL	lt	14.6250	3.72	54.41
ZEOLITA NATURAL	kg	78.9078	6.00	473.45
TOTAL MATERIALES				1,981.05

2.- MANO DE OBRA

CHOFER	hr	0.0012	15.14	0.02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0.8201	23.28	19.09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0.0820	18.30	1.50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0.0900	23.28	2.10
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0.0280	15.14	0.42
CAPATAZ	hr	1.8000	22.60	40.68
PEÓN	hr	0.0720	11.98	0.86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64.67
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			55,00 %	35.57
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	14.98
TOTAL MANO DE OBRA				115.22

3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS

CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS ≥ 950	hr	0.0001	422.27	0.04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m ² /hr	hr	0.0350	301.36	10.55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m ³	hr	0.0280	458.75	12.85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m ² /hr	hr	0.0280	67.93	1.90
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0.0900	962.34	86.61
RODILLO NEUMÁTICO TSP ≥ 1000	hr	0.0840	332.33	27.92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0.0750	683.06	51.23
VOLQUETA ≥ 8 m ³	hr	0.0300	223.06	6.69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	5.76
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				203.55

4.- GASTOS GENERALES

GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	413.97
TOTAL GASTOS GENERALES				413.97

5.- UTILIDAD

UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)			10,00 %	271.38
TOTAL UTILIDAD				271.38

6.- IMPUESTOS

IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	92.24
TOTAL IMPUESTOS				92.24
TOTAL PRECIO UNITARIO				3,077.40

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE UNA CARPETA ASFÁLTICA CON ZEOLITA A 100°C
(SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE)**

Cantidad: -
Unidad: m3
Moneda: Bolivianos

1.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0.1477	8,352.00	1,233.47
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m3	0.4603	162.00	74.57
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m3	0.3357	162.00	54.38
ARENA CLASIFICADA	m3	0.4699	173.00	81.29
DIESEL	lt	11.2500	3.72	41.85
ZEOLITA NATURAL	kg	94.0130	6.00	564.08
TOTAL MATERIALES				2,049.64

2.- MANO DE OBRA

CHOFER	hr	0.0012	15.14	0.02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0.8201	23.28	19.09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0.0820	18.30	1.50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0.0900	23.28	2.10
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0.0280	15.14	0.42
CAPATAZ	hr	1.8000	22.60	40.68
PEÓN	hr	0.0720	11.98	0.86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64.67
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			55,00 %	35.57
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	14.98
TOTAL MANO DE OBRA				115.22

3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS

CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS \geq 950	hr	0.0001	422.27	0.04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2 /hr	hr	0.0350	301.36	10.55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m3	hr	0.0280	458.75	12.85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m2/hr	hr	0.0280	67.93	1.90
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0.0900	962.34	86.61
RODILLO NEUMÁTICO TSP \geq 1000	hr	0.0840	332.33	27.92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0.0750	683.06	51.23
VOLQUETA \geq 8 m3	hr	0.0300	223.06	6.69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	5.76
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				203.55

4.- GASTOS GENERALES

GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	426.31
TOTAL GASTOS GENERALES				426.31

5.- UTILIDAD

UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)			10,00 %	279.47
TOTAL UTILIDAD				279.47

6.- IMPUESTOS

IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	94.99
TOTAL IMPUESTOS				94.99
TOTAL PRECIO UNITARIO				3,169.18

En el análisis de precios de unitarios tenemos un costo de 2530,58 Bs. para un metro cubico de mezcla asfáltica convencional, 3077,40 Bs. para un metro cubico de mezcla asfáltica con zeolita natural a 130°C y 3169,18 Bs. para un metro cubico de mezcla asfáltica con zeolita natural a 100°C.

**CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

- Mediante la incorporación de zeolita natural a la elaboración de mezclas asfálticas convencionales, se consiguió producir mezclas asfálticas a temperaturas menores (130°C y 100°C), cumpliendo con las especificaciones requeridas para definir una mezcla asfáltica como aceptable.
- En la caracterización del agregado pétreo y del cemento asfáltico se verifica que cumplen con las especificaciones de los ensayos desarrollados en los manuales de la Administradora Boliviana de Carreteras, para poder ser utilizadas en la elaboración de mezclas asfálticas.
- Los ensayos realizados a la zeolita, nos muestran que por su granulometría es un mineral fino con un peso específico bajo (1,23 gr/cm³).
- Para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales, se determinó que el porcentaje de asfalto óptimo para dichas mezclas es de 5,82%.
- Se elaboraron mezclas asfálticas según la metodología de diseño Marshall a temperaturas de 130°C y 100°C, incorporando zeolita natural partiendo de la tecnología Aspha Min que utiliza un 0,3% del peso total de la mezcla.
- Con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico se fabricaron mezclas adicionando distintos porcentajes de Zeolita natural, donde se pudo evidenciar que tanto con 3,47% de zeolita a una temperatura de 130°C, como con 4,10% de Zeolita a una temperatura de 100°C, las mezclas llegan a cumplir con los parámetros de la metodología de diseño Marshall.
- En la preparación de la mezcla asfáltica convencional a 160°C se observó que, durante el mezclado hay un índice muy elevado de contaminación (vapor blanco), que se fueron mitigando progresivamente a medida que se disminuyó la temperatura de mezclado tanto a 130°C y 100°C.
- Del análisis de precios unitarios de las mezclas asfálticas con Zeolita se evidenció que para la mezcla a 130°C el costo se incrementó en un 17,25% y

en la mezcla a 100°C el costo se incrementó en un 25,24%, ambos con respecto al costo de la mezcla asfáltica convencional.

4.2. Recomendaciones.

- Es importante realizar los ensayos mínimos de caracterización, de los agregados como del cemento asfáltico, para determinar si el material es apto para ser utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas.
- Tener en cuenta las normas de seguridad que rigen en los laboratorios, especialmente cuando se manipula asfalto caliente debido a la exposición de gases tóxicos, provocadas por las altas temperaturas.
- Una vez fabricadas las briquetas, tomar los datos como la altura promedio y los pesos (seco, saturado superficialmente seco y sumergido), con un alto grado de precisión, debido a que son parámetros que influyen en los cálculos de la densidad y el porcentaje de vacíos.
- En la incorporación de la zeolita natural a la mezcla asfáltica, previamente debe ser saturada con agua hasta lograr una pasta viscosa, con el propósito de que libere más agua que cuando se incorpora la zeolita seca.
- Controlar que la temperatura de estudio se mantenga constante por la facilidad que tiene la mezcla de calentarse o enfriarse al momento del mezclado.
- Debido a la contaminación ambiental que provocan las mezclas asfálticas convencionales, se aconseja usar alternativas como ser la incorporación de Zeolita que ayuda a elaborar mezclas a menores temperaturas disminuyendo el impacto ambiental.