

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

Introducción

El presente trabajo titulado “DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON LA ADICION DE POLVO DE NEUMATICO RECICLADO” será realizado con el fin de determinar, con base en ensayos de laboratorio, si el uso de polvo de neumáticos reciclados dentro de las mezclas asfálticas en caliente cumple con las normas técnicas para el uso en calles destinadas a tránsito vehicular.

El polvo de neumático reciclado, es un material que se obtiene de plantas recicladoras de caucho en desuso, lo que dependiendo del tamaño de la planta recicladora lo convierte en un material viable de aplicar en la construcción de nuestros caminos o calles, porque este material se puede obtener en grandes cantidades.

INGOQUI, es una empresa boliviana, que se encuentra en la ciudad de Cochabamba-Bolivia dedicada a la reutilización de caucho proveniente de los neumáticos desechados, esta empresa recicla un aproximado de 150 neumáticos al día, su principal producción es de trapeadores hechos con este material, esta empresa está facilitando el “polvo de caucho reciclado” que será utilizado en este proyecto de investigación.

La fabricación de neumáticos requiere de elastómeros o cauchos que constituyen el 60% de la producción anual de la industria del caucho. La manufactura de los neumáticos requiere de procesos químicos y físicos, por lo que es necesario usar técnicas de reciclado o reutilización de los materiales que conforman a los neumáticos. Actualmente, ciertas industrias recicladoras han optado por la reutilización del caucho vulcanizado triturado como aglutinante en la construcción de carreteras.

El impacto ambiental negativo que genera un manejo inadecuado de los neumáticos fuera de uso (NFU), puede provocar la contaminación de cuerpos de agua, vertederos y la vida útil de los rellenos sanitarios disminuye.

Debido a los antecedentes expuestos anteriormente surge el reto para los nuevos proyectos viales, de iniciar procesos amigables con el medio ambiente.

Se pretende dar un aporte de investigación a la universidad, haciendo un estudio de probetas asfálticas en caliente con una adición de polvo de neumático triturado.

En el presente proyecto de grado se plantea realizar un estudio que permite determinar la resistencia, aplicabilidad y eficiencia del polvo de caucho triturado de neumáticos para proyectos de pavimentación vial que garanticen solucionar la disminución de volúmenes de residuos inertes e incrementar el uso de material reciclado en pavimentos asfálticos.

1.1 Antecedentes

En los últimos años el mundo está cada vez más contaminado y con un deterioro creciente en el medio ambiente, la preservación de los recursos naturales se ha convertido en una preocupación general de todos los sectores productivos del mundo. Las mezclas asfálticas con la adición de residuo de caucho fueron y siguen siendo investigadas en su aplicación.

Algunos estudios iniciales en la década de los cincuenta luego de la Segunda Guerra Mundial, realizaron la construcción de tramos experimentales incorporando caucho triturado con el objeto de aprovechar su flexibilidad y lograr una superficie del pavimento eficiente y duradera, obteniendo resultados que proporcionaban pequeños o nulos beneficios en un pavimento asfáltico modificado con un menor costo y una vida de servicio más larga.

En los años 60 ingenieros suecos emplearon este tipo de mezclas para mejorar las condiciones de vialidad invernal corta que la de un convencional.

Y en la actualidad se realiza un estudio contratado por El Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, con la Universidad de Los Andes como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas que se colocan en la ciudad de Bogotá.

1.2 Justificación

El presente trabajo titulado “DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON LA ADICION DE POLVO DE NEUMATICO RECICLADO” será realizado con el fin de determinar, con base en ensayos de laboratorio, si el producto del reemplazo de agregados finos por polvo

de llantas en la mezcla asfáltica cumple con las normas técnicas para el uso en calles destinadas a tránsito vehicular.

Para obtener resultados relevantes se realizarán ensayos de laboratorio de asfaltos a las probetas que cuenten con adición de polvo de neumático reciclado, así como también a probetas no modificadas, para poder realizar comparaciones y obtener conclusiones de relevancia.

El incremento de la fabricación de neumáticos, debido al crecimiento del parque automotriz y la dificultad de un tratamiento adecuado para su reutilización, es uno de los problemas medioambientales más graves de los últimos años a nivel mundial.

La fabricación de neumáticos requiere de elastómeros o cauchos que constituyen el 60% de la producción anual de la industria del caucho. La manufactura de los neumáticos requiere de procesos químicos y físicos, por lo que es necesario usar técnicas de reciclado o reutilización de los materiales que conforman a los neumáticos. Actualmente, ciertas industrias recicladoras han optado por la reutilización del caucho vulcanizado triturado como aglutinante en la construcción de carreteras.

La conservación de la estructura de un pavimento flexible y rígido es fundamental para garantizar las características de diseño inicial, pese a estar sometido a factores ambientales y cargas vehiculares.

Debido a los antecedentes expuestos anteriormente surge el reto para los nuevos proyectos viales, de iniciar procesos amigables con el medio ambiente.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

Debido al incremento del parque automotor en el mundo, y por ende en nuestro país, la utilización de neumáticos crece día tras día produciendo un gran problema en cuanto a desechos de los mismos, ya que los neumáticos terminan en ríos, quebradas, basureros, contaminando nuestro planeta mientras un pequeño porcentaje va a reciclaje.

Los neumáticos tardan alrededor de 1000 años en descomponerse (Líderes, 2018). Según la revista “Muy Interesante” Cada año, cerca de 1000 millones de neumáticos llegan al

final de su vida útil en todo el mundo. Estas ruedas, en su mayor parte desechadas, podrían reciclarse, aprovechando los materiales recuperados para otras aplicaciones. En concreto, los neumáticos contienen acero y una cantidad elevada de materiales orgánicos que pueden emplearse como fuente de combustible en sustitución del carbón o de la biomasa o como materias primas secundarias en la fabricación de subproductos de alto valor añadido.

Los neumáticos son un elemento clave para garantizar la seguridad de nuestros trayectos por carretera. Por ello, es imprescindible cambiar las ruedas cada cierto tiempo para evitar más de un disgusto.

Los neumáticos almacenados representan un riesgo para la salud pública y el medio ambiente, contaminan el agua, aire y suelo. Por su forma particular y al ser impermeables, almacenan agua por largos períodos de tiempo, lo que genera un hábitat para la reproducción

El director del Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas (IIAT) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Pablo Castelú, señaló que en las ciudades de El Alto y La Paz se desechan al menos 300.000 llantas anualmente, de ellas sólo entre el tres o cuatro por ciento se reutiliza.

El eje metropolitano de Cochabamba generaba como residuos 1,2 millones de unidades de llantas cada año, hasta 2016. Esto representa 15.746 toneladas, según un estudio realizado por la cooperativa suiza Swisscontac (diario “Los tiempos” 2018).

En Bolivia se estima que se desechan anualmente 2'400.000 neumáticos, valor que cada año aumenta debido al incremento del volumen vehicular. El impacto ambiental negativo que genera un manejo inadecuado de los neumáticos fuera de uso (NFU), puede provocar la contaminación de cuerpos de agua, vertederos y la vida útil de los rellenos sanitarios disminuye.

La eliminación inadecuada de los neumáticos fuera de uso (NFU) en Bolivia genera la necesidad de implementar planes para poder manejar adecuadamente estos desechos. El reciclaje de los neumáticos fuera de uso (NFU) como parte de la estructura del pavimento asfáltico, permite su uso como parte de los áridos o como material ligante (Piggott &

Woodhams, 1979). Las propiedades elásticas del caucho triturado en las mezclas asfálticas permiten un mayor reciclaje de los neumáticos fuera de uso, además se disminuye el uso de agregado en la mezcla. A pesar de que, la fabricación de pavimentos en Bolivia el uso de materiales reciclados no es una práctica común por lo que es necesario buscar alternativas que sean amigables con el medio ambiente. Por tal motivo se incorporará al pavimento el caucho triturado fuera de uso (NFU) para el diseño de una nueva mezcla asfáltica que no generen contaminantes al medio ambiente y que su impacto ambiental negativo sea bajo.

Es de suma importancia que Bolivia empiece a adoptar ejemplos de otros países que, gracias a normas legislativas innovadoras, se han visto beneficiados con el uso de las nuevas tecnologías que se están usando a favor del medio ambiente. Si esto se aplica en el país, se tomará una nueva conciencia de conservación donde los mayores beneficiarios son los propios seres humanos. En resumen, el reciclaje de llantas ayudará a prevenir problemas estéticos, de contaminación y, lo más importante, problemas de salud en la población que puede ser perjudicada ya sea por el humo que emana de las llantas al quemarse o al ser un foco para la procreación de insectos portantes de diferentes enfermedades.

1.3.1.2. Determinación del problema

¿Se podrá demostrar que el uso de polvo de neumático reciclado aplicado al asfalto como una alternativa de reciclaje para uso en pavimentos de rehabilitación es una alternativa viable?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Identificar las propiedades de mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de polvo triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) aplicando diferentes ensayos y pruebas de laboratorio, para conocer sus nuevas características y analizar sus posibles usos en el campo vial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Consultar la bibliografía disponible para conocer los porcentajes de polvo de neumático triturado que se añadirá a la mezcla asfáltica en caliente.

- Describir las propiedades físicas del caucho utilizado en neumáticos que podrían alterar las mezclas asfálticas.
- Contactar con la empresa “INGOQUI” dedicada al reciclaje de neumáticos fuera de uso en nuestro país, para poder adquirir el material requerido.
- Ubicar los materiales para elaborar una mezcla asfáltica en caliente (grava, arena, asfalto).
- Dosificar las mezclas en medidas optimas.
- Someter a ensayos de caracterización mecánica el material asfaltico producido
- Establecer la resistencia a compresión de las probetas producidas.
- Realizar una valoración de los resultados obtenidos.
- Proponer posibles usos para el asfalto modificado en el campo de la ingeniería vial.

1.5. Hipótesis

Si una vez realizados los ensayos en laboratorio de asfaltos a probetas modificadas con polvo de neumáticos y obtenemos las nuevas características mecánicas entonces podremos concluir si el pavimento modificado es una alternativa considerable a aplicar como pavimento de rehabilitación en vías de transporte.

1.6. Definición de variables independientes y dependientes

1.6.1. Variable independiente

La variable independiente, Porcentajes de residuo de caucho (llantas trituradas en desuso) en las mezclas asfálticas.

1.6.2. Variable dependiente

La variable dependiente, es aquella cuya variación en su valor viene motivada por fluctuaciones en las variables independientes. La variable dependiente, o explicada, es en torno a la cual gira la investigación. Mezcla asfáltica, Estabilidad (Marshall).

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1 Conceptualización y operacionalización de variables

	VARIABLES	CONCEPTO	INDICADOR	UNIDADES
INDEPENDIENTE	Polvo de neumático	Es el polvo obtenido a partir de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso a través de un proceso de separación de las fibras metálicas del caucho y su posterior trituración en máquinas especiales.	Kg	Kg
DEPENDIENTE	Propiedades físicas de los agregados	Los agregados usados en construcción de carreteras se obtienen de rocas naturales locales: ígneas, sedimentarias y metamórficas.	Graduación	Pulg.
	Porcentaje de vacíos	Se refiere a las relaciones peso-volumen	%	%
	Penetración	Determinar la dureza o consistencia relativa de los cementos asfálticos, midiendo la distancia en décimas de milímetros que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto, midiendo temperatura, carga y tiempo	Mm	Mm

	Viscosidad	La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación.	Cst	Cst
	Gravedad específica	Es una comparación de la densidad de una sustancia definida como el peso unitario del material dividido por el peso unitario	Ad	Ad

Fuente: Elaboración propia

1.7. Diseño metodológico

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidades de estudio y decisión muestral

1.7.1.2. Unidad de estudio

La unidad de estudio de este proyecto de investigación serán las 30 muestras elaboradas en el laboratorio de asfaltos de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho, ubicada en el departamento de Tarija.

1.7.1.3. Población

La población se define como “un conjunto de todos los elementos que estamos estudiando, acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones” (Levin y Rubin, 1996, p.122). La población de estudio estará conformada por 36 briquetas de asfalto modificadas con la adición de polvo de neumáticos fuera de uso.

1.7.1.4. Muestra

La muestra es definida por Fortín (1999) como “un subconjunto de una población o grupo de sujetos que forman parte de una misma población” (p.166). en ese mismo sentido, Pineda, Alvarado y Hernández (1994) señalan que es “un subconjunto de la población en

que se llevara a cabo la investigación con el fin posterior de generalizar los hallazgos del todo” (p.108).

En este trabajo se utilizará el muestreo probabilístico simple, escogiendo 30 muestras.

1.7.1.5. Muestreo

Para la selección de la muestra se analizará la mezcla asfáltica con la adición de residuo de caucho que cumpla con las especificaciones de acuerdo a la norma para posteriormente realizar una comparación con la mezcla asfáltica convencional. Se tomará 30 muestras de asfalto modificado con polvo de neumático triturado

Para la selección de la muestra se analizará la mezcla asfáltica con la adición de +residuo de caucho que cumpla con las especificaciones de acuerdo a la norma para posteriormente realizar una comparación con la mezcla asfáltica convencional.

1.8 Método y técnicas empleadas

1.8.1. Métodos

El método inductivo consiste en explicar la realidad a partir de su observación. Es un proceso que va desde lo particular hasta lo general. El investigador que usa este método parte de la observación de unos casos concretos y concluye que la realidad debe comportarse de esa manera. En este proceso, habrá formulado un comportamiento o ley que explique el fenómeno estudiado.

El método deductivo consiste en explicar la realidad a partir de la lógica. Es un proceso que va desde lo general o abstracto hasta lo particular. Por lo tanto, el investigador que usa este método parte de una idea o premisa que considera apropiada y, a partir de ella, usa la lógica para alcanzar conclusiones. En este proceso, habrá formulado un comportamiento o ley, el cual utilizará en casos similares.

En este proyecto de investigación se utilizará el método inductivo que consiste en partir de lo particular hacia lo general.

1.8.2. Técnicas

La técnica de muestre aplicada para este estudio será la probabilística porque todas las muestras tendrán las mismas probabilidades y variaciones.

1.8.3 Ensayos previos a realizar

Los agregados de aportación se obtendrán del acopio del banco de la alcaldía de la Ciudad de Tarija, ubicada en la zona del ex zoológico. El betún tiene procedencia del país de Brasil y será proporcionado por la planta de asfaltos de Tarija. Con los agregados y el cemento asfáltico se utilizará la técnica experimental con ensayos de laboratorios que caracterizarán dichos materiales, se procede a diseñar la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico (85-100), con la granulometría de los agregados, y haciendo variar los porcentajes de residuo caucho, obteniendo así la mezcla asfáltica modificada.

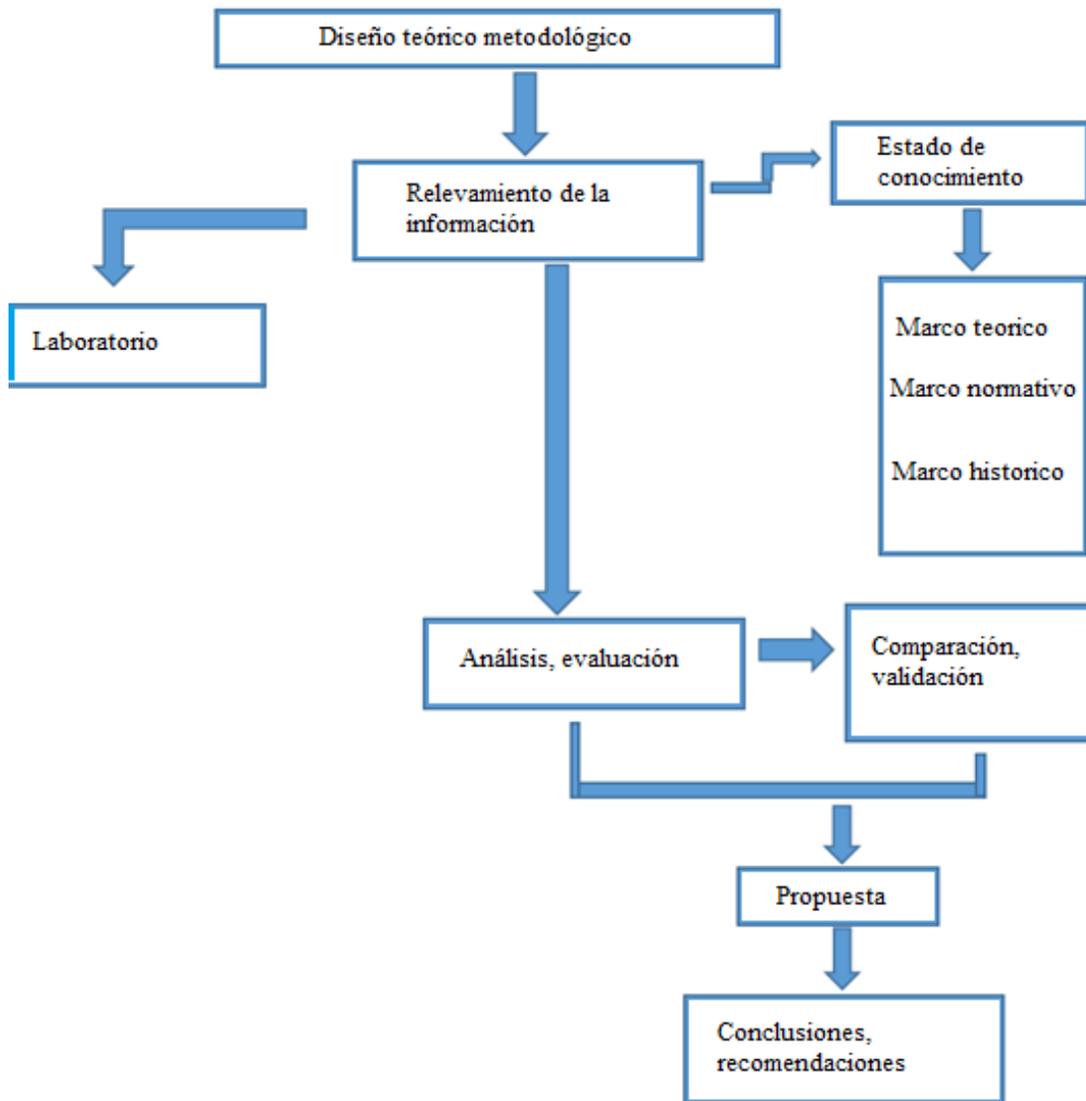
Tabla 2 Ensayos de caracterización

Asfalto convencional	Penetración	Ductilidad	Viscosidad	Punto de ablandamiento	Punto de inflamación
Agregados	Granulometría	Porcentaje de caras fracturadas	Equivalente de arena	Desgaste de los ángeles	Peso específico
Polvo de caucho	Peso específico	Granulometría	Peso unitario		

Fuente: Elaboración propia

1.8.3. Metodología

Figura 1 Esquema metodológico



Fuente: Elaboración Propia

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

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y de las pruebas de resistencia técnica, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización se determina el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto el cemento asfáltico y de los agregados.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica se determina las siguientes curvas:

- 1) % de Residuo de Caucho vs. Densidad
- 2) % de Residuo de Caucho vs. Estabilidad
- 3) % de Residuo de Caucho vs. Fluencia
- 4) % de Residuo de Caucho vs. % de Vacíos de la Mezcla
- 5) % de Residuo de Caucho vs. Relación Betún Vacíos
- 6) % de Residuo de Caucho vs. Vacíos de Agregado Mineral

1.10. Alcance de la Investigación

El presente proyecto tiene como finalidad identificar las propiedades de mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de polvo triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) aplicando diferentes ensayos y pruebas de laboratorio, para conocer sus nuevas características y analizar sus posibles usos en el campo vial.

Una vez determinado el porcentaje de polvo de neumático reciclado que se utilizará, se procederá a dosificar y realizar 18 muestras a 4 distintos porcentajes de polvo de neumático a las que se realizará las respectivas pruebas de laboratorio para obtener las nuevas características y propiedades en base a la bibliografía de asfaltos y la guía de laboratorio que cuenta la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Obteniendo los resultados de laboratorio se procederá a realizar una comparación entre las propiedades de las muestras asfálticas sin modificar con las muestras modificadas, con el fin de determinar si el polvo de neumático es viable como alternativa de aditivo para mezclas asfálticas en caliente.

En el primer capítulo se dará una introducción del presente proyecto de investigación, una justificación del tema, también se analizará la situación problemática y el problema que existe en relación al uso de polvo de neumáticos reciclados como alternativa de aditivo en mezclas asfálticas en caliente. Se definirán objetivos específicos y un objetivo general, También se tendrán en cuenta variables dependientes e independientes de acuerdo a los ensayos que se realizarán en laboratorio.

En el segundo capítulo se encuentra toda la fundamentación teórica necesaria para realizar la identificación de las propiedades de mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de polvo triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) y de esta manera poder realizar este proyecto de investigación.

En el capítulo III se realiza la aplicación práctica de la investigación que consistirá primeramente en realizar ensayos de caracterización al material reciclado, así como también al material granular que se utilizará, después una serie de pruebas de laboratorio a las muestras modificadas, y así poder determinar sus nuevas propiedades físicas y mecánicas.

El cuarto capítulo es un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, comparando el asfalto modificado con el normal, finalmente se obtendrán las conclusiones si es o no viable su aplicación y en base a esto se darán las recomendaciones necesarias

CAPÍTULO II
CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

2.1 Cemento asfáltico

2.1.1. Definición

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define el asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas.

El asfalto es un constituyente del petróleo. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto, y a veces pueden ser casi enteramente asfalto. Existen algunos petróleos crudos, sin embargo, que no contiene asfalto. En base a la proporción de asfalto, los petróleos se clasifican por lo común en:

- Petróleos crudos de base asfáltica.
- Petróleos crudos de base parafina (contiene parafina, pero no asfalto)
- Petróleos crudos de base mixta (contienen parafina y asfalto)

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera es como el asfalto, parafina, gasolina, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad son el resultado de una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado, Debido a que la base del asfalto es la base o el constituyente pesado del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado, en consecuencia, el asfalto es obtenido como residuo o producto residual, y es valioso para una gran variedad de usos arquitectónicos o ingenieriles. Prácticamente todo el asfalto comercializado en el medio con la finalidad de ser usado en la pavimentación de carreteras es producido en refinerías de petróleo modernas y se denomina asfalto de petróleo.

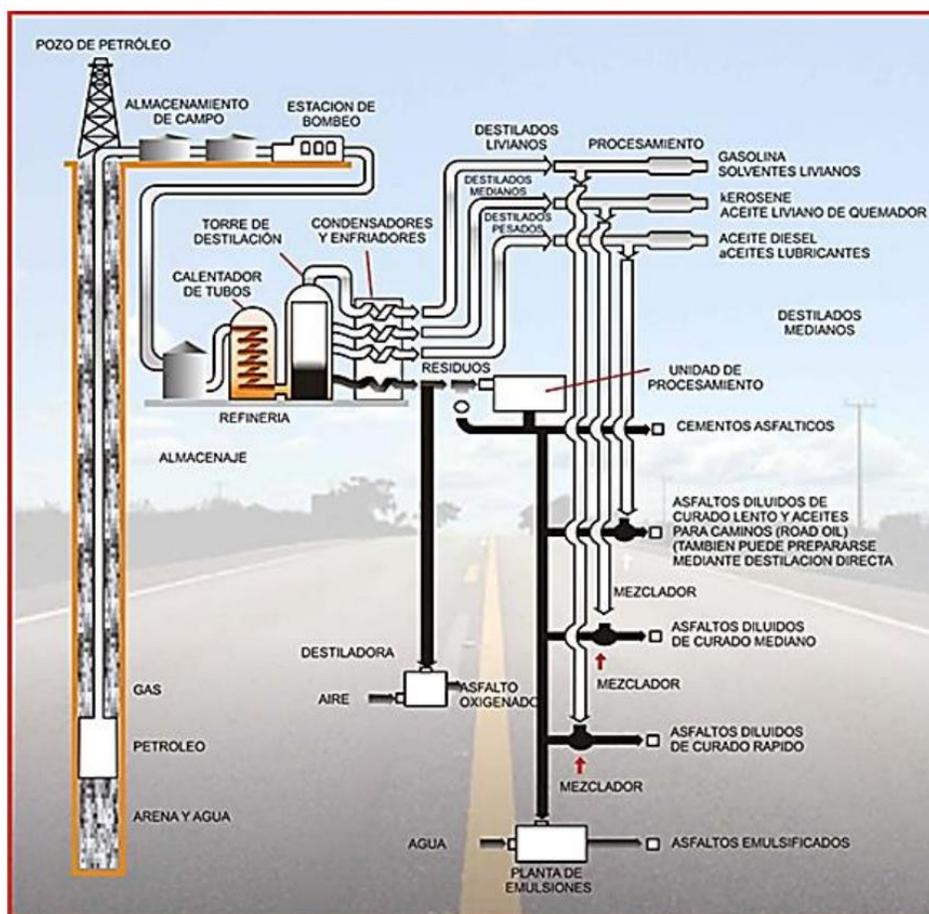
2.1.2. Refinación del petróleo para la obtención de cemento asfáltico

El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. El diagrama del proceso para la extracción del asfalto de petróleo (figura 2.1) muestra la circulación del petróleo crudo a través de una refinería destacándose la parte del proceso relativa a la refinación y producción del cemento asfáltico.

Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles) y se los separa para el posterior refinamiento en nafta, gasolina, querosene y otros productos derivados del petróleo. El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada o petróleo crudo, comúnmente llamada crudo reducido. Puede ser usado como fuel oil residual, o procesado en distintos productos entre ellos es asfalto. Para la separación de la fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener cemento asfáltico. Según el proceso de refinación utilizado se obtienen cementos asfálticos de muy alta o baja consistencia, estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada.

Los asfaltos soplados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia apropiado.

Figura 2 Proceso de refinación del petróleo para obtención del asfalto.



Fuente: <http://asfaltoenobractivi1.blogspot.com/2012/07/5-obtencion-del-asfaltoenrefinerias.html>

2.1.3. Composición química de asfalto

Está constituido por tres grupos básicos: asfáltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). Los asfaltos sometidos a temperaturas típicas de trabajo son un sistema disperso, ya que las partículas de la fase dispersa son las micelas, en las cuales el núcleo o agregado es el asfalten.

En los asfáltenos se concentran todos los metales contenidos en el crudo: Ni, V, Fe, Co, Mn, en una proporción apreciable el oxígeno, el azufre y el nitrógeno. El 80- 85% de los asfáltenos son átomos de carbono, la relación C: H se encuentra entre 0.8 y 0.87. Los asfáltenos son producto de la condensación de las resinas.

Tabla 3 Composición química del asfalto.

Elemento	Concentración
Carbono	82- 88%
Hidrógeno	8- 11%
Azufre	0- 6%
Oxígeno	0-1.5%
Nitrógeno	0- 1%

Fuente: Conferencia: Introducción a la Química del Asfalto por: Ing. German Garzón,
Costa Rica,2004

2.1.4. Clasificación de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, entre ellos:

a) Por Fracciones del Agregado pétreo en la mezcla

Masilla asfáltica: polvo mineral más el cemento asfáltico.

Mortero asfáltico: agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: agregado grueso más ligante asfáltico

b) Temperatura de la mezcla en la puesta en obra

Mezclas asfálticas en caliente: Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica, fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150°C, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiental, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Mezclas asfálticas en frío: El ligante es una emulsión asfáltica (aunque en algunos lugares se usan los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

c) Proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

Mezclas cerradas o densas: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5%. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo, son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.

Mezclas semicerradas o semi-densas: la proporción de vacíos está entre el 5% y el 10%.

Mezclas abiertas: la proporción de vacíos supera el 12%.

Mezclas porosas o drenantes: mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre sí, permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20%.

Tabla 4 Clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo a su granulometría

Especificaciones del invias para mezcla asfáltica	
Gradación	MSC – 2
Estabilidad	Mínimo 900 kg
Fujo	Entre 2 – 3.5 mm
Vacíos en la mezcla total	Entre 4 y 6%
Vacíos en los agregados	Mínimo 15%
Vacíos llenos con asfalto	Entre 65 y 75%

Fuente: INVIAS, (2012). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo

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

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

e) Por la granulometría

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

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

f) Por la estructura del agregado pétreo

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

abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.1.5. Ensayos para caracterizar el cemento asfáltico

Ensayos de penetración

Ensayo de ductilidad

Ensayo punto de inflamación

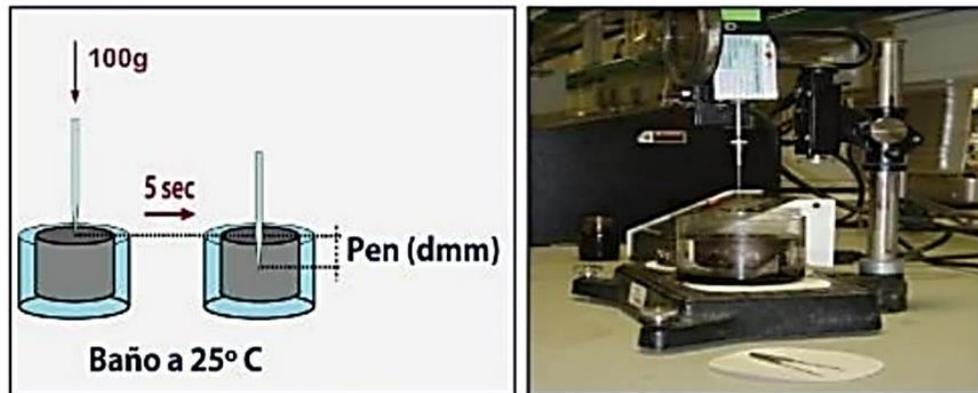
Ensayos de viscosidad

Peso específico

2.1.5.1 Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97)

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100gr y que la carga se aplica durante 5s (ver figura 2-7), La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

Figura 3 Ensayo normal de penetración



Fuente: Manual del asfalto-Institute, A.

2.1.5.2. Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

Es una característica de los asfaltos importante en muchas aplicaciones. La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que, en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

La ductilidad del asfalto se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 2-8. El ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de asfalto que después se somete a la temperatura normalizada del ensayo y se somete a alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad.

Figura 4 Ensayo de Ductilidad



Fuente: Manual del asfalto-Institute, A.

2.1.5.3. Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)

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 los 70°C determinado por medio de este método de ensayo.

2.1.5.4. Viscosidad (AASHTO T201 ASTM D 2170)

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad de asfaltos líquidos, aceites de caminos y residuos destilados de asfaltos líquidos, todos a 60°C, y de cementos asfálticos a 135°C, en el rango de 30 a 100.000cts.

2.1.5.5. Solubilidad

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre, y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven, sino que se depositan en forma de partícula.

Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

2.1.5.6. Peso específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.6 pesa 1.6 veces más que el agua.

El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado: El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado.

Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen. El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

2.2. Áridos

Los áridos utilizados para la elaboración del hormigón son la arena (agregado fino), Gravas (agregado grueso) de origen natural o piedra triturada y escoria cuyas características, resistencia, forma, durabilidad etc., sean adecuadas para el hormigón (Jiménez, 1973).

Cuando se requiere una durabilidad alta para medios muy agresivos, es necesario utilizar agregados como gravas y arenas de río, agregados de origen volcánico como calizas y dolomitas. Estas rocas, de las cuales son provenientes los áridos, contienen dentro de su estructura otros minerales y se clasifican por su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas.

Para definir si un agregado es grueso o fino se debe analizar el tamaño de su partícula, siendo así llamados agregados finos a las partículas que tengan un tamaño máximo de 9.5 mm y agregados grueso aquellas cuyas partículas sean retenidas en el tamiz N° 16 (1,18 mm.) y no sean mayores que 150 mm, sin embargo, este rango es muy amplio ya

que generalmente el agregado grueso más empleado es aquel cuyo diámetro se encuentre entre 19 y 25 mm.

Los agregados deben cumplir con normas de calidad que garanticen su limpieza, resistencia, durabilidad y ausencia de productos químicos. Los agregados que presenten un revestimiento de materiales finos como arcilla, y que se encuentran adheridas a materiales porosos y blandos, afectan a la adherencia de la pasta y la resistencia del hormigón.

2.2.1. Tipos de agregados utilizados en mezclas asfálticas

2.2.1.1. Agregado grueso

Los agregados gruesos son partículas grandes, mayores aproximadamente a 2,5mm (0,1”). Normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de ríos, rocas trituradas o de gravas trituradas y zarandeadas.

Grava triturada son piezas trituradas de canto rodado o grava para hacerlo más apropiado para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación- La calidad puede ser mejorada por medio de la trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas redondeadas en partículas angulosas con mejoras además en la distribución o rangos de tamaño de las partículas. Las proporciones de las partículas que tienen una o más caras fracturadas, tiene que ser mayor al 75% del peso total de partículas retenidas en un tamiz de 4,75 m Sin otro procesamiento, este producto de grava triturada o chancada se llama "triturado sin cribar".

2.2.1.2. Agregado fino

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2.5mm (0,1plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las facciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas. Los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz número 4. La arena se clasifica en: arena natural, arena artificial, polvo de trituración y arena 20 especial. La arena natural se clasifica, por el lugar de excavación en: arena de río, arena de cantera y arena de mar. La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodado. Las arenas son partículas rocosas que pasan el tamiz N0 4 y quedan retenidas en el NO 200; y

dentro de estas se encuentran las arenas finas, que son el material que pasa el tamiz N°40 y quedan retenidas en el N°200, y el material que pasa el tamiz N°10 y retenidos en el tamiz N0 40 se consideran arenas gruesas. Las partículas que pasan el tamiz N°8 o menos, que se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como "polvo de trituración"

2.2.1.3. Filler

Relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz N°200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado, aunque pueden utilizarse también otros polvos de piedras, cal apagada, cemento Portland y algunas sustancias minerales muy finas y otras de origen volcánicas.

El filler aumenta en muchos casos la estabilidad y la calidad de una mezcla, ayudando en la aportación de agregado fino cuando se utilizan gradaciones cerradas o densa; en estos casos es frecuente el empleo principalmente polvo mineral (Porción de los áridos finos que pasa el tamiz número 200), y otros fillers.

Tabla 5 Grados estándar del filler mineral

Filler Mineral			
Tamiz	N° 30	N° 100	N° 200
% que pasa	100	95-100	65-100

Fuente: Manual centroamericano

El polvo mineral es usado principalmente como filler para la mezcla de asfalto en caliente. Es la parte de los áridos que pasa por el tamiz N0 200. Puede consistir en partículas finas de los áridos finos o gruesos y/o filler mineral- El filler se produce triturando piedra caliza o roca volcánica y debe contener menos del 1% de agua y estar libre de aglomerados, no contendrá sustancias orgánicas ni partículas de arcilla. Cuando se almacena el filler mineral, se debe evitar cualquier contacto con agua o humedad, porque se vuelve inservible cuando está mojado. La cal apagada, el cemento Portland y otros productos procesados industrialmente se pueden usar a veces como fillers

minerales en mezclas asfálticas y para evitar el desarrollo de agrietamientos en el pavimento.

2.2.2. Propiedades de los áridos

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90% a 95%, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

Tabla 6 Propiedades de los áridos

Propiedades	Normativa
Granulometría	ASTM C 136
Material más fino que pasa el tamiz N° 200	ASTM C 117
Contenido orgánico	ASTM C 40
Resistencia a la abrasión	ASTM C 131
Gravedad y densidad específica	ASTM C 127
Absorción	ASTM C 70
Peso unitario y porcentaje de vacíos	ASTM C 29
Desgaste de sulfatos	ASTM C 88

Fuente: Elaboración propia

2.2.2.1. Granulometría

La Granulometría es el fraccionamiento de las partículas de un agregado a través del análisis de tamices, generalmente este análisis se basa en conseguir una curva granulométrica que se obtiene al pasar el agregado pétreo por tamices de diferente

diámetro. La curva granulométrica ayudará a determinar la eficiente gradación del material a utilizarse, determinar el tamaño máximo nominal de los agregados y fijar límites granulométricos. La granulometría define la forma en que las partículas de los agregados se acomodan dentro del hormigón y estará relacionada con la cantidad de agua y cemento, trabajabilidad, contenido de vacíos, retracción y durabilidad del hormigón (Kosmatka et al., 2004). Es necesario mencionar que no existe una curva granulométrica ideal, pues de acuerdo a cada autor, puede haber varias curvas granulométricas ideales y replicarlas implicaría un alto costo, sin embargo, se puede relacionar el módulo de finura del agregado con cualquier curva ideal para determinar el proporcionamiento óptimo de agregado grueso o fino y si este es adecuado o no.

2.2.2.2. Material fino que pasa el tamiz N° 200

Generalmente las partículas de los agregados que pasan el tamiz N° 200 (75 μm) se los considera limos y arcillas que se encuentran adheridas a las partículas de mayor tamaño, este revestimiento afecta la unión entre el árido y la pasta cementante. Otra consecuencia del exceso de material más fino que el tamiz N° 200 es su afectación directa con la demanda de agua, ya que la presencia excesiva de este material aumenta la relación agua cemento y en consecuencia se obtiene una menor resistencia del hormigón, según la ASTM C 33 los límites para el material fino que pase el tamiz N° 200 no debe superar el 5% pero si este es manufacturado puede llegar al 7%.

2.2.2.3. Módulo de finura (MF)

El módulo de finura de los agregados fino y grueso se calcula de acuerdo a lo especificado en las normas ASTM C 125, que es la suma de los porcentajes acumulados de material retenido en cada uno de los tamices que se especifican dividido para 100, estos tamices son N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8, N° 4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3", 6", y representa el índice de finura del agregado. Entre mayor sea el MF el tamaño de las partículas del agregado es más grueso.

El MF de los agregados finos nos ayuda a determinar la proporción de arena y ripio para el hormigón (Kosmatka et al., 2004).

La proporción adecuada de agregado fino y grueso se puede determinar tomando como referencia una curva ideal granulométrica que se encuentra en función del tamaño máximo del agregado, para así encontrar un módulo granulométrico teórico que cumpla con las dimensiones de nuestro agregado. A continuación, se muestra un ejemplo tomando en cuenta la curva ideal de Fuller.

Tabla 7 Modulo granulométrico de áridos que siguen la parábola Fuller

Tamaño máx. de una árido en mm	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Modulo granulométrico	5.21	5.45	5.64	5.82	6.00	6.16	6.29	6.51	6.60

Fuente: Hormigón Armado (Jiménez, 1973)

Se elige un módulo granulométrico de acuerdo con el tamaño máximo nominal, y junto con los módulos de finura del agregado grueso y fino se determinará la cantidad (en porcentaje) de grava y arena que requiere nuestra mezcla con la siguiente fórmula.

$$mt = (MFf * \frac{x}{100}) + (MFg \frac{y}{100})$$

$$X + Y = 100$$

Donde:

Mt = Modulo granulométrico teórico

MFf = Módulo de finura del agregado fino

Mfg = Módulo de finura del agregado grueso

X = Porcentaje del agregado fino

Y = Porcentaje del agregado grueso

2.2.2.4. Contenido orgánico

El contenido orgánico de los agregados es la presencia de contenido de origen animal o vegetal, las cuales se forman principalmente de carbono, nitrógeno y agua. El límite de tolerancias de materia orgánica dentro del agregado es de 500 ppm, si la presencia de contenido orgánico es muy alta, propiedades como la resistencia, durabilidad y tiempo de fraguado se verán afectadas en gran medida. Para determinar la presencia de contenido orgánico se debe realizar el ensayo de calorimetría de los agregados de acuerdo a la norma ASTM C 40 (Kosmatka et al., 2004).

2.2.2.5. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión de un agregado generalmente representa un índice de calidad del material, cuyo valor será de mucha importancia cuando este se encuentre sometido al desgaste como ocurre en plantas con prestaciones para maquinaria industrial o en pavimentos.

También durante la ejecución de la mezcla de hormigón, al ser colocado dentro de una mezcladora, se puede incrementar la presencia de finos y alterar la relación agua-cemento ya que genera una demanda de agua. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo a la norma ASTM C 131 (Kosmatka et al., 2004).

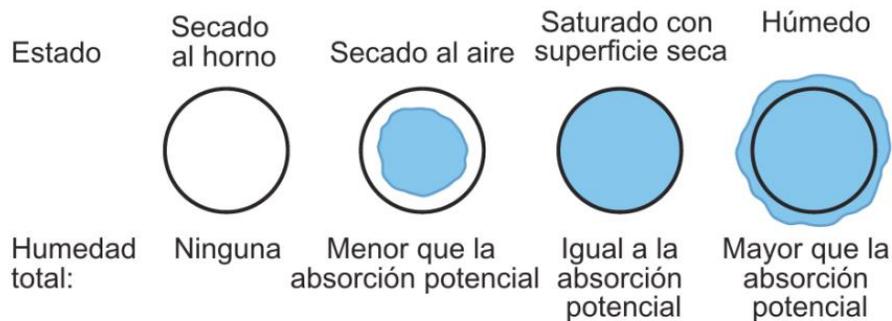
2.2.2.6. Gravedad específica y densidad

La gravedad específica es la relación entre la densidad de un agregado y la densidad del agua a temperatura ambiente (20 a 25 °C), y se la usa en algunos cálculos de proporciónamiento y control de la mezcla, en el diseño de mezcla por el método de volumen absoluto, en general mayor parte de los agregados pétreos presenta un valor de gravedad específica de 2,4 a 2,9. La masa específica o densidad, se la determina multiplicando el valor de gravedad específica por la densidad del agua cuyo valor aproximado es de 1000 kg/m³ (1 gr/cm³) y su valor se encuentra entre 2400 y 2900 kg/m³. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo a la norma ASTM C 127 y C 128 (Kosmatka et al., 2004).

2.2.2.7. Absorción y humedad superficial

La Absorción de un agregado es la capacidad de los áridos de absorber agua hasta que los poros internos de las partículas de los agregados se saturan, a este estado se lo conoce como superficie saturada seca. Este valor nos ayudará a determinar la masa correcta de los materiales para una mezcla. Las condiciones de humedad de los áridos se representan en la siguiente figura

Figura 7 Condiciones de humedad de las partículas de los áridos



Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto PCA (Kosmatka et al., 2004)

Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 70 (Kosmatka et al., 2004).

2.2.2.8. Peso unitario y porcentaje de vacíos

El peso unitario de un agregado es la masa necesaria para llenar un envase con un volumen unitario específico, este volumen representa la porción de agregados y vacíos entre partículas. La cantidad de vacíos afecta directamente en la demanda de pasta cementante. La forma y textura superficial de las partículas de agregado está relacionada con la cantidad de espacios vacíos, por lo que se recomienda mejorar la granulometría para disminuir este valor. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 29 y C 1252 (Kosmatka et al., 2004).

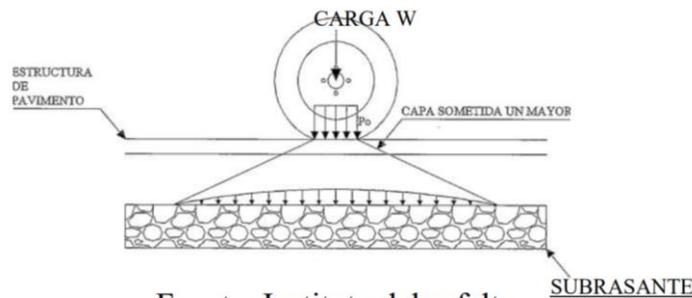
2.2.3. Control de calidad de los agregados

Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente considerada como un factor de calidad, sin embargo, este no es el caso necesariamente

para mezclas en caliente para pavimento. Una estabilidad extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados, y viceversa. Los áridos se emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezcla de usos muy diversos. Como los áridos constituyen normalmente el 90% al 95% en peso de las mezclas asfálticas sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado. Los áridos más empleados son piedra canto rodado, grava triturada o natural, arena y filler natural.

En la construcción de pavimentos asfálticos el control de las propiedades de los áridos es tan importante como el de las del asfalto. El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores donde las cargas resultan disipadas o no son tan concentradas como se puede observar en la figura.

Figura 8 Distribución de Esfuerzos



Fuente: Instituto del asfalto

2.2.4. Ensayos realizados a los agregados

2.2.4.1. Granulometría (ASTM E 40 AASHTO T27-99)

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

Tabla 9 Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría.

Posición	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Designación tamiz
0	3/1024	0.075	Nº 200
1	3/512	0.150	Nº 100
2	3/256	0.300	Nº 50
3	3/64	0.600	Nº 30
4	3/16	1.200	Nº 16
5	3/8	2.400	Nº 8
6	¾	4.800	Nº 4

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 36.

2.2.4.2. Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos (AASHTO T85; AASHTO T84)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos. Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000kg/m³ y 3000kg/m³, se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

2.2.4.3. Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASHTO T176-00)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz N°4 (4.75mm).

2.2.4.4. Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99)

Los agregados deben ser resistentes para poder soportar el rodillado durante el proceso constructivo y enseguida la acción del tráfico. Para ello se debe realizar el método de ensayo “Desgaste de los Ángeles”.

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.36mm, de densidad neta entre 2000kg/m³ y 3000kg/m³, mediante la máquina de los Ángeles.

2.2.4.5. Desintegración sulfato de sodio (ASTM E 88; AASHTO T104-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El uso de una u otra sal es alternativo, pero sus resultados no son comparables.

Este método se aplica a los áridos de densidad neta entre 2000kg/m³ y 3000kg/m³, que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y, mezclas asfálticas.

2.2.4.6. Caras fracturadas en los áridos (ASTM D 5821)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso de material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

2.2.4.7. Porcentaje de partículas planas y alargadas (ASTM D4791)

Este método cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas o alargadas y planas de agregado grueso mayores de 9.5mm (3/8”). Las partículas de agregado planas o alargadas, para algunos usos en construcción, pueden interferir con la consolidación y provocar dificultad para colocar los materiales. Este método de prueba provee un medio para verificar el cumplimiento con las especificaciones que limitan tales partículas, o para determinar las características relativas a la forma del agregado grueso.

2.2.5. Especificaciones que deben cumplir los agregados

2.2.5.1. Agregado grueso

Este material debe consistir en grava de buena calidad triturada (retenidos en la malla de 4.75mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos siguientes:

Tabla 10 Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso

N°	Parámetro	Norma	Especificación
1	Abrasión de los Ángeles	AASHTO T 96	40 % máx.
2	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12 % máx.
3	Caras fracturadas	AASHTO D 5821	75 % máx.
4	Caras planas y alargadas	AASHTO T 4791	10 % máx.

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.5.2. Agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra chancada tamizada, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según AASHTO M 29 incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

Tabla 11 Especificaciones que debe cumplir el agregado fino

N°	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35 % máx.
2	Equivalente de arena	AASHTO T 176	45 % máx.
3	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	15 % máx.

Fuente: Elaboración Propia.

La graduación del agregado fino será conforme a la siguiente graduación.

Tabla 12 Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29

3/8 "	9.500	100	-	-	100	100
Nº 4	4.750	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
Nº 8	2.360	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
Nº 16	1.180	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
Nº 30	0.600	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
Nº 50	0.300	7 a 40	8 a 30	30 a 90	7 a 40	7 a 65
Nº 100	0.150	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	7 a 46
Nº 200	0.075	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	2 a 30

Fuente: Norma AASHTO M 29

2.3. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato de manera que, aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.3.1. Tipos de mezclas asfálticas

2.3.1.1. Mezclas asfálticas en caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo

mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente. Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6 0 0 de asfalto en volumen de agregados pétreos.

2.3.1.2. Mezclas asfálticas en frío

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión.

2.3.1.3. Mezclas porosas drenantes

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos, con asfaltos convencionales, se aplican en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón Utilizadas como mezclas en caliente para tráfico de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm. se consigue que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

2.3.1.4. Micro aglomerados

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm, lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los micro aglomerados en frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los micro aglomerados en caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) Tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones. Tradicionalmente se les han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor. Hay micro aglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

2.3.1.5. Masillas

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que, si hay agregado grueso se haya disperso en la masilla formada por aquellos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla. Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Los asfaltos fundidos, son de este tipo, son mezclas de gran calidad, pero su empleo está justificado únicamente en los tableros de los puentes y en las vías urbanas, incluso en aceras, de los países con climas fríos y húmedos.

2.3.1.6. Mezclas de alto módulo

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 Mpa. A 20 grados centígrados y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15 cm., tanto

para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de grava cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción o como las mezclas convencionales en gran espesor la ventaja es una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorrar espesor.

2.3.2. Propiedades de las mezclas asfálticas

2.3.2.1. Peso específico de los agregados

Como el agregado está compuesto por fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler natural, todos con distinto peso específico, los cálculos finales se verán simplificados de gran manera por el cálculo del peso específico bruto del agregado total. Generalmente, los pesos parciales, se expresan en por cientos del peso total del agregado- Para introducir en la fórmula (que se detalla a continuación) el peso específico del agregado grueso y el agregado fino se utiliza el peso específico masivo (bulk), y para el filler se usa el peso específico aparente, por lo tanto, la fórmula de peso específico promedio, del agregado mineral es la siguiente:

2.3.2.2. Densidad máxima real de la mezcla (gr/cm³)

Las mezclas asfálticas cuya densidad real requiere ser determinada, pueden ser moldeadas en laboratorio, u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y longitud de las muestras deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleado y su altura, por lo menos una vez y medio el tamaño del agregado.

La densidad real de la mezcla es comúnmente llamada peso unitario de mezclas asfálticas. Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, al fin de tapar todos los poros, o vacíos de la mezcla, y dejar la muestra al aire 30 minutos antes de pesarla. La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$D_r \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PV(gr)}{VP(cm^3)}$$

Donde:

Dr= Densidad real de la mezcla (briqueta)

PV= Peso de la briqueta sin parafina

VP= Volumen de la briqueta sin parafina

2.3.2.3. Densidad máxima teórica (gr/cm³)

El peso máximo teórico, de una mezcla asfáltica, compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire. La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula su cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{GCA} + \frac{100 - \%C.A.}{G_{agreg}}}$$

Donde:

Dmt = Densidad máxima teórica

% C. A = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico de cemento asfáltico

Gagreg = Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kilos por metro cubico (kg/m³), gramos por centímetro cubico (gr/cm³), o libras por pie cubico (lb/ft³). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³) o (62.416 Lb. /ft³).

La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad en el laboratorio (por que en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%).

2.3.2.4. Vacíos de la mezcla (%)

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen del aire en la muestra compactada. Es importante tomar en cuenta que, en una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos o poros existentes entre las partículas del agregado mineral, se llena de asfalto, quedando lleno de aire el resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Como dijimos anteriormente, la mezcla asfáltica compacta deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 y 5% del volumen total de la mezcla. Por lo tanto, como ya se indicó los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 y 5 % dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

$$Vm(\%) = \frac{D_{mt} - D_{rm}}{D_{mt}} * 100$$

Donde:

V_m = Vacíos de la mezcla compactada

D_{mt} = Densidad máxima teórica

D_{rm} = Densidad real promedio

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar agua y aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta es la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos.

2.3.2.5. Vacíos del agregado mineral V.A.M.%

Expresado en porcentaje del volumen total, representa el volumen de vacíos existentes en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.

Figura 4 Distribución de volúmenes en una mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

El espacio intergranular está ocupado por el asfalto y aire en una mezcla compacta denominada V.A.M. (vacíos de agregado mineral). Por lo tanto, se define como la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo expresado como un porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del V.A.M (vacíos de agregado mineral).

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra- Representan el volumen de la mezcla compacta que no es ocupado por el agregado. El espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denomina VAM (vacíos de agregado mineral). En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo,

El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del VAM. (vacíos de agregado mineral), por lo tanto, los vacíos del agregado mineral, son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compacta de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM (Vacíos de agregado mineral) representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos de la mezcla. Los valores recomendados para el V.A.M. (Vacíos de agregado mineral) de acuerdo al tamaño de las partículas se indican en la siguiente tabla.

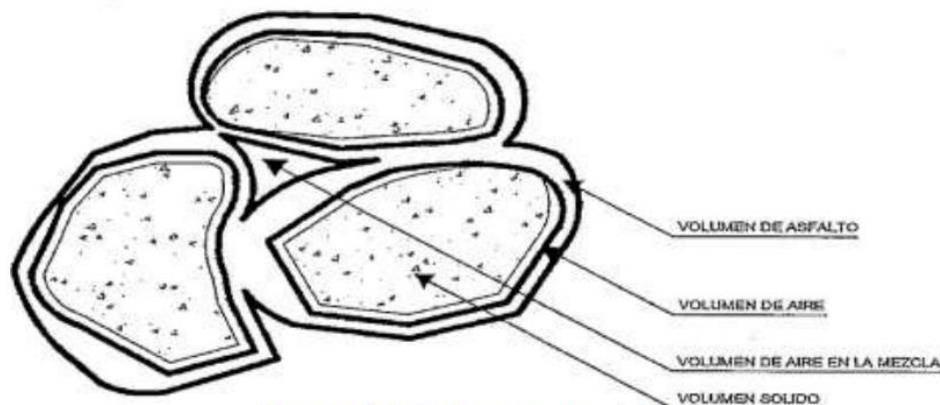
Tabla 13 Valores recomendados para los V.A.M. (vacíos de agregado mineral)

Tamices standard		Tamaño nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm)	Alternativo	Mm	Plg.	
1.18	N°16	1.18	0.0469	23.5
2.36		2.36	0.093	21.0
4.75	N° 4	4.75	0.187	18.0
9.50		9.50	0.375	16.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Fuente: Manual centroamericano —Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM (vacíos de agregado mineral) como se detalla en el cuadro anterior los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea La película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla. Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM (vacíos de agregado mineral). Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM (vacíos de agregado mineral) por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM (vacíos de agregado mineral) para economizar en contenido de asfalto.

Figura 5 Diagrama de partículas en la mezcla asfáltica



Fuente: Manual centroamericano

En el esquema gráfico se puede observar que el volumen de vacíos puede ser índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada, al pasaje del aire o agua es de mucha importancia la interconexión de vacíos con la superficie. En casos extremos, cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1% en los vacíos.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$\text{VAM (\%)} = \text{Vm(\%)} + \frac{\text{CA(\%)} * \text{Drm}}{\text{GCA}}$$

Donde:

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada

CA (%) = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico del cemento asfáltico

Drm = Densidad real promedio

Bajo ninguna circunstancia se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que estas variaciones se deben sobrepasar, sólo bajo condiciones extremas, a menos que el comportamiento, con combinaciones específicas de agregados muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica.

A medida que se reduce el tamaño de las partículas, estamos exigiendo un volumen mayor de asfalto, porque estamos aumentando el área superficial, consecuentemente debemos obtener mezclas con mayor porcentaje de V.A.M. (vacíos del agregado mineral) y en caso de que una dosificación se hubiese obtenido un V.A.M. (vacíos del agregado mineral) menor requerido de acuerdo a las especificaciones se debe estudiar nuevamente la otra mezcla y así sucesivamente hasta obtener un valor de V.A.M. igual o mayor requerido.

2.3.2.6. Relación betumen vacíos (%)

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta. Esta propiedad es el porcentaje de VAM (vacíos del agregado mineral), que contiene asfalto.

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$RBV(\%) = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

Donde:

RBV (%) = Relación betumen vacíos

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada

2.3.2.7. Estabilidad de la mezcla (Lb)

Se entiende estabilidad de la mezcla la carga máxima (carga de rotura) obtenida cuando se ejecuta el ensayo de acuerdo a las condiciones establecidas para ello, este parámetro se puede asimilar igualmente como una medida de la resistencia al corte de la mezcla.

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en libras que soporta una probeta aproximadamente de 6.35 cm. de altura y 10.00 cm de diámetro cuando se la ensaya a temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica, La estabilidad es la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones). La estabilidad depende de la fricción interna y de la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto de las partículas. La resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las del agregado- Para cualquiera agregado dado, la estabilidad aumenta con la densificación (hacer que el agregado sea compacto, apretado) de las partículas confinadas, la cual se logra mediante granulometrías cerradas y adecuada compactación. El exceso de asfalto en la mezcla tiene a lubricar las partículas y a disminuir la fricción interna del esqueleto pétreo.

La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación. El asfalto sirve para mantener las presiones de contacto desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Varía intensamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece.

Generalmente para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea generalmente, diversos métodos, pero para nuestro caso de estudio se usa el método Marshall. La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre todas las partículas ha llegado a un valor crítico, Un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla, pero aumentando su durabilidad. Por esta razón es mejor conservar el contenido de asfalto tan alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

2.3.2.8. Fluencia de la mezcla (1/100")

Es la deformación total expresada en centésimas de pulgada que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla. Los valores de fluencia se incrementan, con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

El flujo es la deformación que ocurre en el instante de la rotura, y por tanto una medida de la plasticidad y capacidad de fluidez de la mezcla. Esta deformación se considera en la misma dirección de aplicación de la carga.

2.3.2.9. Relación estabilidad – fluencia

Para entender que es una mezcla buena o mala, se recurre al concepto de rigidez analizando de una manera combinada los parámetros de estabilidad y flujo. Existe la falsa idea en nuestro medio de que una mezcla de alta estabilidad es en general buena, lo que lleva de hecho a fortalecer la idea de fabricar mezclas muy rígidas, asunto que favorece a la resistencia a la deformación plástica, pero a costa de una debilidad al fenómeno de la fatiga. La tendencia a fabricar mezclas muy rígidas, con la falsa idea de que mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, genera, en consecuencia, una

ausencia de la flexibilidad típica del pavimento asfáltico, que puede influir en la fisuración. El problema de especificar independientemente estos parámetros radica en que se suele rechazar mezclas cuando alguno de estos no cumple con los valores establecidos para control, es decir, que se está argumentando que al cumplir con los parámetros de estabilidad y flujo la mezcla es buena, pero antes de llegar a esta conclusión es indispensable verificar la rigidez de la mezcla. Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleada en la relación estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas. Para la elaboración de asfaltos espumados, no se realizó ningún estudio que relaciones ambas propiedades mecánicas y de esta manera poder hacer una evaluación de su factibilidad como método de fabricación de asfaltos, que pueda salvar los problemas suscitados durante la fabricación de un asfalto tradicional como es la pérdida de la temperatura de la mezcla antes del proceso de compactación. Cuidando que para el método Marshall, las especificaciones establecen un valor mínimo de estabilidad, mas no definen un máximo, en consecuencia, es frecuente ver que en muchos casos los diseños de mezclas asfálticas se toman valores extremadamente altos de estabilidad, sin tomar en cuenta que pueden llegar a ser perjudiciales, la estabilidad es un índice de la mezcla que indica rigidez, que al ser puesto en la estructura del pavimento, este será fácilmente quebradizo bajo las cargas del tránsito y más susceptible a los agentes del intemperismo, degenerándose completamente hasta el punto de perder la capa asfáltica.

2.4. Cauchos y neumáticos

Antes de explicar el proceso de fabricación del neumático, es importante describir al caucho y las propiedades que posee. El diccionario de la Real Academia Española define al caucho como “Látex producido por varias moráceas y euforbiáceas intertropicales, que, después de coagulado, es una masa impermeable muy elástica, y tiene muchas aplicaciones en la industria” (RAE, 2010).

De la misma forma, Clavijo (2004) define al caucho como “un árbol de porte mediano correspondiente al género *Hevea* perteneciente a la familia Euphorbiaceae. Este material también es conocido como caucho, hevea, hule, jebe y siringueira (Clavijo, 2004).

Así mismo, en el Anuario de 2004, los autores mencionan que el caucho natural es un producto “obtenido por medio de la coagulación del látex que es emanado de algunas plantas, en especial del árbol del caucho” (Agrocadenas, 2004). La revista Agrocadenas adicionalmente describe que el árbol de caucho utilizado para la extracción es “de tamaño mediano de 10 a 20 metros de altura y de tallo cilíndrico” (2004). El árbol de caucho puede ser encontrado en zonas que van desde 0 a 1200 metros sobre el nivel del mar (Agrocadenas, 2004).

El árbol de caucho es nativo de Sudamérica y se produce en países como Brasil, Colombia, Ecuador y Perú; en estado silvestre, puede alcanzar altura de entre 25 y 30 metros de altura.

Este árbol crece en zonas tropicales húmedas donde existan posibilidades de producirse pequeñas inundaciones o presencia de lodo constante. En Latinoamérica se siembran aproximadamente 280 mil hectáreas de caucho, lo que cubre el 3,9 % de la oferta mundial (FAO, 2010). El caucho tiene varias aplicaciones desde ser aislante de sismos para estructuras hasta ser utilizado como materia prima para llantas, borradores, aditivos entre otros.

Una vez definido lo que es el caucho, es importante conocer un poco acerca de la historia de esta sustancia para, posteriormente, explicar la fabricación del neumático.

A mediados del siglo XVII, el gobierno francés envió al matemático Charles Marie Condamine a una expedición geográfica por Sudamérica. Uno de los propósitos de esta expedición era conocer la efectividad del caucho en la zona industrial. Al finalizar la expedición, los resultados mostraron que el caucho no podía mantener su forma al ser expuesto a diferentes temperaturas (Compagno, 1986). Al estar a una temperatura alta, el caucho se derretía, mientras que, al exponerse a temperaturas bajas, el caucho se volvía quebradizo. Ante estos resultados, se dio por sentado que el caucho no tenía usos prácticos inmediatos. (Compagno, 1986)

Figura 6 Extracción del caucho

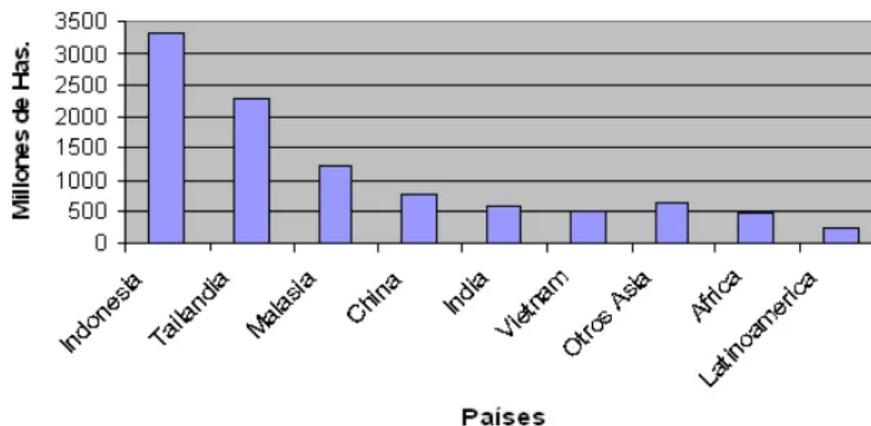


Fuente: <https://globalrubbercorporation.com/>

En 1836, el americano Charles Goodyear descubrió que el hule o caucho, al ser calentado con azufre, se volvía un compuesto estable que podía resistir varios cambios de temperatura.

Por otro lado, en 1888 Henry Ridley impulsó la exportación de las plantas de caucho, realizó experimentos de densidades de plantación, así como los procesos de secado (Martines et al., 2001). Así mismo, en ese año el inglés John Dunlop fabricó la primera llanta neumática que se utilizaría en una bicicleta. Sin embargo, sería en 1895 la primera vez que se usaría el neumático de Dunlop en un automóvil. Años más tarde, en 1926 Malasia crea la organización Rubber Research of Malasia, convirtiéndose en la máxima autoridad en la producción de hule natural. Según el International Rubber Study Group el 90 % de las plantaciones de caucho se encuentran en el continente asiático. Siendo Indonesia, Malasia y Tailandia los mayores productores de hule natural. (Martines et al., 2001).

Figura 7 Producción mundial del caucho por país



Fuente: <https://1library.co/document/nq76d3ny-desarrollo-sostenible-cadena-productiva-caucho-colombia.html>

2.4.1. Procesos para la fabricación de neumáticos:

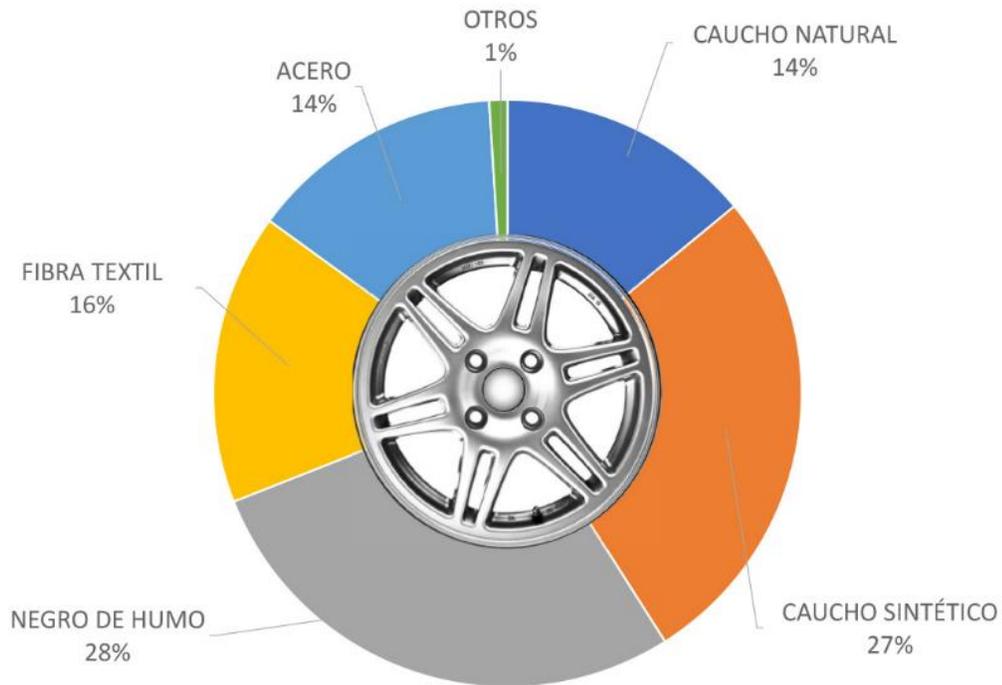
Según Castro (2008) “Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga”.

Castro (2008) señala que, según las funciones que desempeña el neumático, cada material que se utiliza en su fabricación debe cumplir con los requerimientos del neumático; en su mayoría, la llanta está compuesta de caucho que representa casi el 50 % de su peso total. De esta manera se entiende por qué el 60 % del caucho producido a nivel mundial es utilizado para la fabricación de neumáticos. Adicionalmente, el caucho del neumático está compuesto por una serie de materiales como:

- **Fibras reforzantes:** que están compuestas de fibras textiles y de acero que, a su vez, forman hilos que ayudan a la resistencia del neumático. La cantidad de estas fibras varía según quién lo produce.
- **Plastificantes:** son aditivos que sirven para facilitar la preparación de la mezcla del neumático y ayudan a la flexibilidad del mismo en bajas temperaturas. Generalmente son aceites de origen mineral.

- **Varios:** además de los compuestos antes mencionados, los neumáticos contienen agentes vulcanizantes (azufre), acelerantes (sulfuros), retardantes (N-nitroso), antioxidantes, entre otros. En la imagen 3 se presentan la composición y características de los neumáticos según la Rubber Manufacturers Association:

Figura 8 Composición de los neumáticos de automóviles



Fuente: TNU Tratamiento de Neumáticos Usados

2.5. Polvo de llanta

En la actualidad, el reciclaje de la llanta no está normado dentro de la Constitución vigente de nuestro país ni en otras normas legislativas. Las llantas se componen de un gran número de sustancias que podrían ser consideradas como peligrosas, las cuales tienen un impacto negativo en la salud si no se les da el manejo apropiado.

Los gobiernos de todo el mundo están tratando de encontrar nuevos usos a los materiales que generalmente son desechados; por esta razón, las políticas actuales se orientan cada vez más a la reutilización de los recursos, además de sanciones más severas para quienes atenten contra el medio ambiente.

Por los motivos señalados, las grandes empresas están invirtiendo ingentes sumas de dinero para encontrar alternativas para el procesamiento de sus residuos y el reciclaje de la materia que ya ha sido usada.

El inadecuado tratamiento de los neumáticos usados produce varios problemas. Cuando se queman las llantas a cielo abierto, se causa un gran impacto al medio ambiente, ya que se liberan contaminantes de referencia, tales como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Incluyen también contaminantes peligrosos tales como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dioxinas, furanos, cloruro de hidrógeno, benceno, bifenilos poli clorados (PCBs), y metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo, y vanadio. Los compuestos volátiles más abundantes pertenecen a los aromáticos, así como los alifáticos, olefínicos. La exposición de los humanos a este tipo de compuestos causa problemas de salud tanto a largo como a corto plazo, algunos de estos efectos pueden incluir irritación de la piel, ojos y membranas mucosas, depresión del sistema nervioso central, efectos respiratorios y cáncer entre los más graves. Las mutaciones causadas por las sustancias resultantes de la quema de las llantas son mucho más agresivas que las producidas por otro tipo de proceso como la contaminación, quema de la leña entre otros; las mencionadas mutaciones pueden provocar defectos al momento de nacer, abortos espontáneos, cáncer, o podrían influir en el aumento de enfermedades genéticas en las futuras generaciones.

En algunos casos, especialmente en zonas rurales, las llantas son utilizadas como un tipo de combustible alternativo debido a su bajo costo y su alto poder energético, a lo que se suma el hecho de que no existe un control permanente por parte de una autoridad ambiental estatal. En estos lugares se puede presentar la ausencia de una correcta ventilación con los problemas que esto conlleva.

Por otro lado, el incorrecto almacenamiento de las llantas principalmente causa cuatro tipos de impacto importantes:

- Proliferación de vectores como mosquitos y roedores debido al estancamiento de las aguas y la inaccesibilidad de zonas de almacenamiento (se recomienda perforar las llantas antes de almacenarlas a la intemperie).
- Riesgo de incendios incontrolables en lugares donde se apila gran cantidad de llantas sin la apropiada distribución y medidas de control mínimas.
- Riesgos de derrumbe cuando se apilan los neumáticos de manera inadecuada.
- Deterioro del entorno y del paisaje.

Adicionalmente, cabe resaltar el costo que representa el almacenaje de las llantas por el cual no se obtiene ningún tipo de ganancia económica.

En la actualidad, el cuidado ambiental se está abriendo campo como una de las nuevas políticas que los gobiernos están adoptando por la creciente preocupación ciudadana sobre la contaminación y especialmente el cambio de clima como resultado del efecto invernadero que está sufriendo el planeta.

En vista de lo señalado en párrafos previos, se observa la necesidad de implementar formas de reciclaje de los neumáticos usados. Es, en este sentido, que se puede hacer uso del polvo de llanta que se puede obtener de dos maneras:

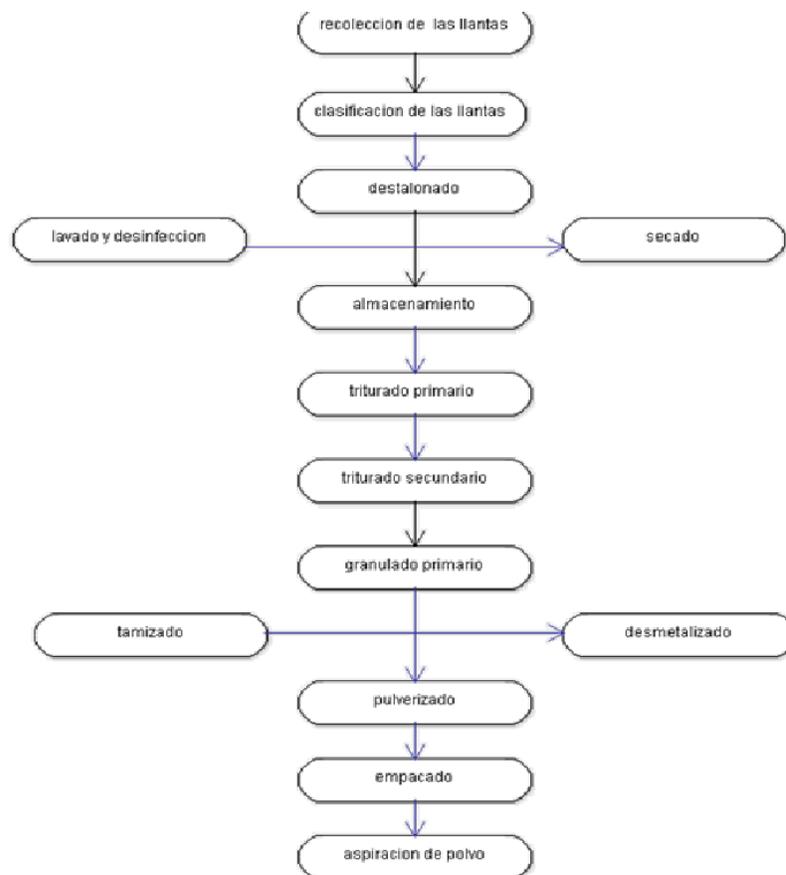
Trituración criogénica: este método necesita instalaciones muy complejas, a lo que se suma el hecho de que el mantenimiento de la maquinaria es costoso y del proceso es difícil. La baja calidad de los productos obtenidos, la dificultad material y económica para purificar y separar el caucho y el metal entre sí y de los materiales textiles que forman el neumático, provoca que este sistema sea poco recomendable.

Trituración mecánica: los productos resultantes son de alta calidad, limpios de todo tipo de impurezas lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos es, casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de neumáticos. Este concepto incluye la fragmentación del neumático en gránulos y separación de componentes (acero y fibras). Los usos más comunes de estos productos son: materiales de relleno, modificadores de asfalto, superficies de atletismo y deportes, y productos

moldeados y calandrados. Lo que se pretende es incrementar la calidad y consistencia del polvo de llanta, lo que conducirá a un reciclado del material mucho más extenso.

El resultado de la trituración descrita puede ser utilizado en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, con lo que se podría disminuir la extracción de áridos de las canteras. Se cuenta con estudios realizados en Argentina que han demostrado que en pavimentos rígidos se utilizan entre 1000 y 7000 neumáticos (triturados en forma de polvo de llanta) por kilómetro de una vía de dos carriles, dependiendo del sistema usado en la construcción del pavimento rígido.

Figura 9 Esquema del proceso para la obtención del polvo de llanta

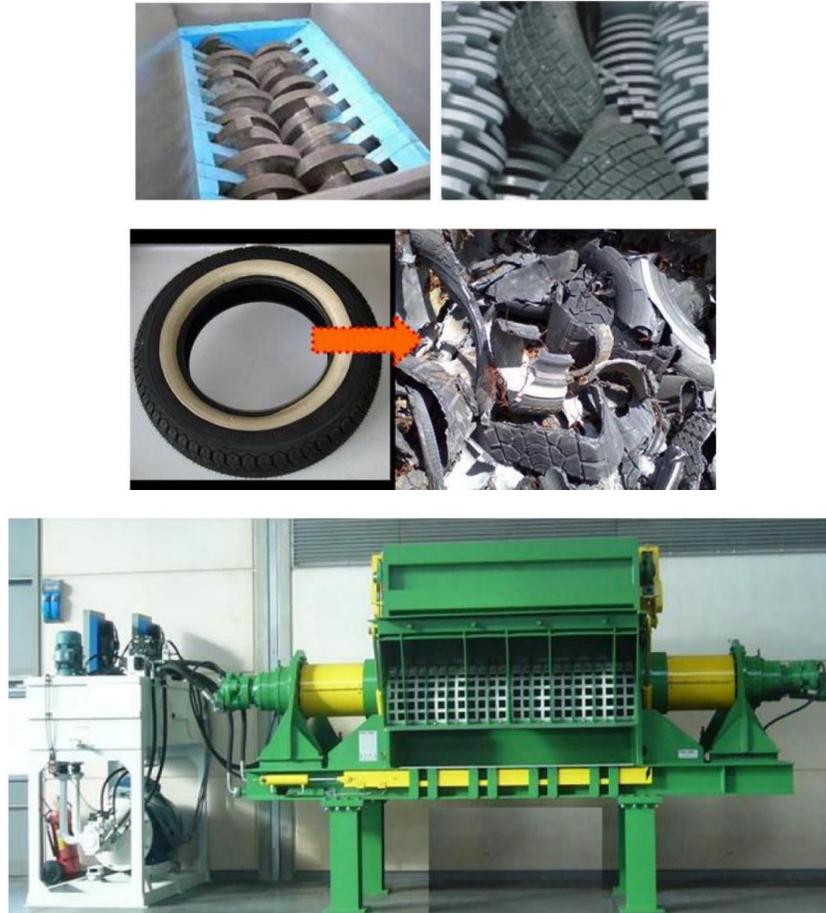


Fuente: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/>

Se inicia con la trituración primaria, la cual consiste en llevar al neumático entero a una máquina generalmente de dos rotores con cuchillas que cortan a las llantas en trozos. Los

materiales resultantes siguen siendo muy grandes, el objetivo de este primer proceso es solamente trocear al neumático y que no se encuentre en una sola pieza.

Figura 10 Proceso de trituración primaria



Fuente: Empresa Ingoqui

- Posteriormente se realiza una trituración secundaria en otra máquina trituradora la cual reduce los pedazos de llantas provenientes de la trituración primaria. Esta máquina cuenta con parrillas metálicas que van tamizando los pedazos de la llanta de acuerdo con el tamaño que se necesita. Los trituradores que se utilizan para estos procesos son máquinas robustas que generalmente tienen parrillas metálicas que van desde los 20mm hasta los 100mm dependiendo del tamaño estándar del fabricante. Varios fabricantes dan la posibilidad de que las parrillas usadas sean intercambiables con el fin de ofrecer variedad de tamaños.

- Luego de la trituración secundaria, se llevan los pedazos de la llanta al granulador primario. El material obtenido de este proceso puede tener hasta 16mm de diámetro.

Figura 11 Máquinas granuladoras primarias



Fuente: Empresa Ingoqui

El siguiente paso en el proceso hacia el polvo de llanta es la separación del acero armónico de la llanta. Para esto, se utiliza un separador magnético que cuenta con una banda transportadora que se ocupa de conducir el acero hasta un punto de recolección. En este proceso se logra separar has un 99 % del acero armónico de la llanta.

Figura 12 Separador magnético de acero



Fuente: Empresa Ingoqui

- El proceso sigue con el granulado secundario que tiene como objeto reducir aún más el tamaño del material hasta llegar al deseado para el proceso en el que se lo va a utilizar. Estas máquinas pueden dejar material hasta de 0,7 mm.

Figura 13 Maquina granuladora secundaria



Fuente: Empresa Ingoqui

Figura 14 Producto final del proceso



Fuente: Empresa Ingoqui

La instalación de una planta, según datos de empresas recicladoras en Europa (considerando una planta con una capacidad de 2,5 toneladas por hora), requiere una inversión de 2 millones de euros solo para la compra de la maquinaria necesaria. Además, para el funcionamiento de la planta recicladora se necesitan entre 3 y 5 hombres por turno (de 8 horas). El precio de estas líneas de reciclaje puede variar considerablemente dependiendo de las toneladas tratadas por hora además del tamaño del grano; esto quiere decir, si la línea de fábrica quiere lanzar al mercado una gama de tamaños del grano. Se presentan algunos datos de producción:

1 ton/hr de llantas de carro y camiones produce:

590 kg/hr de granos de goma.

331 kg/hr de acero armónico.

167 kg/hr de polvo de llanta.

2,5 ton/hr de llantas de carro y camiones produce:

1475 kg/hr de granos de goma.

775 kg/hr de acero armónico.

217 kg/hr de polvo de llanta.

2 ton/hr de llantas de carro y camiones produce:

1770 kg/hr de granos de goma.

930 kg/hr de acero armónico.

279 kg/hr de polvo de llanta.

3 ton/hr de llantas de carro y camiones produce:

2360 kg/hr de granos de goma.

1240 kg/hr de acero armónico.

365 kg/hr de polvo de llanta.

En adición, en este tipo de procesos se obtienen fibras textiles las cuales se encuentran dentro de la llanta. Estas fibras se obtienen en menor cantidad que el acero armónico y en un porcentaje un poco mayor que el polvo de llanta.

Figura 15 Granos de diferentes granulometrías (entre 0,5 y 3 mm)



Fuente: Empresa Ingoqui

Figura 16 Polvo de llanta



Fuente: Empresa Ingoqui

Otra forma en la cual se puede producir polvo de llanta, como ya se mencionó previamente, es mediante un sistema criogénico en el cual se congelan los neumáticos para que se facilite su trituración y, por ende, la separación de sus componentes. Este sistema se ha utilizado especialmente en la provincia de Nueva Escocia, en Canadá, en donde el 100 % de sus llantas son recicladas mediante este proceso. Los costos son más altos que el de una planta de trituración convencional.

2.6. Pavimentos con polvo de llanta

Los pavimentos modificados con polvo de llanta ya han sido utilizados en países como México, Colombia, España y otros países desarrollados. En estos casos, los resultados han sido favorables en cuanto al desempeño del mismo; no obstante, en cuanto al factor económico, debido a los procesos de fabricación del polvo de llanta, el costo del pavimento se incrementa significativamente (cerca del 35% más caro). Si embargo de lo anterior, el beneficio del reciclaje de la llanta evita problemas ya determinados previamente como los estéticos, de contaminación y problemas de salud en los seres humanos; por lo que el costo adicional es compensado; adicionalmente, según algunos estudios realizados en España, estos pavimentos son mejores en filtrar el agua y producen carreteras más silenciosas.

El primer intento de crear un asfalto con polvo de llanta se dio en Norteamérica en el año 1982 en el estado de California. Este intento confirmó que se podría fabricar asfalto con el polvo de llanta. Sin embargo, es bastante reciente la consideración seria de esta posibilidad. En la actualidad, Gobiernos en todo el mundo han comenzado a implementar estos pavimentos.

En países desarrollados como Estados Unidos se están ya utilizando los llamados “asfaltos modificados con goma” los cuales contienen el polvo de llanta. Como se mencionó, este material tiene un mayor costo, pero según estudios realizados posee una vida útil mayor y aumenta su elasticidad ante cambios de temperatura; así es como en el estado de California se impuso como ordenanza la obligatoriedad de usar el 5 % de material proveniente del reciclaje de llantas para la pavimentación de nuevas vías o repavimentación. Como resultado de esta ordenanza se pavimentaron 25 carreteras con

un total de 1,7 millones de neumáticos reciclados en forma de polvo de llanta (CEMPRE, 1998).

En el mercado mexicano se encuentra polvo de llanta a un valor que ronda los 0,25 USD por kilo de producto. La demanda en ese país, en la actualidad, es alta debido a la incorporación de leyes que exigen el reciclado a los fabricantes de llantas o la incorporación de un porcentaje de polvo de llanta en la fabricación de asfalto.

Esta planta, además de fabricar el polvo de llanta en sus distintos tamaños, también planea la fabricación de objetos artesanales elaborados a partir de la materia reciclada. Según el Grupo Innovador del Caucho, las ganancias líquidas de esta planta serán de alrededor de 1500 USD por cada 10 toneladas procesadas (en esta cifra ya se ha tomado en cuenta la amortización de los equipos de la planta). El funcionamiento de esta planta ayudaría a cubrir la demanda que se daría en caso de que una nueva reforma legislativa fuera aprobada en el país tendiente a la construcción de carreteras con mayor vida útil y más silenciosas que las que actualmente existen.

2.7. Preparación de las muestras (probetas) de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla.

Este margen le da al laboratorio un 50 punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico. Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- 1) El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- 2) Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes precalentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de

compactación, el cual también es calentado para que no se enfríe la superficie de mezcla al golpearla.

3) Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos.

2.8. Procedimiento del ensayo Marshall

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

2.8.1. Determinación del peso específico total (AASHTO T 166)

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos.

2.8.2. Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla. El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1) Las probetas son calentadas en un baño agua a 60 °C (140 °F). esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.

2) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

3) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la biqueta puede resistir.

4) La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.8.3. Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador de cuadrante. Luego se suspende la carga una vez que se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor. Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

2.8.4. Valor de fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Las mezclas asfálticas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo cargas del tránsito.

2.8.5. Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y de fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

2.8.6. Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar.

El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua. Análisis de peso unitario El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³ (62.4 lb/ft³).

2.8.7. Análisis de VMA

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra” entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

Análisis de VFA Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje

2.9. Criterios de diseño normalizado

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

Tabla 14 Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de Partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C – 127 ASTM C – 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un período largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso Unitario y Vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: El instituto de asfalto

Tabla 15 Ensayos de laboratorio normalizados para asfaltos

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 60°. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de Reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en Tricloroetileno	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso específico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son: <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Fuente: El instituto de asfalto

2.9.1 Requisitos del agregado pétreo

Tabla 2.14 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles	35
Partículas alargadas y lajeadas, mínimo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 16 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12.5 mm (1/2 ")	19 mm (3/4 ")	25 mm (1 ")	37,5 mm (1 1/2 ")	50 mm (2 ")
50	2"	---	---	---	---	---
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90-100
25	1"	---	---	100	90-100	76-90
19	3/4"	---	100	90-100	79-92	66-83
12,5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	No.4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	No.10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	No.20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	No.40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	No.60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	No.100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	No.200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 17 Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento original	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ¹¹)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad,%, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Pérdida por calentamiento, % máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ¹¹), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cmm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

Fuente: SCT, 2005.

CAPITULO III

**CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO,
CEMENTO ASFÁLTICO Y RESIDUO DE
CAUCHO**

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO, CEMENTO ASFÁLTICO Y RESIDUO DE CAUCHO

3.1. Introducción

En los capítulos anteriores se trataron sobre el Método Marshall, los aspectos para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente y Mezcla Asfáltica con residuo de caucho en seco, así como las normas aplicables al diseño de la misma.

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el Diseño de la mezcla propuesta en el estudio, estas se las realizará a las muestras de material pétreo obtenidas en la comunidad de San Mateo, de igual manera se realizará los ensayos de laboratorio de suelos y asfaltos, por tal motivo, se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara. El capítulo está dividido principalmente en tres partes: la primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos (grava 3/4", gravilla 3/8", arena y filler), la segunda parte constituye al análisis del cemento asfáltico y finalmente se aborda la caracterización del residuo de caucho.

El procedimiento para el diseño esta propuesto por el manual de carreteras de la ABC.

3.2. Selección de materiales

3.2.1. Ubicación

El departamento de Tarija, se encuentra ubicado al sur de Bolivia, limita al norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con la Republica de Argentina, y al este con la República del Paraguay y al oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí.

Figura 17 ubicación del estudio



3.2.2. Obtención del material pétreo y cemento asfáltico

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; Además de tener una disponibilidad. El material pétreo, está situado en la comunidad de San Mateo, después llevado a una chancadora de “San Mateo” para la Institución de la secretaria de obras públicas de la alcaldía de Tarija de la Provincia Cercado.

Figura 18 Ubicación del banco de material



Fuente: Google.maps.com

Imagen 1 Recolección del material



Fuente: Elaboración propia

El ligante a utilizar es un asfalto Betupen plus 85-100 de precedencia brasilera (empresa STRATURA ASFALTOS) proporcionado por la institución SEDECA Tarija (Servicio Departamental de Caminos). La segunda etapa es realizada en Laboratorio de Asfaltos y Hormigones de la UAJMS.

3.2.3. Obtención del polvo de caucho reciclado

3.2.3.1. Material polvo de caucho

El polvo de neumático reciclado, es un material que se obtiene de plantas recicladoras de caucho en desuso, lo que dependiendo del tamaño de la planta recicladora lo convierte en un material viable de aplicar en la construcción de nuestros caminos o calles, porque este material se puede obtener en grandes cantidades.

INGOQUI, es una empresa boliviana, que se encuentra en la ciudad de Cochabamba-Bolivia dedicada a la reutilización de caucho proveniente de los neumáticos desechados, esta empresa recicla un aproximado de 150 neumáticos al día, su principal producción es de trapeadores hechos con este material, esta empresa está facilitando el “polvo de caucho reciclado” que será utilizado en este proyecto de investigación.

Figura 19 polvo de caucho producido por Ingoqui



Gránulo y polvo de caucho
de alta pureza

**COTIZA
AHORA**

Fuente: Empresa Ingoqui

3.2.1 Planteamiento de la investigación

Este capítulo describe el proceso de selección y preparación de cada uno de los componentes de la mezcla con cemento asfáltico que vamos a diseñar en esta investigación.

A continuación, están descritos cada uno de los ensayos de los agregados, cemento asfáltico y polvo de caucho, su procedencia, con imágenes gráficas y su comparativa con respecto a las normas y especificadores técnicas usadas.

3.3. Ensayos de caracterización de agregados.

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se asistió al Laboratorio de Suelos y Materiales del SEDECA donde se realizaron los ensayos de Granulometría, Peso Específico, Peso Unitario, Caras Fracturadas, Límites, Desgaste de los Ángeles y Equivalente de Arena.

3.3.1. Granulometría (AASHTO T – 27)

Primeramente, se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

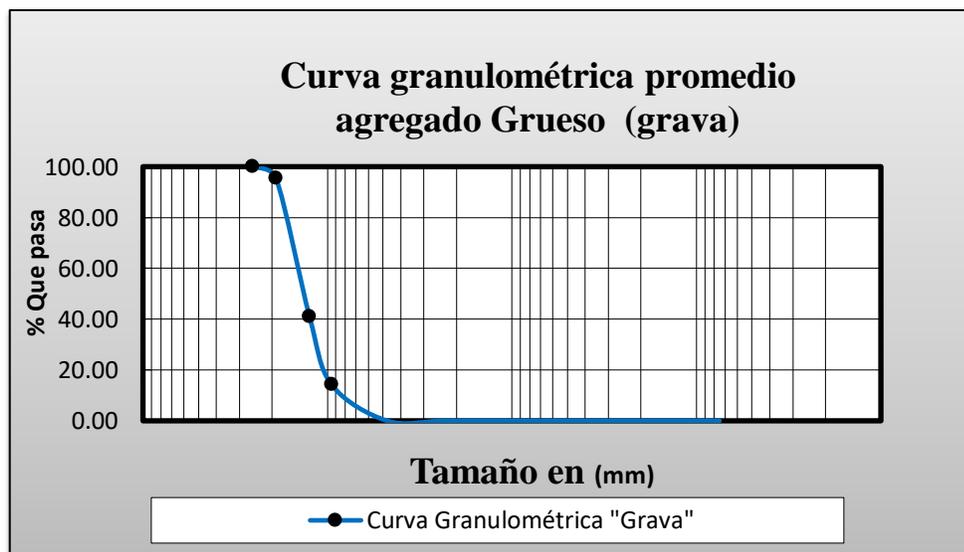
Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla.

Tabla 18 Granulometría grava

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	231.74	231.74	4.63	95.37
1/2"	12.50	2721.20	2952.94	59.06	40.94
3/8"	9.50	1334.27	4287.21	85.74	14.26
Nº4	4.75	712.80	5000.01	100.00	0.00
Nº8	2.36	0.00	5000.01	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.01	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.01	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.01	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.01	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.01	100.00	0.00
Base	-	0.00	5000.01	100.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20 Curva Granulométrica grava



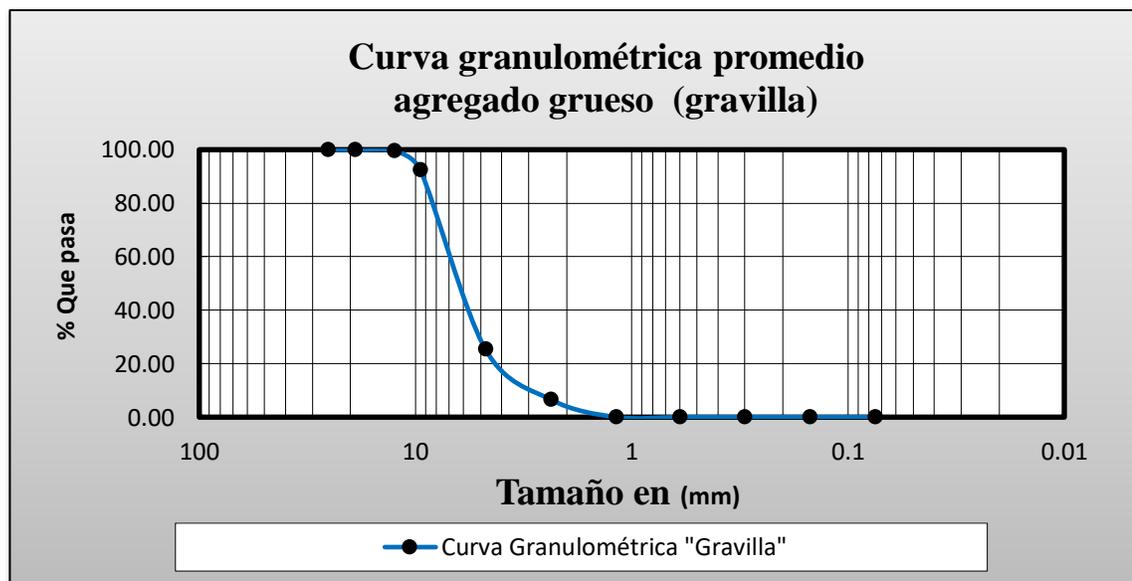
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19 Granulometría gravilla

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	24.80	24.80	0.50	99.50
3/8"	9.50	359.60	384.40	7.69	92.31
Nº4	4.75	3348.00	3732.40	74.65	25.35
Nº8	2.36	942.40	4674.80	93.50	6.50
Nº16	1.18	325.20	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
Base	-	0.00	5000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Figura 21 Curva granulométrica gravilla



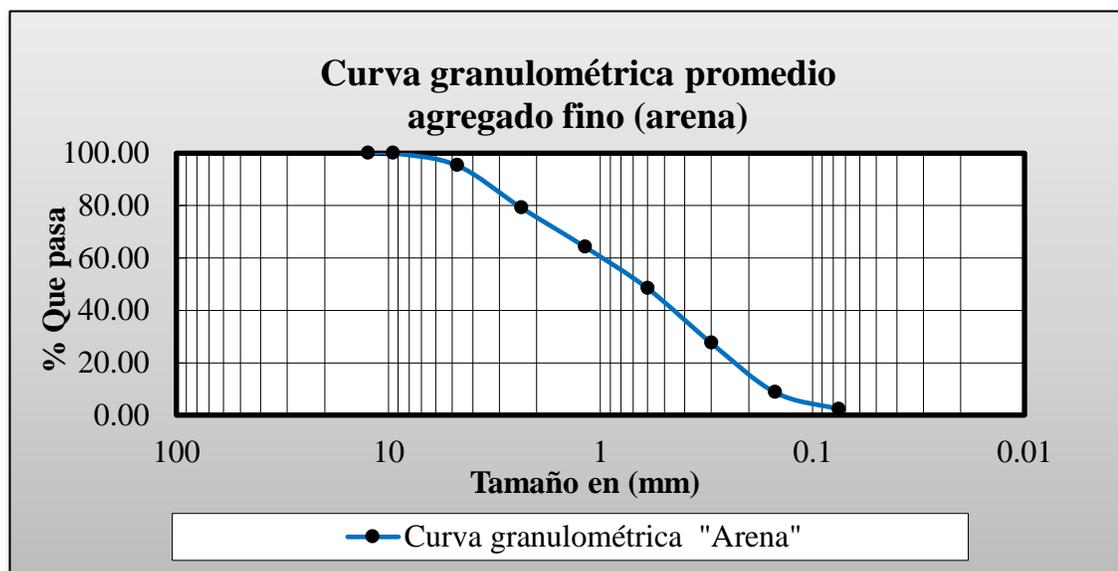
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20 Granulometría arena

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	231.60	231.60	4.63	95.37
Nº8	2.36	810.60	1042.20	20.84	79.16
Nº16	1.18	750.10	1792.30	35.85	64.15
Nº30	0.60	787.30	2579.60	51.59	48.41
Nº50	0.30	1045.70	3625.30	72.51	27.49
Nº100	0.15	941.20	4566.50	91.33	8.67
Nº200	0.075	321.10	4887.60	97.75	2.25
Base	-	112.40	5000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Figura 22 Curva granulométrica arena



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Peso específico (AASHTO T – 84)

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, en este caso al tener un tamaño nominal de 3/4 pulg, la muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100 o - 110 °C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas. Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (PEBS.S.S.) A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25 °C, La canastilla y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas. Se seca entonces la muestra en horno a 100 o - 110 °C, se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.

Tabla 21 Peso específico grava

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm3)	Peso específico saturado con Sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico aparente (gr/cm3)	% de absorción
1	2.56	2.59	2.65	1.35
2	2.56	2.59	2.65	1.28
Promedio	2.56	2.59	2.65	1.32

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22 Peso específico gravilla

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con Sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2.57	2.62	2.70	1.92
2	2.57	2.62	2.70	1.86
Promedio	2.57	2.62	2.70	1.89

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23 Peso específico arena

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con Sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2.48	2.56	2.68	2.82
2	2.54	2.61	2.72	2.52
Promedio	2.51	2.58	2.70	2.67

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3. Caras Fracturadas ASTM D-5821

El ensayo de caras fracturadas representa la relación de partículas del agregado grueso que tienen una o más caras fracturadas con relación al agregado total. El ensayo se realizó en instalaciones del SEDECA y el procedimiento que se realizó es la siguiente manera:

Para el agregado de 3/4":

- Se tamizó el agregado y se trabajó utilizando un tamaño máximo de partícula de 3/4".
- Se lavó el material para apreciar mejor las caras fracturadas.
- Se secó el material para pesar la totalidad de la muestra.
- Se separó el agregado que tiene caras fracturadas del canto rodado y se pesan los materiales separados, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 24 Caras fracturadas-grava

Ensayo	Lecturas	Promedio	Especificación	
Ensayo N°	1			
Peso total (grs.) (a)	5000.00			
Peso retenido tamiz no 8 (grs.) (b)	4654.30			
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	345.70			
% Caras fracturadas = (b/a) *100	93.09	93.1	>	75

Fuente: elaboración propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones. Para el agregado 3/8" se repite el mismo procedimiento para el agregado de 3/4" donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 25 Caras fracturadas-gravilla

Ensayo	Lecturas	Promedio	Especificación	
Ensayo N°	1			
Peso total (grs.) (a)	5000.00		5000.0	
Peso retenido tamiz No 8 (grs.) (b)	4789.30			
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	210.70			
% Caras Fracturadas = (b/a) *100	95.79	95.8	>	75

Fuente: elaboración propia

3.3.4. Desgaste de los Ángeles (AASHTO T – 96)

El ensayo de Desgaste de Los Ángeles determina el desgaste de los agregados para determinar su aplicabilidad en mezclas asfálticas, cuando son sometidos a los efectos del tráfico de vehículos. El procedimiento que se siguió para el desarrollo del ensayo fue el siguiente:

Para el material de 3/4" Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo "B". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/4" y pasante el de 1".

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/8" y pasante el de 1/2".

Introducir el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.

Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido. Se obtuvieron los siguientes resultados: Tabla 3.7: Desgaste de Los Ángeles, Material de 3/4”

Tabla 26 desgaste de los ángeles-grava

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación astm
B	5000	3453	30.94	35% Max

Fuente: Elaboración propia

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

Para el material de 3/8": Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo "C". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/2" y pasante el de 3/4".

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz #4 y pasante el de 3/8". Introducir el material combinado dentro del tambor con 8 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.

Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

Tabla 27 desgaste de los ángeles-gravilla

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación astm
C	5000	3857.8	22.84	35% Max

Fuente: elaboración propia

3.3.5. Equivalente de arena (AASHTO T – 176)

Con el ensayo de equivalente de arena se pretende determinar las proporciones de arena y arcilla presentes en el agregado fino para la elaboración de mezclas asfálticas u hormigones, para la realización del ensayo se ejecutó el siguiente procedimiento:

Se tamizo el material, separando las partículas que quedan retenidas en el tamiz #4 y trabajando solamente con el material pasante.

En una probeta, se vierten 4 pulgadas de solución (Cloruro de calcio combinado con agua destilada).

Se vertió una tara con una cantidad determinada de arena (aproximadamente 350 gr) tamizada en el #4.

Se dejó reposar 5 minutos, y posteriormente se agito vigorosamente durante 30 segundos, con la finalidad de que las partículas de arcilla sean suspendidas completamente en la solución.

Se agregó solución hasta completar las 15 pulgadas, haciendo que toda la arena pegada en las paredes y el corcho de goma, caigan hasta el fondo, se dejó reposar durante 20 minutos.

Después de observar una evidente separación entre el material fino y la arena, se leyeron los resultados en la escala graduada de la probeta en pulgadas y se repitió el mismo procedimiento 3 veces. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 28 Equivalente de Arena

No de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	14.60	10.50	71.92
2	14.50	11.00	75.86
3	13.20	10.60	80.30
		Promedio	76.03

Fuente: Elaboración propia

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

3.4. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico.

Por condiciones de disponibilidad con los equipos necesarios en el laboratorio de asfaltos de la UAJMS para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron los ensayos de: Viscosidad Saybolt Furol, Punto de Inflamación, Punto de Ablandamiento y Penetración.

3.4.1. Viscosidad Saybolt Furol (AASHTO T – 72)

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 135 0 C.

Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80°C y 100 °C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135°C). El calentado previo no debe exceder los 1.7°C (3°F) por encima de la temperatura de ensayo.

Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz N° 100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.

Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.

Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboco, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.

Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo (± 0.05 0 C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.

Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml del frasco receptor. Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29 Resultados Viscosidad Saybolt Furol

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	seg	269	226	271	255.33	85	-

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

3.4.2. Punto de inflamación (AASHTO T – 48)

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y la puerta para eliminar corrientes de aire.
- Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100°C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto

pueda verterse. Hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.

- La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14° a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5° a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 30 Resultados del punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	287	279	275	280.33	232	-

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

3.4.3. Penetración (AASHTO T – 49)

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes, se cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100°C al punto de ablandamiento, también con el objeto que, colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.
- Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperada. Se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.
- Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20° y 30° C durante un periodo aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.
- Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 0 C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.
- Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración se limpió con gasolina y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.
- La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la cara superior del asfalto.
- Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 31 Resultados Ensayo de Penetración

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97)							
Lectura N°1	0,1 mm	87	90	95	90	85	100
Lectura N°2	0,1 mm	90	97	91			
Lectura N°3	0,1 mm	92	85	86			
Penetración Promedio	0,1 mm	90	91	91			

Fuente: Elaboración propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas y concuerda con los datos proporcionados por el fabricante.

3.4.4. Ductilidad (AASHTO T – 51)

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se hizo calentar el cemento asfáltico hasta un punto que este manejable.
- Se preparó las probetas para colocar el asfalto
- Las probetas se recubrieron con una vaselina y maicena para evitar que el cemento se prenda en las paredes.
- Se llenó los moldes con mucho cuidado sin hacer rebalsar, evitando la inclusión de burbujas.
- Se dejó enfriar las probetas a temperatura ambiente durante 30 min. Y a continuación se introdujo los moldes ya preparados en el baño de agua a temperatura de 25°C durante 90 min.
- Se quita los moldes y se deja al descubierto las probetas y se da inicio al ensayo.

- El material asfáltico es estirado por las pinzas hasta formar un hilo produciendo la ruptura.

Tabla 32 Resultados Ensayo De Ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25° C AASHTO T-51	cm	107	100	100	102.333333	232	-

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Peso específico (AASHTO T – 228)

Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada y secándolo finalmente. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón. Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa.

El peso del picnómetro vacío. Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 0C. Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua.

Preparación de la muestra. - Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que

pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada. Verterlo una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro

Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retomar luego el vaso al baño de agua a 25°C.

Tabla 33 Resultados de ensayo de peso específico

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97)							
Peso Picnómetro	gr	35.3	35.7	34.1	1.033	1	1.05
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	88.1	85.2	84.2			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	64.5	62.9	61.8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	88.9	86	85.5			
Peso Específico Promedio	gr/cm ³	1.025	1.027	1.046			

Fuente: Elaboración Propia

3.4.6. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico

Tabla 34 caracterización del polvo de caucho reciclado

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones	
			Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97)				
Lectura N°1	0,1 mm	90	85	100
Lectura N°2	0,1 mm			
Lectura N°3	0,1 mm			
Penetración Promedio	0,1 mm			
Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97)				
Peso Picnómetro	gr	1.03	1	1.05
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr			
Peso Picnómetro + Muestra	gr			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr			
Peso Específico Promedio	gr/cm ³			
Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)	°C	280	232	-
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	47	42	53
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	102	100	-
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	sF	255.3	85	400

Fuente: Elaboración propia

3.5. Ensayos de caracterización del polvo de caucho reciclado

Especificaciones técnicas del residuo de caucho

El Residuo de caucho se obtiene de la trituración de neumáticos fuera de uso. Este residuo de caucho será empleado en reemplazo del agregado Características de los neumáticos:

Los neumáticos son estructuras toroidales muy completas elaboradas con más de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbón y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho. Las proporciones de estos componentes pueden diferir en función del fabricante y del tipo de neumático, aunque en general se aproximan a las que figuran en la tabla.

Tabla 35 Composición ponderal aproximada de los neumáticos de turismo y camión

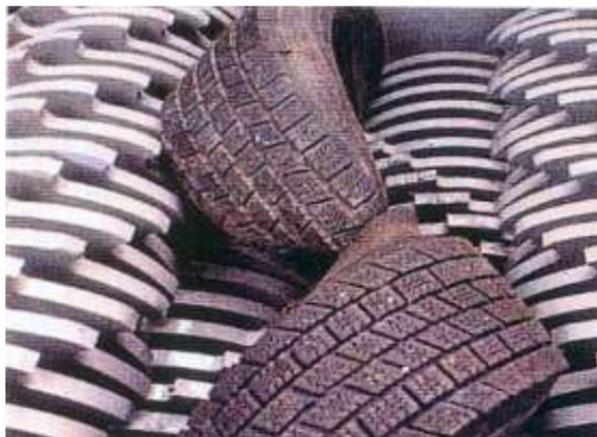
Material	Servicios	Camión
Caucho	48	45
Negro de Carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	--
Óxidos de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Fuente: CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de obras Publicas España)

Materiales y herramientas empleadas

El residuo de caucho se obtiene de la trituración de los neumáticos en desuso y para su trituración se emplea una máquina trituradora especial

Tabla 14 trituración de neumáticos



Fuente: Empresa Ingoqui

Para la caracterización del residuo de caucho solo se realizaron 3 ensayos

- Granulometría
- Peso específico
- Peso unitario

3.5.1. Granulometría (AASHTO T – 27)

Primeramente, se efectúa un muestreo para el residuo de caucho mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas. La muestra escogida de residuo de caucho se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra. Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100.

La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla.

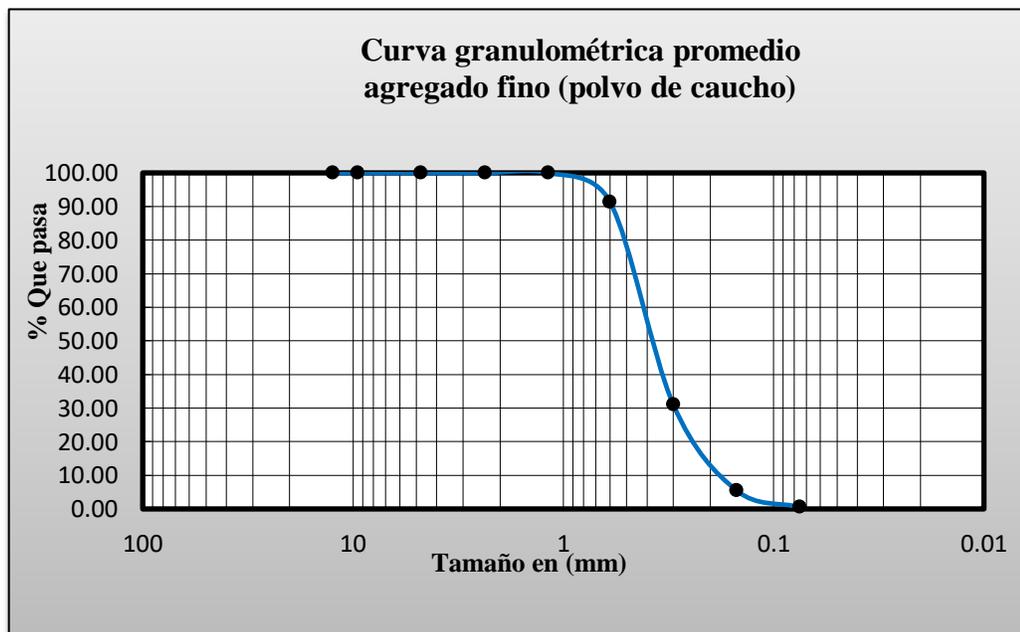
Tabla 36 Granulometría material fino (residuo de caucho)

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°8	2.36	0.00	0.00	0.00	100.00
N°16	1.18	0.00	0.00	0.00	100.00

N°30	0.60	431.00	431.00	8.62	91.38
N°50	0.30	3015.00	3446.00	68.92	31.08
N°100	0.15	1279.00	4725.00	94.50	5.50
N°200	0.075	249.00	4974.00	99.48	0.52
BASE	-	26.00	5000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 23 Curva granulométrica "polvo de caucho"



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV
DISEÑO, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS
DE RESULTADOS

CAPITULO IV

DISEÑO, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Descripción de la investigación

Para conocer y analizar posteriormente la incidencia de agregar porcentajes de Polvo de caucho (llantas en desuso) en mezclas asfálticas y cuál es el efecto en ellas se realizó el siguiente procedimiento:

Se realizaron 5 diferentes procedimientos de metodología Marshall para mezclas asfálticas, la primera de manera convencional y las siguientes fueron modificadas añadiendo porcentajes de 1%, 2%, 3% y 4% de polvo de Caucho (llantas en desuso).

Para la selección del porcentaje de residuo de caucho de determino que fuera del 1% al 4% debido al volumen que este tiene, la buena trabajabilidad y adherencia del mismo en la mezcla asfáltica.

Además, que también se tomó en cuenta las recomendaciones hechas por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Publicas España) donde en España después de muchos ensayos realizados, aplican la adición del residuo de caucho por vía seca al 2% en reemplazo del agregado.

4.2. Procedimiento Marshall convencional

Para poder realizar nuestra mezcla asfáltica utilizamos la siguiente dosificación a partir de la cual pudimos determinar los pesos que se necesitaran para las mezclas con 1%, 2%, 3% y 4% con residuo de caucho en reemplazo del agregado.

4.2.1. Contenido mínimo de cemento asfáltico

Primeramente, se debe calcular un contenido de asfalto mínimo a partir de los datos de granulometría y características de nuestro material

4.2.1.1. Método basado en la distribución de tamaño de la partícula

$$P = 0,0020 a + 0,045 b + c * d$$

Donde:

P = Contenido mínimo de cemento asfáltico

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

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

c = Porcentaje que pasa la malla N°200

d = Coef. Asfáltico según el tipo de material

Figura 24 contenido mínimo de Cemento Asfáltico

Método basado en la distribución de tamaño de partículas		
$P = 0,020*a + 0,045*b + c*d$		
a	66.17	Porcentaje de material retenido en la malla N°10
b	29.93	Porcentaje que pasa malla N°10 y se retiene en N°200
c	3.90	Porcentaje que pasa la malla N°200
d	0.35	Coefficiente asfáltico según el tipo de material
P		4.04

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se reduce 0.5% y avanza de 0.5% para obtener los 6 valores que nos genere la curva para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico.

4.2.2. Contenido óptimo de cemento asfáltico

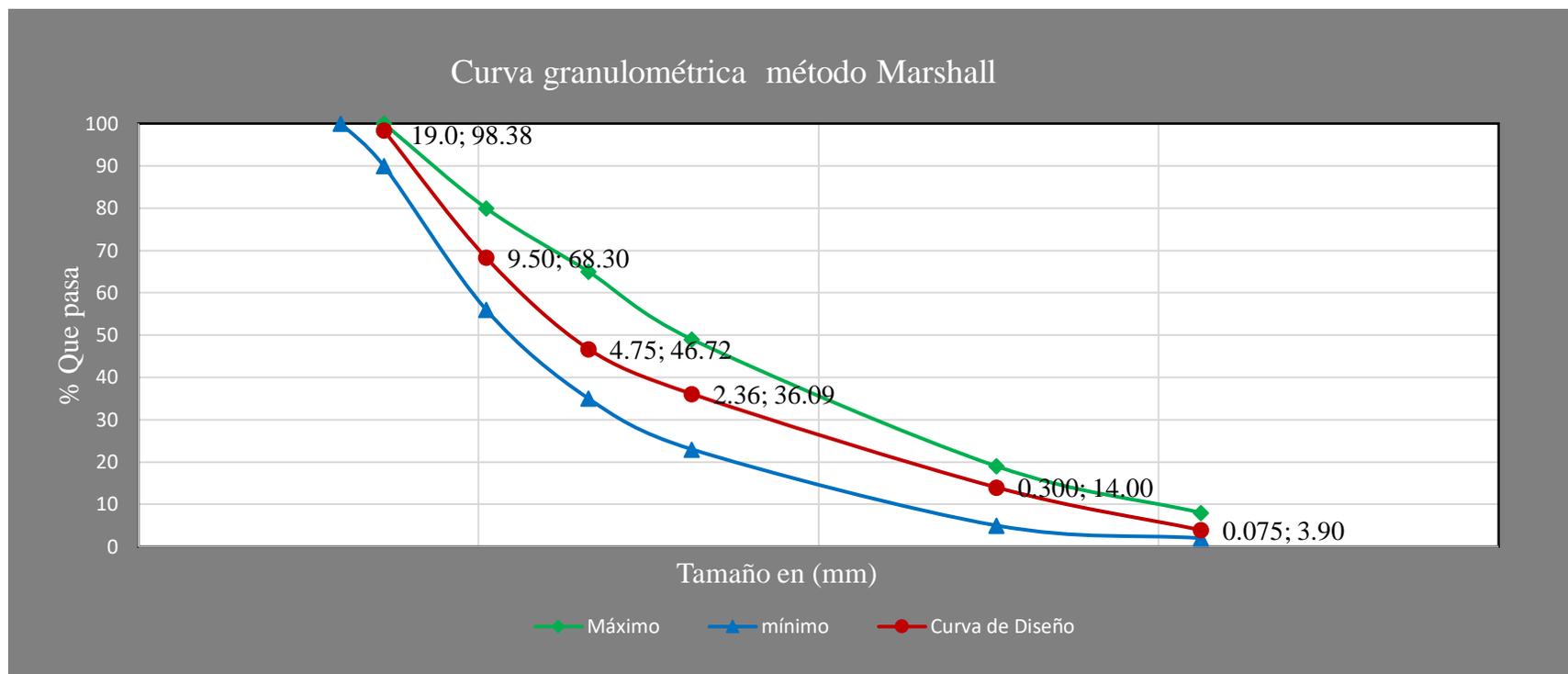
4.2.2.1. Diseño de la mezcla asfáltica convencional

Tabla 37 Diseño granulométrico convencional método Marshall ASTM D 3515

Tamices	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
	Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
	35.00	22.00	40.00	3.00	100.00					
1"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	81.11	0.00	0.00	0.00	81.11	81.11	1.62	98.38	90	100
1/2"	952.42	5.46	0.00	0.00	957.88	1038.99	20.78	79.22	-	-
3/8"	466.99	79.11	0.00	0.00	546.11	1585.09	31.70	68.30	56	80
Nº4	249.48	736.56	92.64	0.00	1078.68	2663.77	53.28	46.72	35	65
Nº8	0.00	207.33	324.24	0.00	531.57	3195.34	63.91	36.09	23	49
Nº16	0.00	71.54	300.04	0.00	371.58	3566.92	71.34	28.66	-	-
Nº30	0.00	0.00	314.92	0.00	314.92	3881.84	77.64	22.36	-	-
Nº50	0.00	0.00	418.28	0.00	418.28	4300.12	86.00	14.00	5	19
Nº100	0.00	0.00	376.48	0.00	376.48	4676.60	93.53	6.47	-	-
Nº200	0.00	0.00	128.44	0.00	128.44	4805.04	96.10	3.90	2	8
BASE	0.00	0.00	44.96	150.00	194.96	5000.00	100.00	0.00	-	-
	1750.00	1100.00	2000.00	150.00	5000.0					

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38 Curva granulométrica método Marshall convencional



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39 dosificación para contenido mínimo de cemento asfáltico

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava (%)	35
Ponderación de Gravilla (%)	22
Ponderación de Arena (%)	40
Ponderación de Polvo N. (%)	0
Ponderación de Filler (%)	3

Porcentaje de Briqueta	100%
Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%
Porcentaje de Agregado	Y=100 - X

Nombre de las briquetas	1s	2s	3s	4s	5s	6s
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3.54%	4.04%	4.54%	5.04%	5.54%	6.04%
Porcentaje de Agregado (%)	96.46%	95.96%	95.46%	94.96%	94.46%	93.96%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	42.48	48.48	54.48	60.48	66.48	72.48
Peso de Grava (gr)	405.13	403.03	400.93	398.83	396.73	394.63
Peso de Gravilla (gr)	254.65	253.33	252.01	250.69	249.37	248.05
Peso de Arena (gr)	463.01	460.61	458.21	455.81	453.41	451.01
Peso de Polvo de Neumático (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso de Filler (gr)	34.73	34.55	34.37	34.19	34.01	33.83
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: elaboración propia

Una vez realizadas las briquetas se llevaron estas a la prensa Marshall para determinar: peso específico total, análisis de la densidad, contenido de vacíos de las briquetas, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall. A continuación, se detalla el diseño de la mezcla asfáltica con residuo de caucho y el proceso completo del ensayo hasta la prensa Marshall:

Paso 1: Para realizar nuestra mezcla asfáltica lo que debemos hacer primero es pesar el agregado de acuerdo a nuestra dosificación por cada tamiz y porcentaje de cemento asfáltico que se empleara e introducir la muestra al horno para que al momento de dosificar tenga la misma temperatura que el cemento asfáltico. El residuo de caucho también se lo debe pesar de acuerdo al porcentaje (1%,2%,3% y 4%) que se empleara en la mezcla asfáltica.

Imagen 2 Preparación de material granular para elaboración de briquetas



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3 Pesado de cemento asfáltico en taras



Fuente: Elaboración Propia

Paso 2: Una vez listo el material de debe alistar los equipos e instrumentos que se emplearan, en este caso se necesita los anillos que estén limpio y calientes, el martillo también tiene que estar caliente en la base para la compactación de las briquetas.

Paso 3: Teniendo el material y equipo listo se debe proceder a la dosificación de la mezcla. En un recipiente añadir el residuo de caucho y ponerlo a fuego lento para que adquiera temperatura, paralelamente se pesa el agregado con el cemento asfáltico y se lo añade al recipiente del caucho. Se debe mezclar con la ayuda de una cuchara hasta se obtenga una buena adherencia en la mezcla, controlando que la temperatura que no suba de los 170 °C.

Imagen 4 Calentado simultaneo de material granular y cemento asfaltico



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 5 Calentado de cemento asfaltico



Fuente: Elaboración Propia

Paso 4: Una vez que se obtenga la mezcla se lo debe vaciar dentro del molde y pueda ser compactado. La compactación se lo realiza introduciendo la mezcla en el anillo el cual debe ser cubierto por un papel filtro para que la mezcla no se adhiera al martillo, los golpes que se darán son 75 por cara.

Imagen 6 Vertido de cemento asfáltico al material granular (160°C)



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 7 Engrasado de moldes previo vertido de material



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 8 Vaciado de material en moldes



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 9 Colocado de briquetas al compactador mecánico



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 10 Volteo de briquetas



Fuente: Elaboración Propia

Paso 5: Para el desmoldado de las briquetas se lo realiza con la ayuda de una prensa tipo gata y se debe esperar que este repose 2 horas mínimo.

Imagen 11 Desmoldeado de briquetas mediante gato hidráulico



Fuente: Elaboración Propia

Paso 6: A las 24 horas de haber sido compactadas las briquetas y antes de introducir las briquetas al equipo Marshall estas deben ser procesadas, se las debe medir, limpiar y pesar, posteriormente se las debe introducir en un recipiente con agua a 25°C durante 10 minutos.

Pasado los 10 minutos las briquetas se las debe pesar sumergidas y secas superficialmente, realizado estos pasos se lo introduce nuevamente las briquetas en agua a 60°C durante media hora para ser llevadas al equipo Marshall

Imagen 12 Sumergido de Briquetas en agua a temperatura deseada



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 13 Colocado de briquetas en la mordaza Marshall



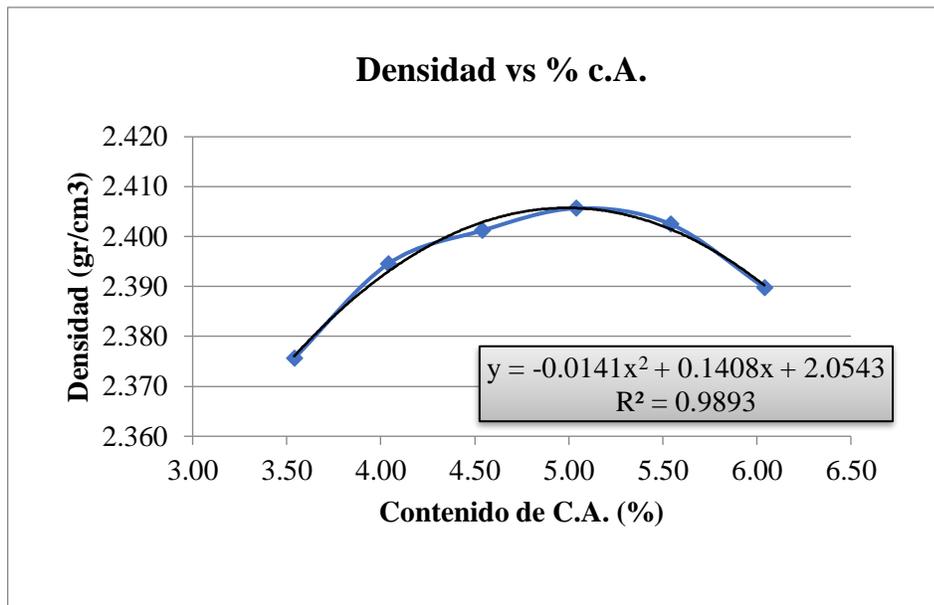
Fuente: Elaboración Propia

4.2.2.2. Resultados de la mezcla asfáltica convencional

Tabla 40 Planilla Marshall para mezcla asfáltica convencional

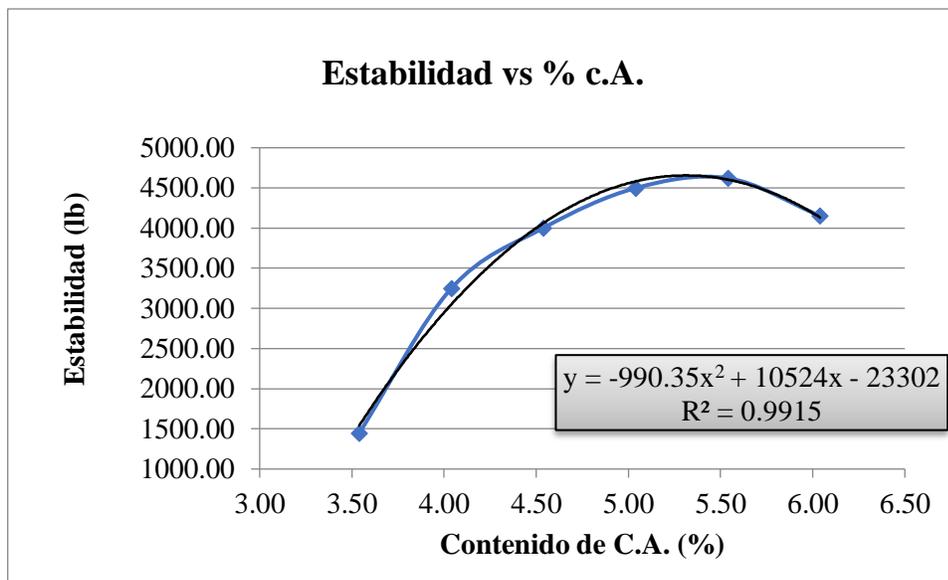
Granulometría			P. Específico	% agregado		Tipo de cemento asfáltico: convencional							85/100		Agregado			P.E.	%	
Mat. Ret Tamiz N° 4			2.67	53.28		Número de golpes por cara							75		Grava			2.65	35	
Mat. Pasa Tamiz N° 4			2.70	46.72		Temperatura de mezclado (°C)							160		Gravilla			2.70	22	
Peso Específico Total			2.68	100		peso específico del ligante (gr/cm3)							1.033		Arena			2.70	40	
															Filler			2.72	3	
N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	3.54	3.67	6.50	1145.6	1147.9	655	492.9	2.32	2.38	2.54	6.30	14.45	56.36	596	1586.69	0.96	1527.19	1448.50	13	13.00
2			6.60	1151.9	1153.5	680	473.5	2.43						600	1597.46	0.94	1506.72		15	
3			6.40	1146.1	1148.6	665	483.6	2.37						500	1328.18	0.99	1311.58		11	
4	4.04	4.21	6.26	1158.8	1159.9	675	484.9	2.39	2.39	2.51	4.79	14.15	66.17	1150	3078.50	1.02	3152.38	3249.82	14	14.00
5			6.33	1167.5	1168.3	679	489.3	2.39						1180	3159.28	1.01	3175.08		15	
6			6.12	1144.9	1145.5	670	475.5	2.41						1200	3213.14	1.07	3421.99		13	
7	4.54	4.76	6.16	1164.2	1165.1	675	490.1	2.38	2.40	2.49	3.74	14.29	73.83	1270	3401.63	1.05	3581.92	4002.12	15	15.67
8			6.05	1142.6	1143.1	669	474.1	2.41						1380	3697.84	1.09	4019.56		16	
9			6.07	1151.3	1152.1	676	476.1	2.42						1520	4074.83	1.08	4404.90		16	
10	5.04	5.31	6.00	1135.6	1136.2	662	474.2	2.39	2.41	2.47	2.77	14.51	80.89	1560	4182.55	1.10	4613.35	4498.08	17	17.33
11			6.13	1142.1	1143.3	671	472.3	2.42						1450	3886.34	1.06	4127.29		20	
12			5.96	1128.7	1129.5	660	469.5	2.40						1590	4263.33	1.12	4753.61		15	
13	5.54	5.86	6.05	1150.6	1151.7	668	483.7	2.38	2.40	2.45	2.10	14.99	85.97	1465	3926.73	1.09	4268.36	4621.25	21	18.67
14			5.58	1058.7	1059.9	628	431.9	2.45						1580	4236.40	1.24	5265.85		17	
15			6.06	1145.5	1146.8	665	481.8	2.38						1490	3994.05	1.08	4329.55		18	
16	6.04	6.43	6.17	1135.0	1136.2	668	468.2	2.42	2.39	2.43	1.82	15.79	88.48	1460	3913.27	1.05	4105.02	4152.91	18	20.33
17			6.04	1127.9	1128.9	665	463.9	2.43						1420	3805.55	1.09	4148.05		22	
18			5.94	1108.8	1109.2	630	479.2	2.31						1400	3751.70	1.12	4205.65		21	
ESPECIFICACIONES			Mínimo						3	13	75						1800		8	
			Máximo						5	-	82						-		16	

Figura 25 Curva Densidad vs % de Asfalto



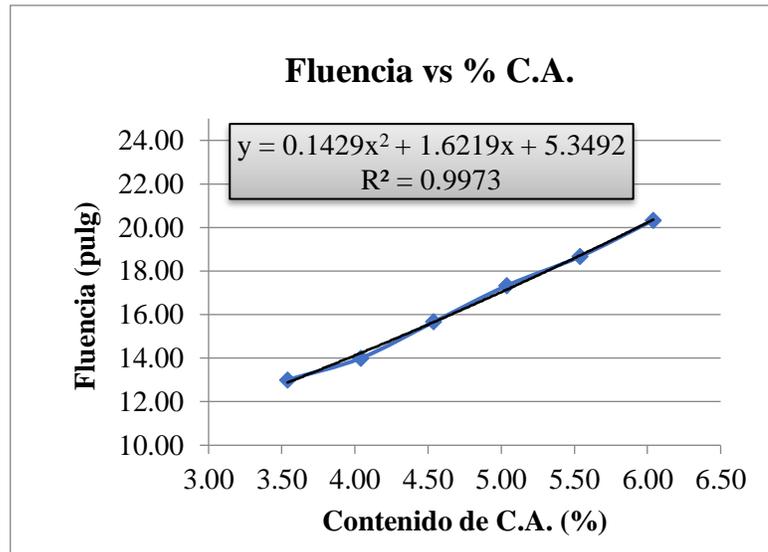
Fuente: Elaboración Propia

Figura 26 Curva Estabilidad vs % Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

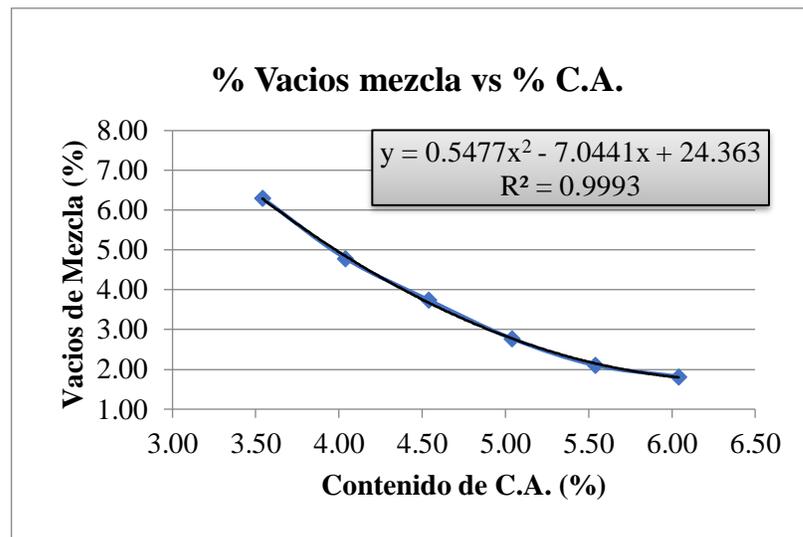
Figura 27 Flujo vs % Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

De la figura el Flujo (fluencia) es proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el Flujo.

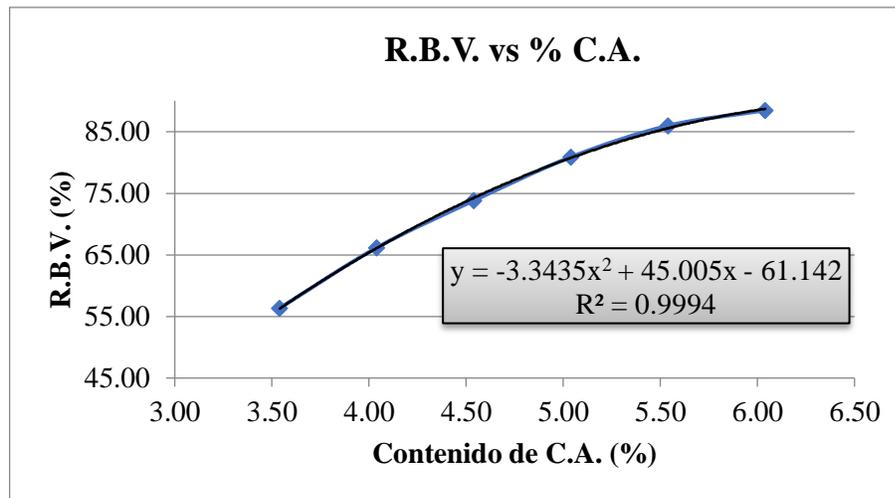
Figura 28 Curva Vacíos vs % Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

De la figura se observa que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, existiría menos Vacíos en la carpeta Asfáltica.

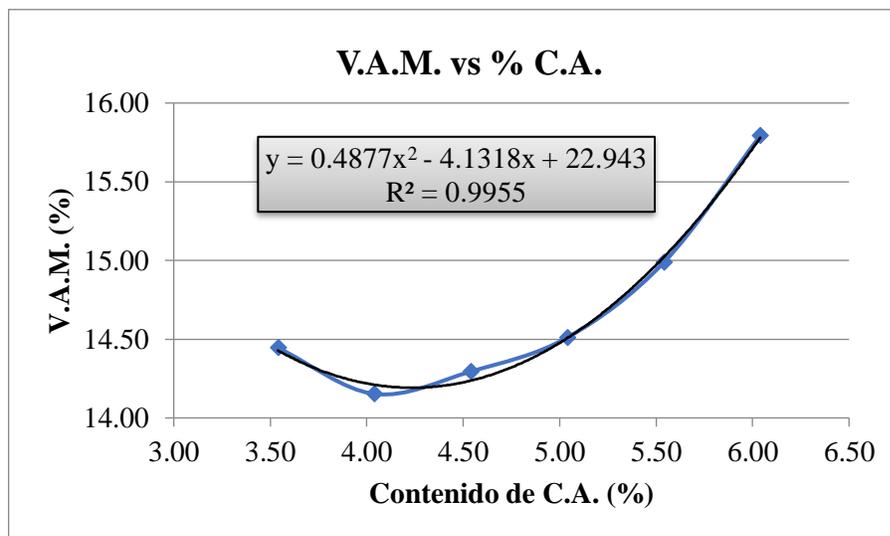
Figura 29 Curva % de RBV vs % Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

De la figura él % RBV (relación betún - vacíos) es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el % de RBV.

Figura 30 Curva vacíos agregado mineral vs % Asfalto



Fuente: Elaboración Propia

De la figura los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los incrementos de % de Asfalto. En este caso el Porcentaje Optimo de Asfalto expresa un valor intermedio de Vacíos de Agregado Mineral.

4.2.2.2. Valor del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

El resultado del valor del Porcentaje Optimo de Cemento Asfáltico, viene establecido por el promedio de los valores máximos de C.A. de las gráficas de:

- Estabilidad Marshall (Lb) vs % C.A.
- Densidad máxima (gr/cm³) vs % C.A.
- Vacíos de la mezcla (%) vs % C.A.

De las gráficas se obtienen ecuaciones polinómicas de las cuales despejamos el máximo contenido de C.A. obteniendo:

Tabla 41 Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	4656.44	5.31
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.41	4.99
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.90
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.07

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Procedimiento Marshall a briquetas con adición de polvo de caucho

Para la fabricación de briquetas con adición de polvo de caucho, se sigue el mismo método convencional Marshall, pero se incorpora el polvo de neumático reciclado vía seca, siguiendo la puesta en obra:

4.3.0. Metodología de puesta en obra de mezclas asfálticas modificadas con adición de polvo de caucho reciclado

La mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho reciclado, solo se diferencia con la convencional en el proceso de fabricación en planta.

A continuación, se desarrollará el proceso de fabricación de mezcla asfáltica modificada según MULTINSA, que es una empresa colombiana que se describe a sí misma como:

Desarrolladores de productos innovadores y biodegradables para limpieza del hogar, la industria, y asfaltos. que ofrece entre sus servicios el asfaltado modificado con caucho



El asfalto con polvo o grano de caucho reciclado es un producto innovador para la construcción de vías, pues permite fortalecer las propiedades del asfalto otorgándole ventajas como:

Mayor resistencia al envejecimiento.

Mejor resistencia a la deformación permanente de los pavimentos.

Disminución en los niveles de ruido generados por la fricción de las llantas.

Aumenta la resistencia cohesiva del ligante asfáltico en la mezcla.

Menor susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas y menor tendencia al stripping.

Además, se soluciona una problemática ambiental a través de la recuperación de las llantas vehiculares en desuso para su transformación en polvo de caucho y posterior uso en la mezcla asfáltica. Este tipo de asfalto se le conoce como Asfalto Modificado con Grano de Caucho Reciclado.

¿Cómo se hace el asfalto modificado con polvo de caucho?

Existen dos maneras básicas de emplear las llantas trituradas libres de acero y textiles en los asfaltos modificados: por vía seca o húmeda.

Vía seca

Principalmente, se trituran las llantas en desuso hasta transformarlas en polvo de caucho.

Después, se mezcla el polvo de caucho con la fracción fina del agregado pétreo.

Luego, se produce el calentamiento de la mezcla.

Finalmente, se mezclan los agregados de polvo de caucho con el asfalto.

El asfalto modificado queda listo para su transportación.

Vía húmeda

Principalmente, se trituran las llantas en desuso hasta transformarlas en polvo de caucho.

Posteriormente, se realiza la mezcla del grano de caucho con asfalto.

Se deposita la mezcla en una tolva con agregados pétreos.

Inicia el proceso de calentamiento de los agregados.

Finaliza con la obtención del asfalto con grano de caucho y agregados pétreos.

El asfalto está listo para su despacho.

Durante la transformación del asfalto por vía húmeda, agregamos un aditivo químico que garantiza la compatibilidad del grano de caucho y sus componentes con el asfalto, logrando:

Estabilidad al almacenamiento.

Mayor resistencia al envejecimiento, ahuellamiento, la fatiga y la humedad.

Disminución de temperaturas de mezcla y compactación.

Ahorros energéticos durante la producción.

Facilidad de manejo y transportación al no requerir vehículos especiales.

Con la implementación de esta tecnología en los asfaltos, impulsamos un desarrollo vial más sostenible posibilitando el ahorro de energía, aprovechamiento de las llantas en desuso y menor consumo de materia prima importada para su producción.

4.3.0.1. Puesta en obra de mezclas bituminosas

La correcta puesta en obra de las mezclas bituminosas es fundamental para el posterior comportamiento del firme ante las cargas del tráfico. Y es que una mala puesta en obra, es tan perjudicial (o incluso más) que un mal diseño de la mezcla. Es por ello que debemos realizar estas labores con especial cuidado.

La puesta en obra de mezclas bituminosas conlleva las siguientes operaciones:

1#Preparación de la superficie existente

La correcta puesta en obra de mezclas bituminosas conlleva una serie de operaciones previas encaminadas a la preparación de la superficie existente, sobre la que se extenderá la mezcla. Estas labores previas son especialmente importantes en las operaciones de refuerzo de carreteras antiguas, en las que el perfil geométrico puede tener desperfectos y cuya corrección puede no ser posible con la extensión de una única capa.

En firmes de nueva construcción, lo primero es realizar un barrido enérgico de la superficie para eliminar la suciedad, aplicando posteriormente un riego de imprimación o adherencia (según sea la capa inferior de naturaleza granular o bituminosa). Es fundamental en este último caso eliminar aquellas zonas con un exceso de ligante (exudaciones).

En aquellos casos en los que queremos reforzar un pavimento envejecido o agrietado, es recomendable fresar previamente dicha superficie.

2#Transporte

La mezcla se transporta ya fabricada desde la central directamente a la obra. Para ello se utilizan camiones volquete de caja metálica basculante. La caja debe estar completamente limpia (para evitar posibles contaminaciones con otras sustancias) y ligeramente humedecida con agua jabonosa para evitar que se adhiera a las paredes de la caja.

La parte superior del camión debe ir cubierta por una lona para evitar que puedan entrar sustancias externas, así como para evitar la pérdida excesiva de calor de la mezcla y pérdida así su trabajabilidad.

La mezcla debe llegar a obra suficientemente caliente. Es por esto que el tiempo de transporte no puede ser excesivo. Lo que más influye en el enfriamiento de la mezcla es la temperatura ambiente y el viento. Por ello, las distancias de transporte variarán en función del clima, siendo de apenas unos kilómetros en tiempo muy frío a más de 100 kilómetros en verano.

Una vez el camión ha llegado a obra, hay dos situaciones relacionadas con la temperatura que pueden hacer que tengamos que rechazar la mezcla recibida:

a) Si la temperatura de la mezcla es superior a 180°C, es posible que, durante su fabricación, el ligante haya alcanzado una temperatura excesiva, lo que conlleva un riesgo de oxidación o envejecimiento prematuro.

b) Si la temperatura de la mezcla es inferior a 135°C, no va a ser posible compactarla adecuadamente.

Otro aspecto importante que debemos vigilar durante el transporte, son las segregaciones que pueden producirse durante la carga y descarga. Por ello, estas maniobras deben realizarse desde la menor altura posible.

También hay que evitar la formación de montones de forma cónica durante la carga del camión. Por ello es conveniente que durante la carga el camión vaya desplazándose lentamente y si es necesario, ayudar manualmente a su correcta distribución.

3#Extendido

El extendido de las mezclas bituminosas se realiza normalmente con extendedoras. Cuando el camión llega de la fábrica, se aproxima marcha atrás hacia la extendedora hasta tocar su parte delantera, basculando entonces la caja para verter la mezcla sobre la tolva de recepción.

Una vez está la mezcla en la extendedora, varios dispositivos transportan el material a la parte trasera de la misma, regulando el paso de la cantidad necesaria de mezcla. A continuación, es distribuida transversalmente a través de unos husillos helicoidales que además realizan un remezclado para corregir cualquier pequeña segregación que pudiera haberse producido.

Finalmente, la mezcla es puesta en obra a través de un pisón vertical denominado “tamper” que la precompacta en todo el ancho de la extensión. El acabado definitivo es efectuado por la “regla vibrante” que se apoya sobre la mezcla recién extendida. Dicha regla va vibrando, aumentando la precompactación proporcionada por el tamper.

El control geométrico se consigue por medio de un “palpador” que va recorriendo un hilo previamente nivelado en los extremos de la calzada. En zonas urbanas, puede utilizarse como referencia el bordillo.

La velocidad de extensión debe ajustarse al ritmo de suministro de la mezcla desde la fábrica, debiendo mantenerse una velocidad constante a lo largo de todo el proceso.

4#Compactación

La compactación es otra de las etapas clave dentro de la puesta en obra de mezclas bituminosas. El objetivo de la compactación no es otro que la mezcla alcance la densidad fijada en el proyecto, y que suele ser aproximadamente igual al 95-98% de la obtenida en el Ensayo Marshall. La compactación ha de ser uniforme en toda la superficie.

Para cumplir estos dos requisitos, la temperatura de la mezcla en el momento de ponerla en obra debe ser elevada (superior a 120°C) pero no mucho más, porque podrían darse arrollamientos al paso de los compactadores.

La compactación se realiza con “trenes de compactación” que consiste en una sucesión de máquinas que circulan sobre la zona a compactar.

En la compactación de mezclas bituminosas tipo AC (Asphalt Concrete) en espesores normales de 7-12 cm, la secuencia más habitual es la siguiente:

Una o dos pasadas de un compactador de rodillo liso sin vibración, para asentar la capa

Tres o cuatro pasadas de ese mismo rodillo metálico, pero ahora con vibración (la frecuencia de vibrado en la compactación de MB es diferente a la empleada en la compactación de suelos).

Cinco o seis pasadas de compactadores de neumáticos con una alta presión de inflado y mayor peso.

Una o dos pasadas de un rodillo metálico liso sin vibración, exclusivamente para corregir las posibles imperfecciones causadas al paso del compactador de neumáticos.

Nota: Los rodillos metálicos son regados con agua jabonosa para impedir que el betún pueda adherirse a ellos. En el caso de los compactadores de neumáticos, será suficiente con que los neumáticos se calienten, algo que ocurre al poco de empezar a compactar. En tiempo frío y para mantener dicho calor, es habitual emplear faldones o lonas que protegen a los neumáticos de las temperaturas del exterior.

Como puedes ver la puesta en obra de mezclas bituminosas sigue una serie de etapas que han de llevarse a cabo con suma precisión, ya que tan importante es la calidad de los materiales empleados, como la forma de ponerlos en obra. Una mala ejecución afectará notablemente a la durabilidad del firme, lo que implicará sin duda un elevado coste de conservación y en el peor de los casos, la necesidad de reposición total de las capas afectadas.

4.3.1. Dosificación de briquetas modificadas con la adición de polvo de caucho.

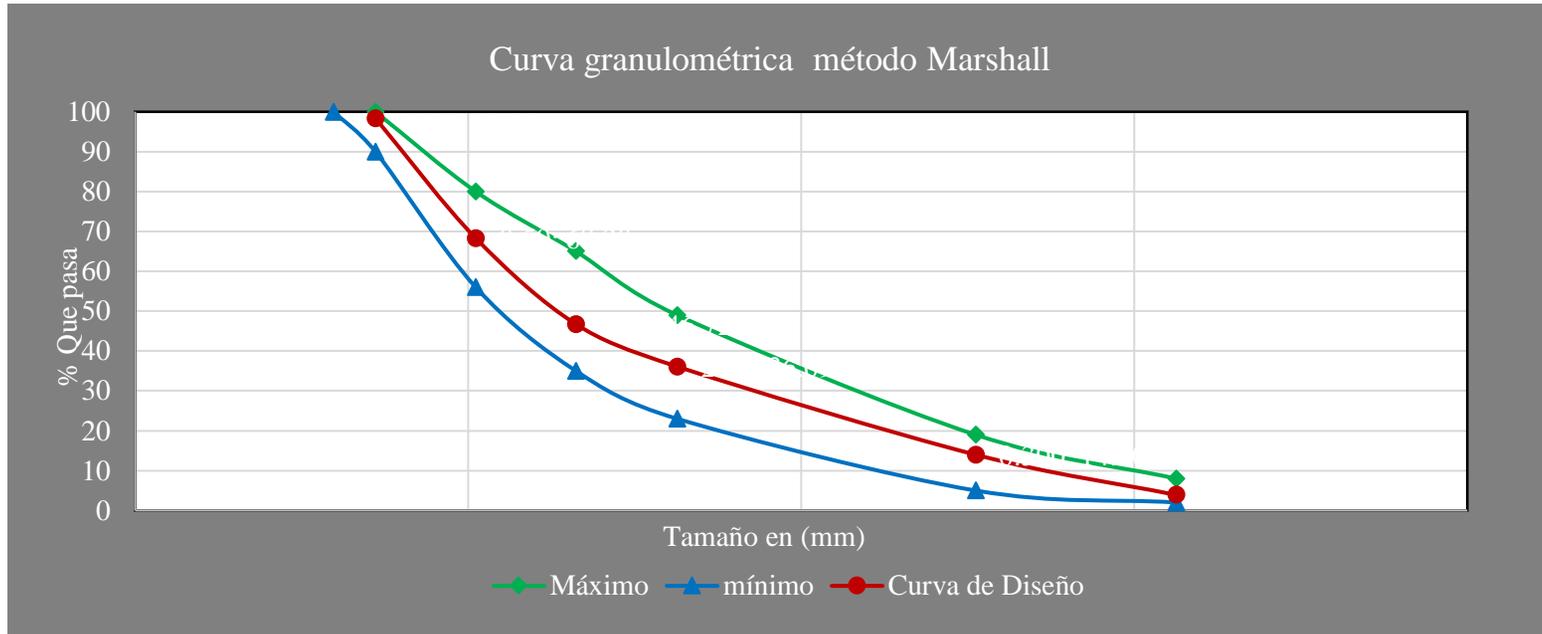
4.3.1.1. Diseño Granulométrico

Tabla 42 diseño granulométrico con polvo de caucho método Marshall ASTM D 3515

Tamices	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
	(%)	(%)	(%)	(%)					Mínimo	Máximo
	35.00	22.00	40.00	3.00	100.00					
1"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	81.11	0.00	0.00	0.00	81.11	81.11	1.62	98.38	90	100
1/2"	952.42	5.46	0.00	0.00	957.88	1038.99	20.78	79.22	-	-
3/8"	466.99	79.11	0.00	0.00	546.11	1585.09	31.70	68.30	56	80
Nº4	249.48	736.56	92.64	0.00	1078.68	2663.77	53.28	46.72	35	65
Nº8	0.00	207.33	324.24	0.00	531.57	3195.34	63.91	36.09	23	49
Nº16	0.00	71.54	300.04	0.00	371.58	3566.92	71.34	28.66	-	-
Nº30	0.00	0.00	314.92	0.00	314.92	3881.84	77.64	22.36	-	-
Nº50	0.00	0.00	418.28	0.00	418.28	4300.12	86.00	14.00	5	19
Nº100	0.00	0.00	376.48	0.00	376.48	4676.60	93.53	6.47	-	-
Nº200	0.00	0.00	128.44	0.00	128.44	4805.04	96.10	3.90	2	8
BASE	0.00	0.00	44.96	150.00	194.96	5000.00	100.00	0.00	-	-
	1750.00	1100.00	2000.00	150.00	5000.0					

Fuente: Elaboración Propia

Figura 32 Curva granulométrica método Marshall convencional



Fuente: Elaboración Propia

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava (%)	35
Ponderación de Gravilla (%)	22
Ponderación de Filler (%)	3

Porcentaje de Briqueta	100%
Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%
Porcentaje de Agregado	Y=100 - X

Tabla 43 Dosificaciones de briquetas para polvo de caucho al 1%

Nombre de las briquetas	11	12	13	14	15	16
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3.54%	4.04%	4.54%	5.04%	5.54%	6.04%
Porcentaje de Polvo de Neumático (%)	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
Porcentaje de Agregado (%)	95.46%	94.96%	94.46%	93.96%	93.46%	92.96%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	42.48	48.48	54.48	60.48	66.48	72.48
Peso de Grava (gr)	400.93	398.83	396.73	394.63	392.53	390.43
Peso de Gravilla (gr)	252.01	250.69	249.37	248.05	246.73	245.41
Peso de Arena (gr)	458.21	455.81	453.41	451.01	448.61	446.21
Peso de Polvo de Neumático (gr)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Peso de Filler (gr)	34.37	34.19	34.01	33.83	33.65	33.47
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 44 Dosificaciones de briquetas para polvo de caucho al 2%

Nombre de las briquetas	21	22	23	24	25	26
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3.54%	4.04%	4.54%	5.04%	5.54%	6.04%
Porcentaje de Polvo de Neumático (%)	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
Porcentaje de Agregado (%)	94.46%	93.96%	93.46%	92.96%	92.46%	91.96%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	42.48	48.48	54.48	60.48	66.48	72.48
Peso de Grava (gr)	396.73	394.63	392.53	390.43	388.33	386.23
Peso de Gravilla (gr)	249.37	248.05	246.73	245.41	244.09	242.77
Peso de Arena (gr)	453.41	451.01	448.61	446.21	443.81	441.41
Peso de Polvo de Neumático (gr)	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
Peso de Filler (gr)	34.01	33.83	33.65	33.47	33.29	33.11
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45 Dosificaciones de briquetas para polvo de caucho al 3%

Nombre de las briquetas	31	32	33	34	35	36
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3.54%	4.04%	4.54%	5.04%	5.54%	6.04%
Porcentaje de Polvo de Neumático (%)	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%
Porcentaje de Agregado (%)	93.46%	92.96%	92.46%	91.96%	91.46%	90.96%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	42.48	48.48	54.48	60.48	66.48	72.48
Peso de Grava (gr)	392.53	390.43	388.33	386.23	384.13	382.03
Peso de Gravilla (gr)	246.73	245.41	244.09	242.77	241.45	240.13
Peso de Arena (gr)	448.61	446.21	443.81	441.41	439.01	436.61
Peso de Polvo de Neumático (gr)	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00
Peso de Filler (gr)	33.65	33.47	33.29	33.11	32.93	32.75
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 46 Dosificaciones de briquetas para polvo de caucho al 4%

Nombre de las briquetas	41	42	43	44	45	46
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3.54%	4.04%	4.54%	5.04%	5.54%	6.04%
Porcentaje de Polvo de Neumático (%)	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%
Porcentaje de Agregado (%)	92.46%	91.96%	91.46%	90.96%	90.46%	89.96%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	42.48	48.48	54.48	60.48	66.48	72.48
Peso de Grava (gr)	388.33	386.23	384.13	382.03	379.93	377.83
Peso de Gravilla (gr)	244.09	242.77	241.45	240.13	238.81	237.49
Peso de Arena (gr)	443.81	441.41	439.01	436.61	434.21	431.81
Peso de Polvo de Neumático (gr)	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00
Peso de Filler (gr)	33.29	33.11	32.93	32.75	32.57	32.39
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 14 Mezclado de materiales en la elaboración de briquetas



Fuente: Elaboración Propia

A momento de calentar y mezclar los materiales con polvo de caucho y cemento asfáltico, a partir del 1% de polvo de caucho, se empiezan a desprender vapores en forma de humo blanco que provoca dificultad de respirar; y a partir del 3% de polvo de caucho también empiezan a doler los ojos, Para ello se utilizó equipo protección como máscara filtro y gafas de protección.

Imagen 15 Equipo de protección respiratoria



Fuente: Elaboración Propia

Las briquetas modificadas a partir del 6% de polvo de caucho deben ser manejadas cuidadosamente, debido a que presentan una estructura muy débil

Imagen 16 briqueta al 4% de polvo de caucho que se fracturo en el manejo



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 17 briquetas elaboradas con la Adición de Polvo de Caucho



Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Resultados de la mezcla asfáltica convencional

Tipo de cemento asfáltico: convencional	85/100
Número de golpes por cara	75
Temperatura de mezclado (°C)	160
Peso específico del ligante aashto t-229 (gr/cm ³)	1.03

Material	P.E.	%
Cemento Asfáltico	1.033	5.24
Grava	2.65	35
Gravilla	2.70	22
Arena	2.70	40
Filler	2.72	3
Polvo de Caucho	1.01	1 - 4

Granulometría Formada	P. Específico	% agregado
Mat. Retenido Tamiz No 4	2.67	53.05

Tabla 47 Planilla Marshall para briquetas modificadas con 1% de polvo de caucho

No de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia		
	polvo de caucho	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación bitumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
	%	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	1.00	3.54	4.76	6.70	1145.8	1146.9	656	491.1	2.33	2.34	2.49	6.29	14.30	56.03	427	1131.6	0.92	1043.9	1062.4	14	14.00	
2				6.80	1152.1	1153.2	662	491.1	2.35						431	1142.4	0.90			1025.3		16
3				6.60	1146.3	1147.4	656	491.1	2.33						447	1185.5	0.94			1118.1		12
4	1.00	4.04	5.31	6.46	1159.0	1160.1	668	492.1	2.36	2.352	2.47	4.96	14.16	64.97	981	2623.4	0.97	2551.3	2639.1	15	15.00	
5				6.53	1167.7	1168.8	678	491.1	2.38						1011	2704.2	0.96			2586.0		16
6				6.32	1145.1	1146.2	653	493.2	2.32						1031	2758.1	1.01			2780.1		14
7	1.00	4.54	5.86	6.36	1164.4	1165.5	680	485.5	2.40	2.357	2.45	3.97	14.33	72.29	1101	2946.6	1.00	2939.2	3321.8	16	16.67	
8				6.25	1142.8	1143.9	653	491.1	2.33						1211	3242.8	1.03			3330.3		17
9				6.27	1151.5	1152.6	662	491.1	2.34						1351	3619.8	1.02			3695.8		17
10	1.00	5.04	6.43	6.20	1135.8	1136.9	652	484.9	2.34	2.357	2.43	3.16	14.66	78.43	1391	3727.5	1.04	3876.6	3778.4	18	18.33	
11				6.33	1145.0	1146.1	660	486.1	2.36						1281	3431.3	1.01			3448.4		21
12				6.16	1130.0	1131.1	655	476.1	2.37						1421	3808.2	1.05			4010.1		16

13	1.00	5.54	7.00	6.25	1150.8	1151.9	655	496.9	2.32	2.35	2.41	2.68	15.28	82.48	1296	3471.6	1.03	3565.4	3707.3	22	19.67
14				6.20	1140.0	1141.1	655	486.1	2.35						1411	3781.3	1.04	3932.6		18	
15				6.26	1151.0	1152.1	670	482.1	2.39						1321	3539.0	1.02	3623.9		19	
16	1.00	6.04	7.57	6.10	1135.2	1136.3	655	481.1	2.36	2.34	2.39	2.42	16.08	84.98	1291	3458.2	1.07	3703.7	3412.6	19	21.33
17				6.24	1128.1	1129.2	648	481.1	2.34						1105	2957.3	1.03	3043.1		23	
18				6.14	1109.0	1110.1	629	481.1	2.31						1231	3296.6	1.06	3491.1		22	
ESPECIFICACIONES				mínimo								3	13	75	1800				8		
				máximo								5	-	82	-				16		

Fuente: Elaboración Propia

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3850.94	5.29
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.36	4.77
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.47
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	4.84

Curvas Marshall para el contenido óptimo de cemento asfáltico en briquetas modificadas con 1% de polvo de caucho

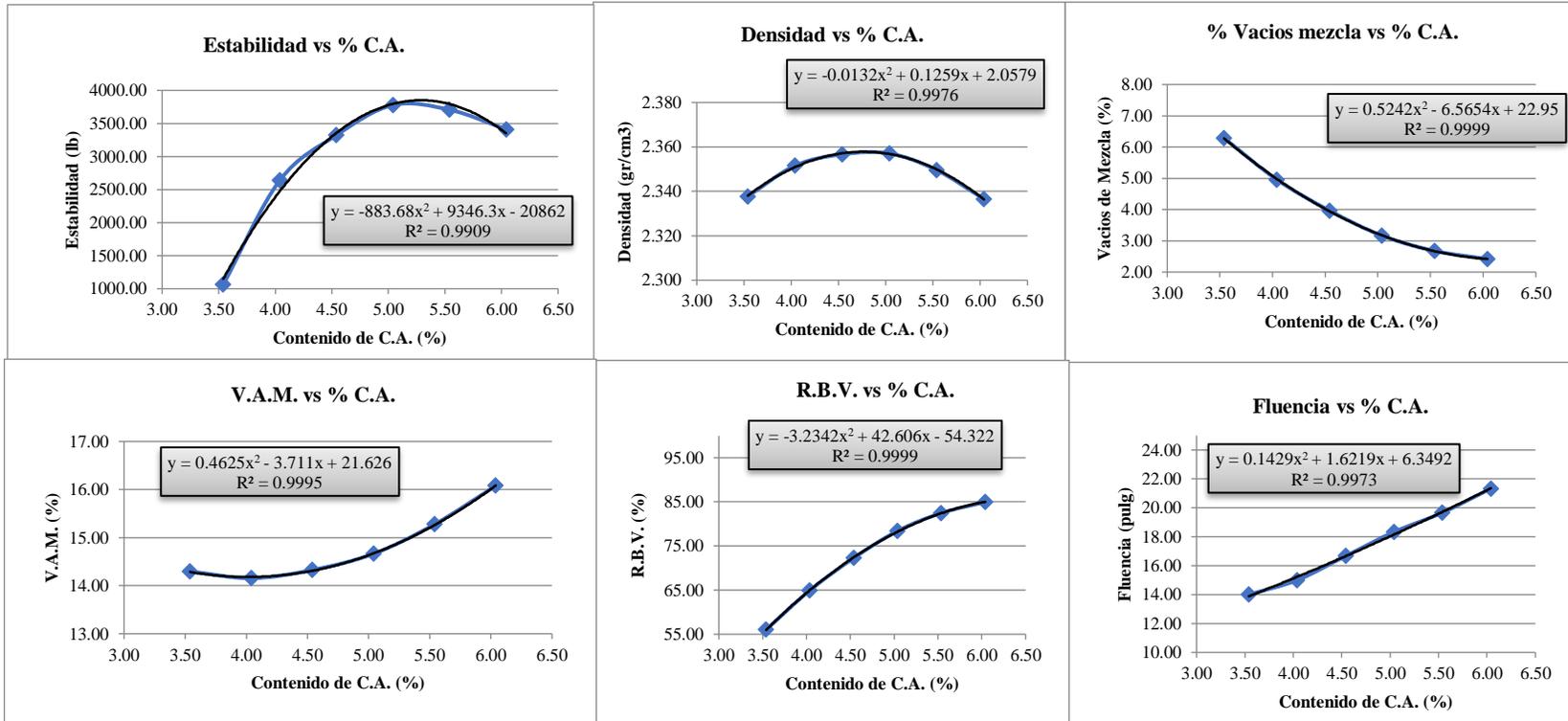
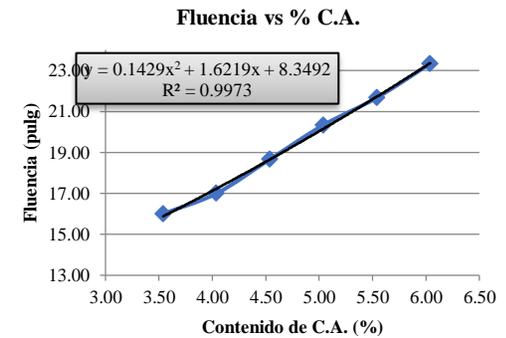
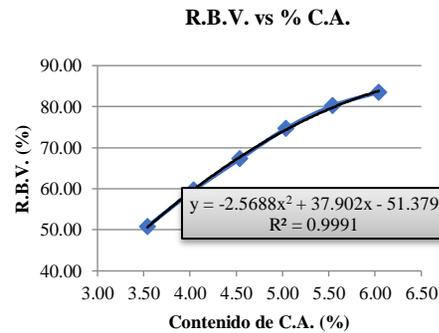
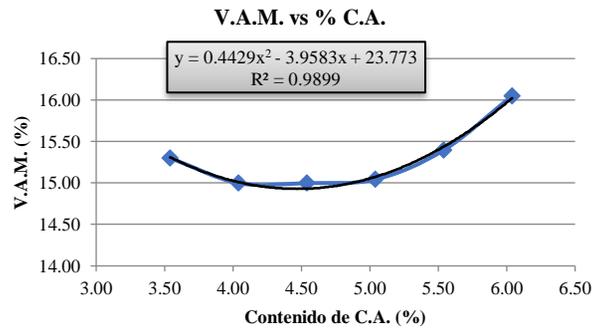
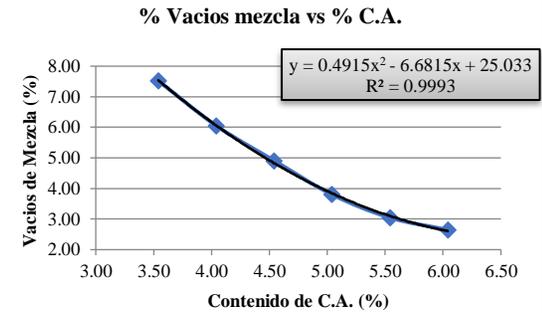
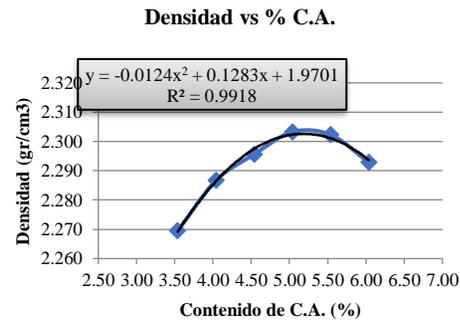
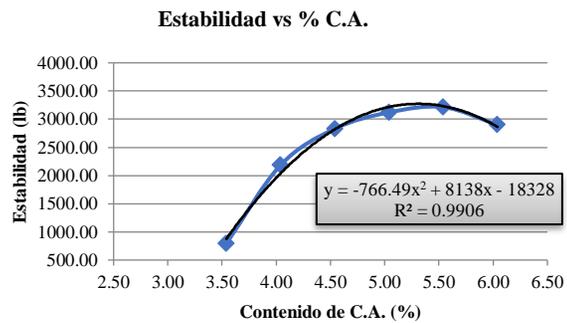


Tabla 48 Planilla Marshall para briquetas modificadas con 2% de polvo de caucho

N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volume n	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	polvo de caucho	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	2.00	3.54	5.86	6.74	1146.0	1147.1	645	502.3	2.28	2.27	2.45	7.52	15.30	50.83	322	848.9	0.9	774.6	794.2	16	16.00
2				6.84	1152.3	1153.4	640	513.4	2.24						326	859.6	0.9	763.4		18	
3				6.64	1146.5	1147.6	645	502.3	2.28						342	902.7	0.9	844.7		14	
4	2.00	4.04	6.43	6.50	1159.2	1160.3	658	502.3	2.31	2.29	2.43	6.06	15.00	59.63	780	2082.2	1.0	2004.1	2185.0	17	17.00
5				6.57	1167.9	1169.0	655	514.0	2.27						870	2324.5	0.9	2205.5		18	
6				6.36	1145.3	1146.4	644	502.3	2.28						880	2351.4	1.0	2345.6		16	
7	2.00	4.54	7.00	6.40	1164.6	1165.7	663	502.3	2.32	2.30	2.41	4.91	15.00	67.27	966	2583.0	1.0	2550.7	2831.7	18	18.67
8				6.29	1143.0	1144.1	642	502.3	2.28						1026	2744.6	1.0	2788.5		19	
9				6.31	1151.7	1152.8	651	502.3	2.29						1166	3121.6	1.0	3155.9		19	
10	2.00	5.04	7.57	6.24	1136.0	1137.1	640	497.1	2.29	2.30	2.39	3.80	15.04	74.71	1156	3094.7	1.0	3184.4	3120.8	20	20.33
11				6.37	1149.0	1150.1	660	490.1	2.34						1080	2890.0	1.0	2875.6		23	
12				6.20	1129.1	1130.2	635	495.2	2.28						1186	3175.4	1.0	3302.5		18	

13				6.29	1151.0	1152.1	655	497.1	2.32							1158	3100.0	1.0	3149.6		24	
14	2.00	5.54	8.15	6.29	1150.0	1151.1	650	501.1	2.29	2.30	2.37	3.05	15.40	80.20	1210	3240.1	1.0	3291.9	3214.0	20	21.67	
15				6.30	1145.9	1147.0	648	499.0	2.30						1180	3159.3	1.0	3200.4		21		
16				6.41	1135.4	1136.5	640	496.5	2.29						1106	2960.0	1.0	2915.6		21		
17	2.00	6.04	8.74	6.28	1128.3	1129.4	635	494.4	2.28	2.29	2.36	2.64	16.05	83.52	1066	2852.3	1.0	2906.5	2901.4	25	23.33	
18				6.18	1109.2	1110.3	630	480.3	2.31						1030	2755.4	1.0	2882.1		24		
Especificaciones				mínimo									3	13	75	1800				8		
				máximo									5	-	82	-				16		



Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3272.75	5.31
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.30	5.17
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.91
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.13

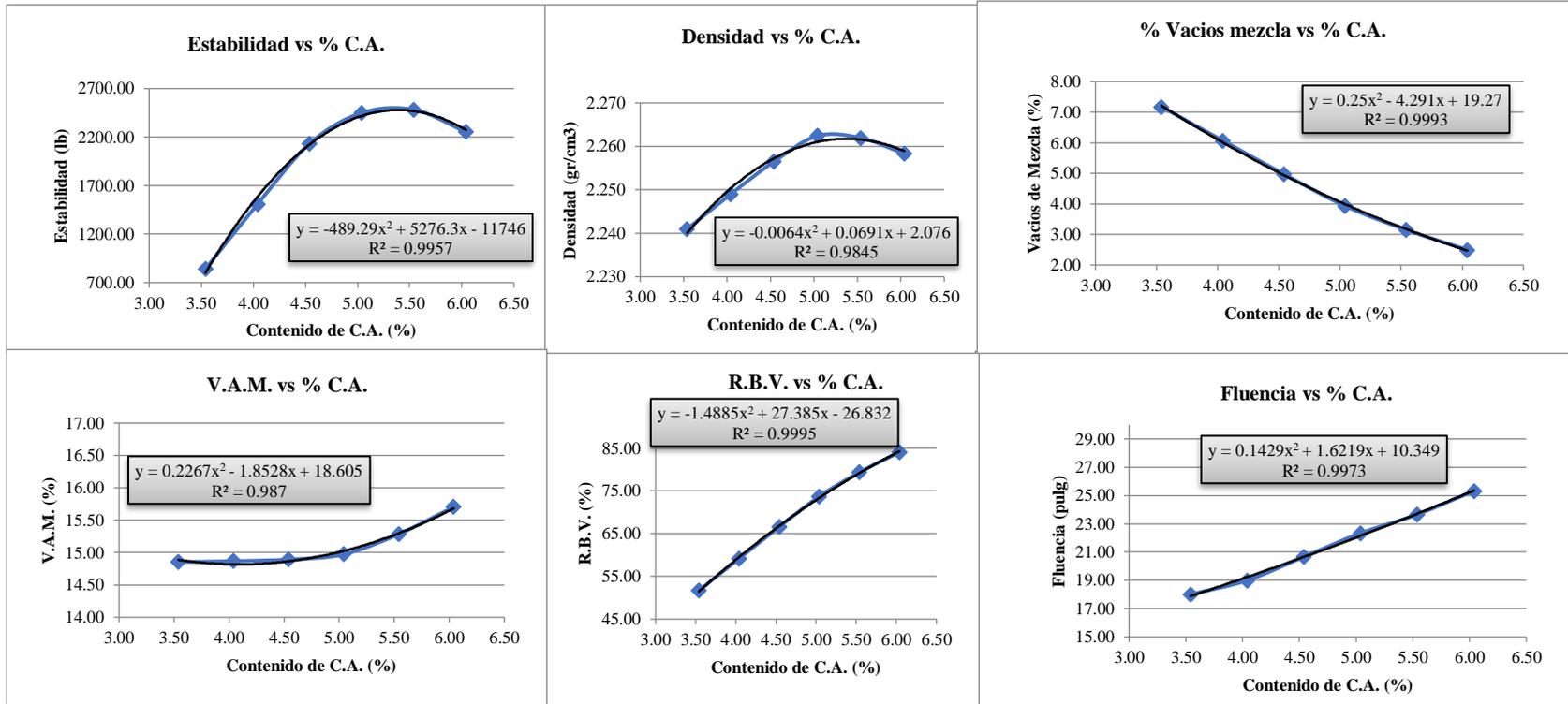
Tabla 49 Planilla Marshall para briquetas modificadas con 3% de polvo de caucho

N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia			
	Polvo de caucho	Base mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	3.0	3.54	7.00	6.78	1146.2	1147.3	632	515.3	2.22	2.24	2.41	7.17	14.85	51.70	355	937.7	0.90	846.3	840.4	18	18.00	
2				6.88	1152.5	1153.6	643	511.1	2.25						320	843.5	0.88	742.8		20		
3				6.68	1146.7	1147.8	637	511.1	2.24						380	1005.0	0.93	932.2		16		
4	3.0	4.04	7.57	6.54	1159.4	1160.5	641	519.5	2.23	2.25	2.39	6.07	14.87	59.16	563	1497.8	0.95	1429.5	1509.2	19	19.00	
5				6.61	1168.1	1169.2	655	514.2	2.27						593	1578.6	0.94	1485.9		20		

6				6.40	1145.5	1146.6	636	510.6	2.24						613	1632.5	0.99	1612.1		18		
7	3.0	4.54	8.15	6.44	1164.8	1165.9	655	511.1	2.28	2.26	2.37	4.98	14.89	66.59	683	1821.0	0.98	1780.0	2134.0	20	20.67	
8				6.33	1143.2	1144.3	633	511.1	2.24						793	2117.2	1.01	2127.8		21		
9				6.35	1151.9	1153.0	642	511.1	2.25						933	2494.2	1.00	2494.2		21		
10	3.0	5.04	8.74	6.28	1136.2	1137.3	631	506.3	2.24	2.26	2.36	3.93	14.97	73.72	973	2601.9	1.02	2651.3	2449.5	22	22.33	
11				6.41	1142.7	1143.8	644	499.8	2.29						855	2284.1	0.99	2249.9		25		
12				6.24	1129.3	1130.4	630	500.4	2.26						890	2378.4	1.03	2447.3		20		
13	3.0	5.54	9.34	6.33	1151.2	1152.3	641	511.1	2.25	2.26	2.34	3.15	15.29	79.36	878	2346.1	1.01	2357.8	2482.5	26	23.67	
14				6.33	1151.2	1152.3	645	507.3	2.27						993	2655.7	1.01	2669.0		22		
15				6.34	1146.1	1147.2	641	506.2	2.26						903	2413.4	1.00	2420.6		23		
16	3.0	6.04	9.94	6.45	1135.6	1136.7	635	501.7	2.26	2.26	2.32	2.50	15.70	84.09	873	2332.6	0.98	2274.3	2254.7	23	25.33	
17				6.32	1128.5	1129.6	628	501.6	2.25						833	2224.9	1.01	2242.7		27		
18				6.22	1109.4	1110.5	620	490.5	2.26						813	2171.0	1.04	2247.0		26		
Especificaciones				mínimo									3	13	75					1800		8
				máximo									5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración Propia

Curvas Marshall para el contenido óptimo de cemento asfáltico en briquetas modificadas con 3% de polvo de caucho



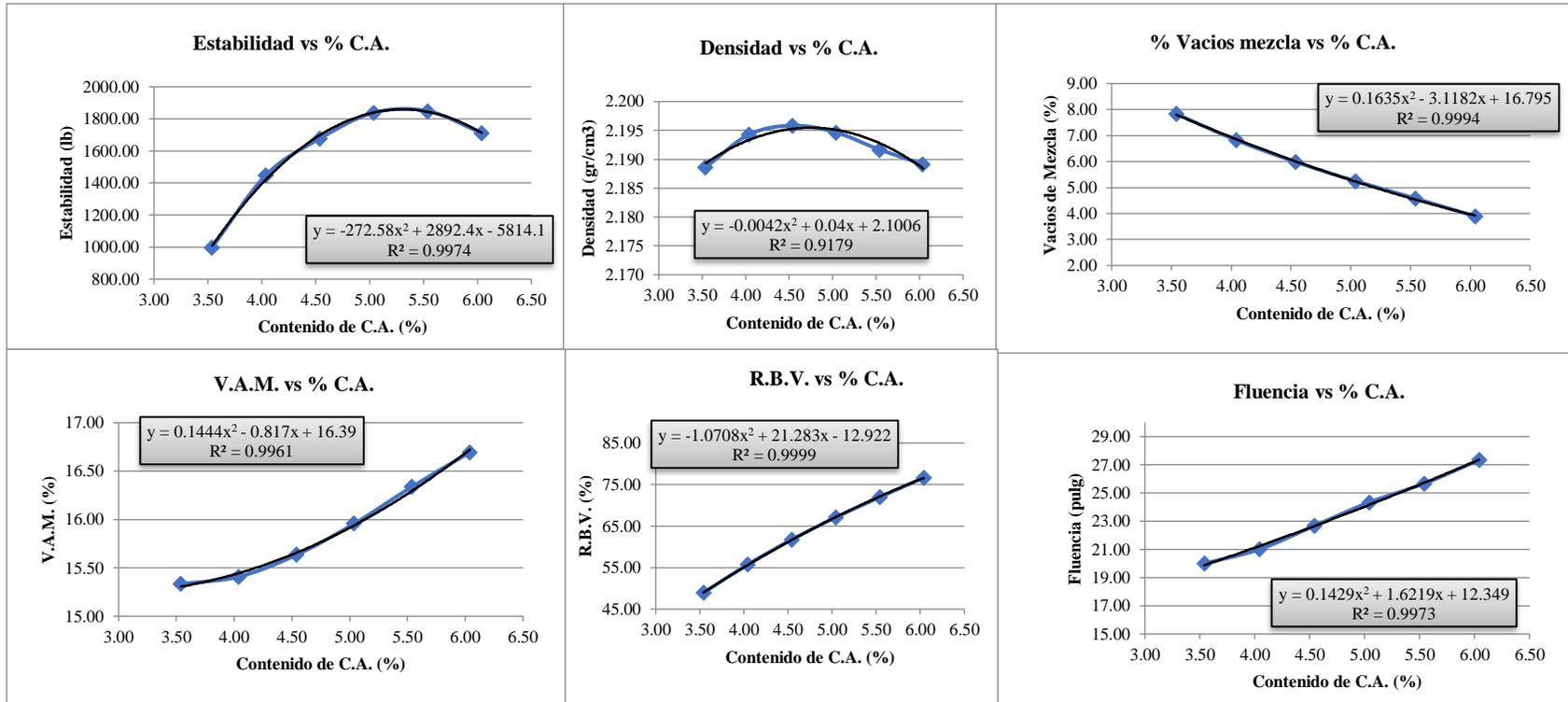
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2478.36	5.39
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.26	5.40
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.99
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.26

Tabla 50 Planilla Marshall para briquetas modificadas con 4% de polvo de caucho

No de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia			
	Polvo de caucho	Base mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla	V.A.M. (vacíos agregados)	R.B.V. (relación bitumen-vaciado)	lectura del dial	carga	factor de corrección	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.0	3.54	8.15	6.81	1146.3	1147.5	600	547.5	2.09	2.19	2.37	7.83	15.33	48.91	430	1139.7	0.90	1020.0	998.8	20	20.00	
2				6.91	1152.6	1153.8	650	503.8	2.29	390	1032.0				0.88	903.0	22					
3				6.71	1146.8	1148.0	623	525.0	2.18	440	1166.6				0.92	1073.3	18					

4	4.0	4.0 4	8.74	6.5 7	1159. 5	1160. 7	636	524.7	2.21	2.19	2.36	6.8 3	15.4 1	55.7 0	544	1446. 7	0.9 5	1372. 6	1450. 5	21	21.0 0		
5				6.6 4	1168. 2	1169. 4	640	529.4	2.21						574	1527. 4	0.9 4	1429. 2		22			
6				6.4 3	1145. 6	1146. 8	618	528.8	2.17						594	1581. 3	0.9 8	1549. 7		20			
7	4.0	4.5 4	9.34	6.4 7	1164. 9	1166. 1	641	525.1	2.22	2.20	2.34	5.9 8	15.6 3	61.7 3	554	1473. 6	0.9 7	1429. 4	1678. 0	22	22.6 7		
8				6.3 6	1143. 3	1144. 5	619	525.5	2.18						654	1742. 9	1.0 0	1738. 5		23			
9				6.3 8	1152. 0	1153. 2	628	525.2	2.19						705	1880. 2	0.9 9	1866. 1		23			
10	4.0	5.0 4	9.94	6.3 1	1136. 3	1137. 5	618	519.5	2.19	2.19	2.32	5.2 5	15.9 6	67.1 0	700	1866. 7	1.0 1	1887. 3	1839. 1	24	24.3 3		
11				6.4 4	1142. 8	1144. 0	626	518.0	2.21						714	1904. 4	0.9 8	1861. 6		27			
12				6.2 7	1129. 4	1130. 6	615	515.6	2.19						650	1732. 1	1.0 2	1768. 5		22			
13	4.0	5.5 4	10.5 5	6.5 7	1165. 0	1166. 2	630	536.2	2.17	2.19	2.30	4.5 8	16.3 4	71.9 4	670	1786. 0	0.9 5	1694. 5	1848. 6	28	25.6 7		
14				6.3 0	1156. 8	1158. 0	645	513.0	2.25						680	1812. 9	1.0 1	1836. 5		24			
15				6.6 0	1160. 0	1161. 2	621	540.2	2.15						800	2136. 0	0.9 4	2014. 7		25			
16	4.0	6.0 4	11.1 6	6.4 8	1135. 7	1136. 9	622	515.2	2.20	2.19	2.28	3.8 9	16.6 9	76.6 8	640	1705. 2	0.9 7	1649. 8	1711. 5	25	27.3 3		
17				6.3 5	1128. 6	1129. 8	615	515.2	2.19						630	1678. 2	1.0 0	1678. 2		29			
18				6.2 5	1109. 5	1110. 7	600	510.7	2.17						660	1759. 0	1.0 3	1806. 5		28			
Especificaciones				mínimo									3	13	75						1800		8
				máximo									5	-	82						-		16

Curvas Marshall para el contenido óptimo de cemento asfáltico en briquetas modificadas con 4% de polvo de caucho



Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1858.86	5.31
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.20	4.76
	Vacios de la mezcla (%)	4.00	5.91
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.32

4.3.3. Precios unitarios para carpeta asfáltica convencional

Análisis de precios unitarios					
Actividad:	Carpeta de concreto-asfalto convencional				
Cantidad :	1				
Unidad :	M3				
Moneda :	Bolivianos				
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Graba 3/4 triturada clasificada de planta	M3	0.51	152	77.52
2	Gravilla 3/8 triturada clasificada de planta	M3	0.32	152	48.64
3	Arena clasificada	M3	0.55	145	79.75
4	Cemento asfáltico 85/100	Lt	125	10.58	1322.5
5	Diesel	Lt	2	3.74	7.48
Total de materiales :					1535.89
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Ayudante	Hr	0.028	16	0.448
2	Capataz	Hr	1.8	25	45
3	Operador equipo pesado	Hr	0.82	20	16.4
4	Operador equipo liviano	Hr	0.082	18	1.476
5	Operador de planta	Hr	0.09	23.19	2.0871
6	Obrero	Hr	0.072	12.07	0.86904
7	Chofer volquete	Hr	0.0012	18	0.0216
Subtotal mano de obra :					66.3
Cargas sociales (% del subtotal de mano de obra)			60%	66.3	39.78
Impuestos i.v.a. Mano de obra (% de mano de obra + carga social)			14.94%	106.08	15.85
Subtotal cargas sociales e impuestos :					55.63
Total de mano de obra :					121.93
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Compac. Rod. Liso	Hr	0.04	303.85	12.154
2	Distribuidor de agregados autop.	Hr	0.03	455.03	13.6509
3	Rodillo neumatico tsp 10000	Hr	0.09	332.81	29.9529
4	Terminadora de asfalto	Hr	0.08	669.06	53.5248
5	Cargador frontal de ruedas 950 m3	Hr	0.01	421.29	4.2129
6	Volquete >= 12 m3	Hr	0.05	227.87	11.3935
Herramientas (% de total de mano de obra)			8%	121.93	9.75
Total de equipo, maquinaria y herramientas:					134.64
4.- Gastos generales y administrativos					
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	1792.47	179.25
Total gastos generales y administ					
5.- Utilidad					
Utilidad=% de 1+2+3+4			15.00%	1971.71	295.76
Total utilidad					
6.-Impuestos					
Impuestos it-% de 1+2+			3.09%	2267.47	70.06
Total impuestos					
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6					2337.53

4.3.4. Precios unitarios asfalto modificado con 1% de polvo de neumático

Análisis de precios unitarios					
Actividad:	Carpeta de concreto-asfalto modificada con polvo de neumático				
Cantidad :	1				
Unidad :	M3				
Moneda :	Bolivianos				
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Graba triturada clasificada de planta 3/8	M3	0.50	152.00	76.00
2.00	Graba triturada clasificada de planta 1/2	M3	0.31	152.00	47.12
3.00	Arena clasificada	M3	0.53	145.00	76.85
4.00	Cemento asfáltico 85/100	Lt	114.20	10.58	1208.24
5.00	Polvo de neumático reciclado	Kg	24.00	4.50	108.00
6.00	Diesel	Lt	2.00	3.74	7.48
Total de materiales :					1523.69
2.- Mano de obra					
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Ayudante	Hr	0.03	16.00	0.45
2.00	Capataz	Hr	1.80	25.00	45.00
3.00	Operador equipo pesado	Hr	0.82	20.00	16.40
4.00	Operador equipo liviano	Hr	0.08	18.00	1.48
5.00	Operador de planta	Hr	0.09	23.19	2.09
6.00	Obrero	Hr	0.07	12.07	0.87
7.00	Chofer volquete	Hr	0.00	18.00	0.02
Subtotal mano de obra :					66.30
Cargas sociales (% del subtotal de mano de obra)			0.60	66.30	39.78
Impuestos i.v.a. Mano de obra (% de mano de obra + carga social)			0.15	106.08	15.85
Subtotal cargas sociales e impuestos :					55.63
Total de mano de obra :					121.93
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Descripcion		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Compac. Rod. Liso	Hr	0.04	303.85	12.15
2.00	Distribuidor de agregados autop.	Hr	0.03	455.03	13.65
3.00	Rodillo neumático tsp 10000	Hr	0.09	332.81	29.95
4.00	Terminadora de asfalto	Hr	0.08	669.06	53.52
5.00	Cargador frontal de ruedas 950 m3	Hr	0.01	421.29	4.21
6.00	Volquete >= 12 m3	Hr	0.05	227.87	11.39
Herramientas (% de total de mano de obra)			0.08	121.93	9.75
Total de equipo, maquinaria y herramientas:					134.64
4.- Gastos generales y administrativos					
Gastos generales - % d			0.10	1780.26	178.03
Total gastos generales y administrativos					
5.- Utilidad					
Utilidad=% de 1+2+3+			0.15	1958.29	293.74
Total utilidad					
6.- Impuestos					
Impuestos it-% de 1+2			0.03	2252.03	69.59
Total impuestos					
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6					2321.62

4.3.5. Precios unitarios asfalto modificado con 2% de polvo de neumático

Análisis de precios unitarios					
Actividad:	Carpeta de concreto-asfalto modificada con polvo de neumatico				
Cantidad :	1				
Unidad :	M3				
Moneda :	Bolivianos				
1.- Materiales					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Graba triturada clasificada de planta 3/8	M3	0.48	152.00	72.96
2.00	Graba triturada clasificada de planta 1/2	M3	0.30	152.00	45.60
3.00	Arena clasificada	M3	0.51	145.00	73.95
4.00	Cemento asfaltico 85/100	Lt	118.00	10.58	1248.44
5.00	Polvo de neumatico reciclado	Kg	46.00	4.50	207.00
6.00	Diesel	Lt	2.00	3.74	7.48
Total de materiales :					1655.43
2.- Mano de obra					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Ayudante	Hr	0.03	16.00	0.45
2.00	Capataz	Hr	1.80	25.00	45.00
3.00	Operador equipo pesado	Hr	0.82	20.00	16.40
4.00	Operador equipo liviano	Hr	0.08	18.00	1.48
5.00	Operador de planta	Hr	0.09	23.19	2.09
6.00	Obrero	Hr	0.07	12.07	0.87
7.00	Chofer volquete	Hr	0.00	18.00	0.02
Subtotal mano de obra :					66.30
Cargas sociales (% del subtotal de mano de obra)			0.60	66.30	39.78
Impuestos i.v.a. mano de obra (% de mano de obra + carga social)			0.15	106.08	15.85
Subtotal cargas sociales e impuestos :					55.63
Total de mano de obra :					121.93
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Compac. Rod. Liso	Hr	0.04	303.85	12.15
2.00	Distribuidor de agregados autop.	Hr	0.03	455.03	13.65
3.00	Rodillo neumatico tsp 10000	Hr	0.09	332.81	29.95
4.00	Terminadora de asfalto	Hr	0.08	669.06	53.52
5.00	Cargador frontal de ruedas 950 m3	Hr	0.01	421.29	4.21
6.00	Volquete >= 12 m3	Hr	0.05	227.87	11.39
Herramientas (% de total de mano de obra)			0.08	121.93	9.75
Total de equipo, maquinaria y herramientas:					134.64
4.- Gastos generales y administrativos					
Gastos generales - % d			0.10	1912.01	191.20
Total gastos generales y adminis					
5.- Utilidad					
Utilidad=% de 1+2+3+			0.15	2103.21	315.48
Total utilidad					
6.- Impuestos					
Impuestos it-% de 1+2			0.03	2418.69	74.74
Total impuestos					
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6					2493.42

4.3.6. Precios unitarios asfalto modificado con 3% de polvo de neumático

Análisis de precios unitarios					
Actividad:	Carpeta de concreto-asfalto modificada con polvo de neumático				
Cantidad :	1				
Unidad :	M3				
Monedas :	Bolivianos				
1.- Materiales					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Graba triturada clasificada de planta 3/8	M3	0.46	152.00	69.92
2.00	Graba triturada clasificada de planta 1/2	M3	0.29	152.00	44.08
3.00	Arena clasificada	M3	0.50	145.00	72.50
4.00	Cemento asfáltico 85/100	Lt	118.90	10.58	1257.96
5.00	Polvo de neumático reciclado	Kg	68.00	4.50	306.00
6.00	Diesel	Lt	2.00	3.74	7.48
Total de materiales :					1757.94
2.- Mano de obra					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Ayudante	Hr	0.03	16.00	0.45
2.00	Capataz	Hr	1.80	25.00	45.00
3.00	Operador equipo pesado	Hr	0.82	20.00	16.40
4.00	Operador equipo liviano	Hr	0.08	18.00	1.48
5.00	Operador de planta	Hr	0.09	23.19	2.09
6.00	Obrero	Hr	0.07	12.07	0.87
7.00	Chofer volquete	Hr	0.00	18.00	0.02
Subtotal mano de obra :					66.30
Cargas sociales (% del subtotal de mano de obra)			0.60	66.30	39.78
Impuestos i.v.a. Mano de obra (% de mano de obra + carga social)			0.15	106.08	15.85
Subtotal cargas sociales e impuestos :					55.63
Total de mano de obra :					121.93
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1.00	Compac. Red. Liso	Hr	0.04	303.85	12.15
2.00	Distribuidor de agregados autop.	Hr	0.03	455.03	13.65
3.00	Rodillo neumático tsp 10000	Hr	0.09	332.81	29.95
4.00	Terminadora de asfalto	Hr	0.08	669.06	53.52
5.00	Cargador frontal de ruedas 950 m3	Hr	0.01	421.29	4.21
6.00	Volquete >= 12 m3	Hr	0.05	227.87	11.39
Herramientas (% de total de mano de obra)			0.08	121.93	9.75
Total de equipo, maquinaria y herramientas:					134.64
4.- Gastos generales y administrativos					
Gastos generales - % d			0.10	2014.52	201.45
Total gastos generales y adminis					
5.- Utilidad					
Utilidad=% de 1+2+3+			0.15	2215.97	332.40
Total utilidad					
6.- Impuestos					
Impuestos it-% de 1+2			0.03	2548.36	78.74
Total impuestos					
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6					2627.11

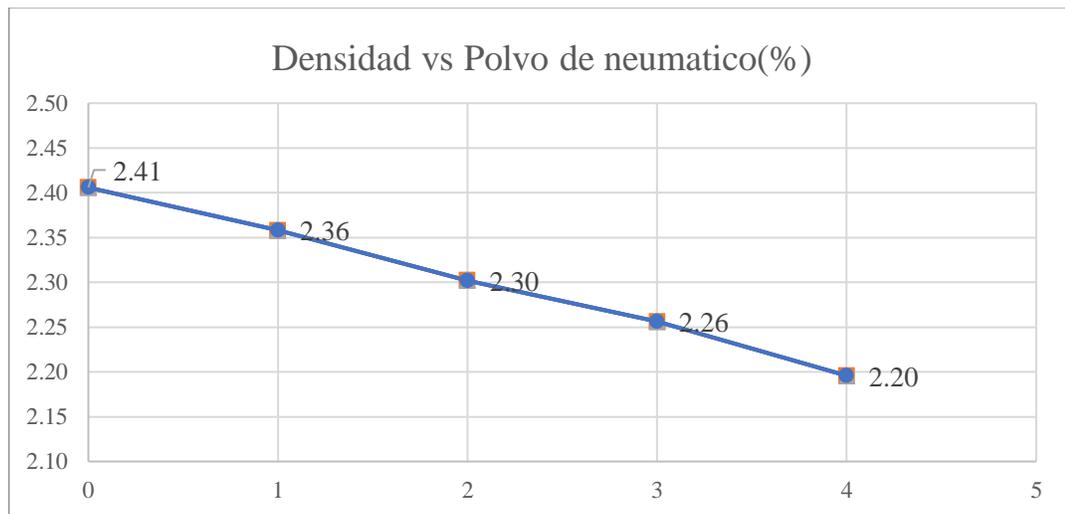
4.3.7. Precios unitarios asfalto modificado con 4% de polvo de neumático

Análisis de precios unitarios					
Actividad:	Carpeta de concreto-asfalto modificada con polvo de neumático				
Cantidad :	1				
Unidad :	M3				
Moneda :	Bolivianos				
1.- Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total	
1 Graba triturada clasificada de planta 3/8	M3	0.44	152.00	66.88	
2 Graba triturada clasificada de planta 1/2	M3	0.28	152.00	42.56	
3 Arena clasificada	M3	0.48	145.00	69.60	
4 Cemento asfáltico 85/100	Lt	117.00	10.58	1237.86	
5 Polvo de neumático reciclado	Kg	88.00	4.50	396.00	
6 Diesel	Lt	2.00	3.74	7.48	
Total de materiales :				1820.38	
2.- Mano de obra					
descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total	
1 Ayudante	Hr	0.03	16.00	0.45	
2 Capataz	Hr	1.80	25.00	45.00	
3 Operador equipo pesado	Hr	0.82	20.00	16.40	
4 Operador equipo liviano	Hr	0.08	18.00	1.48	
5 Operador de planta	Hr	0.09	23.19	2.09	
6 Obrero	Hr	0.07	12.07	0.87	
7 Chofer volquete	Hr	0.00	18.00	0.02	
Subtotal mano de obra :				66.3	
Cargas sociales (% del subtotal de mano de obra)		60%	66.3	39.78	
Impuestos i.v.a. Mano de obra (% de mano de obra + carga social)		14.94%	106.08	15.85	
Subtotal cargas sociales e impuestos :				55.63	
Total de mano de obra :				121.93	
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total	
1 Compac. Rod. Liso	Hr	0.04	303.85	12.15	
2 Distribuidor de agregados autop.	Hr	0.03	455.03	13.65	
3 Rodillo neumático tsp 10000	Hr	0.09	332.81	29.95	
4 Terminadora de asfalto	Hr	0.08	669.06	53.52	
5 Cargador frontal de ruedas 950 m3	Hr	0.01	421.29	4.21	
6 Volquete >= 12 m3	Hr	0.05	227.87	11.39	
Herramientas (% de total de mano de obra)		8%	121.93	9.75	
Total de equipo, maquinaria y herramientas:				134.64	
4.- Gastos generales y administrativos					
Gastos generales - % de 1+2+3		10.00%	2076.96	207.7	
Total gastos generales y administ					
5.- Utilidad					
Utilidad=% de 1+2+3+4		15.00%	2284.65	342.7	
Total utilidad					
6.- Impuestos					
Impuestos it-% de 1+2+		3.09%	2627.35	81.19	
Total impuestos					
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6				2708.53	

4.3.8. Síntesis de resultados

Tabla resumen					
Porcentaje de polvo de neumático	0	1	2	3	4
Estabilidad Marshall (Lb)	4656.44	3850.94	3272.75	2478.36	1858.86
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.41	2.36	2.30	2.26	2.20
Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
% Porcentaje óptimo de C.A.	5.07	4.84	5.13	5.26	5.32
precio unitario por m ³ (Bs)	2337.53	2321.62	2493.42	2627.11	2708.53
polvo reciclado por m ³ (kg)	0.00	24.00	46.00	68.00	88.00

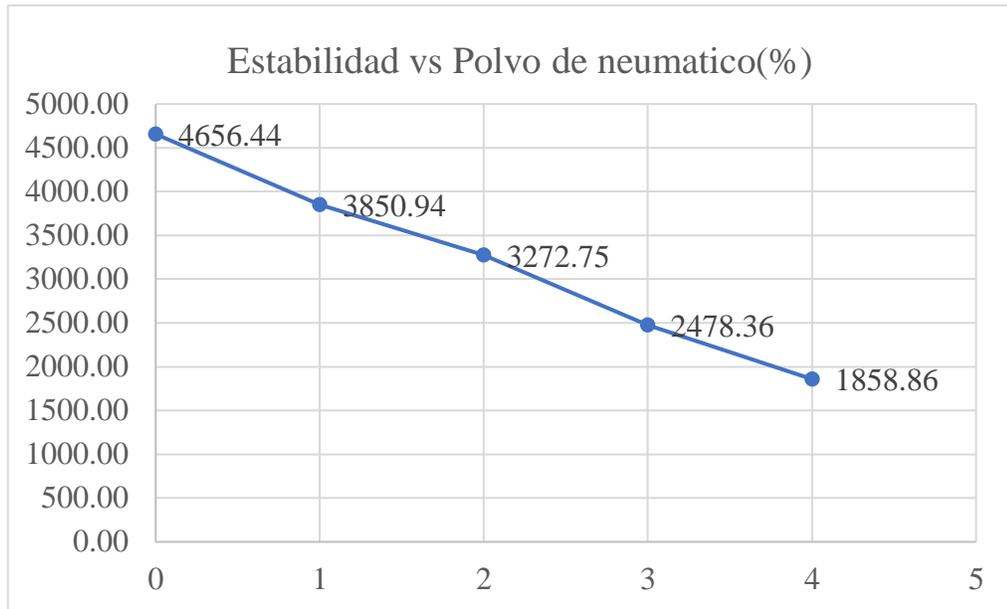
Figura 31 Curva Densidad vs % de Polvo de caucho



Fuente: Elaboración Propia

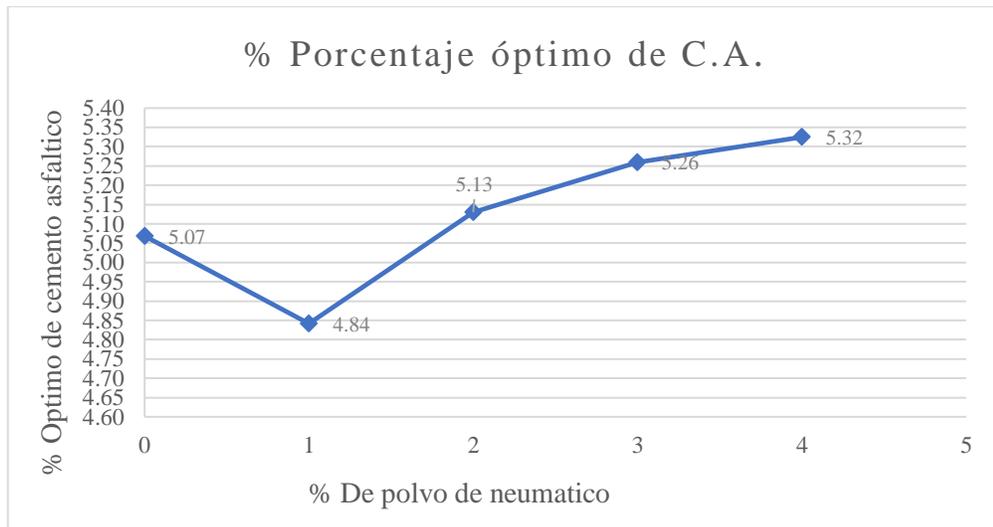
De la figura la densidad es inversamente proporcional al % de Polvo de caucho, es decir que, a mayor porcentaje de Polvo de caucho, menor será la Densidad.

Figura 32 Curva Estabilidad vs % Polvo de caucho



Fuente: Elaboración Propia

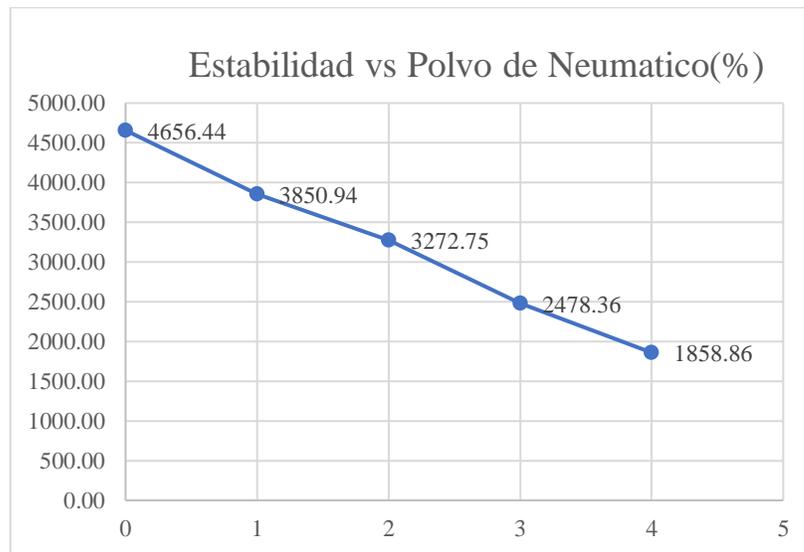
De la figura, la estabilidad decrece a medida que el porcentaje de Polvo de caucho aumenta, es decir que a mayor % de Polvo de caucho, menor será la Estabilidad hasta llegar a valores mínimos Estabilidad para tráfico pesado.



De la figura, el porcentaje óptimo de cemento asfáltico (C. A.) varía a medida que se modifican las cantidades de polvo de neumático utilizado, donde se puede apreciar que el uso de 1% de polvo de neumático disminuye la cantidad óptima de cemento asfáltico

Especificación del Método Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
No. de golpes	35		50		75	
Estabilidad Newtons	3336		5338		8006	
Libras	750		1200		1800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5

En base a la tabla resumen, se interpolará de las ecuaciones de mezcla asfáltica convencional, para determinar a qué porcentaje de cemento asfáltico obtenemos una mezcla asfáltica con características similares a la modificada con caucho



Interpolando para 3850.94 de estabilidad obtenemos 4.41 de %C. A.

Interpolando para 3272.75 de estabilidad obtenemos 4.13 de %C. A.

Interpolando para 2478.36 de estabilidad obtenemos 3.83 de %C. A.

Interpolando para 1858.86 de estabilidad obtenemos 3.63 de %C. A.

Tabla de comparación		
Porcentaje de polvo de neumático	1	0
Estabilidad Marshall (Lb)	3851.00	3851.000
Densidad máxima (gr/cm³)	2.3581	2.401
Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.00
% Porcentaje de C.A.	4.84	4.41
precio unitario por m³ (Bs)	2321.62	2074.11

Tabla de comparación		
Porcentaje de polvo de neumático	2	0
Estabilidad Marshall (Lb)	3272.75	3272.753
Densidad máxima (gr/cm³)	2.30	2.395
Vacíos de la mezcla (%)	4.00	4.00
% Porcentaje de C.A.	5.13	4.13
precio unitario por m³ (Bs)	2493.42	1978.68

Tabla de comparación		
Porcentaje de polvo de neumático	3	0
Estabilidad Marshall (Lb)	2478.357	2478.357
Densidad máxima (gr/cm3)	2.256	2.387
Vacíos de la mezcla (%)	4.000	4.00
% Porcentaje de C.A.	5.260	3.83
precio unitario por m3 (Bs)	2627.109	1874.54

Tabla de comparación		
Porcentaje de polvo de neumático	4	0
Estabilidad Marshall (Lb)	1858.856	1858.856
Densidad máxima (gr/cm3)	2.196	2.380
Vacíos de la mezcla (%)	4.001	4.00
% Porcentaje de C.A.	5.325	3.63
precio unitario por m3 (Bs)	2708.533	1805.67

4.3.8.1. porcentaje de polvo de caucho recomendado

En vista de los resultados obtenidos se analizan 4 alternativas:

Alternativa 1: polvo de caucho al 1%

Alternativa 2: polvo de caucho al 2%

Alternativa 3: polvo de caucho al 3%

Alternativa 4: polvo de caucho al 4%

4.3.9. Factibilidad técnica, económica, socio-ambiental:

Alternativa 1: polvo de caucho al 1%

Aspecto	Desarrollo	Factibilidad
Técnico (40%)	<p>1. Debido a que el polvo de caucho proviene de una planta recicladora en Cochabamba, es factible utilizarlo en una carretera, ya que se puede producir en grandes cantidades.</p> <p>2. la estabilidad del asfalto modificado con 1% de polvo de neumático es de 3850 lb por lo que, disminuyo en un 17.2% aprox. En comparación al convencional, pero sigue manteniendo sus valores dentro de la normativa Marshall para tráfico pesado (1800 lb).</p>	3
Económico (30%)	En el ámbito económico se aprecia una disminución de precios de un 0.64% para la alternativa de solución con 1% de polvo de caucho reciclado, en relación al convencional.	3
Social (10%)	Debido a que esta alternativa es la que menos caucho requiere, es la que menos aporte social hace a la comunidad	0
Ambiental (20)	Debido a que esta alternativa es la que menos caucho requiere, es la que menos reciclaje involucra	0

Alternativa 2: polvo de caucho al 2%

Aspecto	Desarrollo	Factibilidad
Técnico (40%)	<p>- Debido a que el polvo de caucho proviene de una planta recicladora en Cochabamba, es factible utilizarlo en una carretera, ya que se puede producir en grandes cantidades.</p> <p>- la estabilidad del asfalto modificado con 2% de polvo de neumático es de 3272 lb por lo que, disminuyo en un 29.7% aprox. En comparación al convencional, pero sigue manteniendo sus valores dentro de la normativa Marshall para tráfico pesado (1800 lb).</p>	2
Económico (30%)	En el ámbito económico se aprecia un aumento de precios de un 6.23% para la alternativa de solución con 2% de polvo de caucho reciclado, en relación al convencional.	2
Social (10%)	Debido a que este proyecto busca reciclar las llantas desechadas de los automóviles, la sociedad estaría de acuerdo en utilizar esta alternativa ya que se reduciría la contaminación ambiental.	1
Ambiental (20)	Al emplear esta alternativa de asfaltado podemos llegar a reutilizar 3358 neumáticos fuera de uso, en una carretera de 5 cm de espesor, 7.30 metros de ancho y 10 kilómetros de longitud. Ya que se pueden reciclar aproximadamente 9 neumáticos por metro cubico de asfalto modificado.	1

Alternativa 3: polvo de caucho al 3%

Aspecto	Desarrollo	Factibilidad
Técnico (40%)	<p>- Debido a que el polvo de caucho proviene de una planta recicladora en Cochabamba, es factible utilizarlo en una carretera, ya que se puede producir en grandes cantidades.</p> <p>- la estabilidad del asfalto modificado con 3% de polvo de neumático es de 2478 lb por lo que, disminuyo en un 46.7% aprox. En comparación al convencional, pero sigue manteniendo sus valores dentro de la normativa Marshall para tráfico pesado (1800 lb).</p>	1
Económico (30%)	En el ámbito económico se aprecia un aumento de precios de un 9.31% para la alternativa de solución con 3% de polvo de caucho reciclado, en relación al convencional.	1
Social (10%)	Debido a que este proyecto busca reciclar las llantas desechadas de los automóviles, la sociedad estaría de acuerdo en utilizar esta alternativa ya que se reduciría la contaminación ambiental.	2
Ambiental (20)	Al emplear esta alternativa de asfaltado podemos llegar a reutilizar 4964 neumáticos fuera de uso, en una carretera de 5 cm de espesor, 7.30 metros de ancho y 10 kilómetros de longitud. Ya que se pueden reciclar aproximadamente 12 neumáticos por metro cubico de asfalto modificado.	2

Alternativa 4: polvo de caucho al 4%

Aspecto	Desarrollo	Factibilidad
Técnico (40%)	<p>- Debido a que el polvo de caucho proviene de una planta recicladora en Cochabamba, es factible utilizarlo en una carretera, ya que se puede producir en grandes cantidades.</p> <p>- la estabilidad del asfalto modificado con 3% de polvo de neumático es de 2478 lb por lo que, disminuyo en un 46.7% aprox. En comparación al convencional, pero sigue manteniendo sus valores dentro de la normativa Marshall para tráfico pesado (1800 lb).</p>	0
Económico (30%)	<p>En el ámbito económico se aprecia un aumento de precios de un 9.31% para la alternativa de solución con 3% de polvo de caucho reciclado, en relación al convencional. También es la alternativa más cara en relación a la poca estabilidad que nos brinda</p>	0
Social (10%)	<p>Debido a que este proyecto busca reciclar las llantas desechadas de los automóviles, la sociedad estaría de acuerdo en utilizar esta alternativa ya que se reduciría la contaminación ambiental.</p>	3
Ambiental (20)	<p>Al emplear esta alternativa de asfaltado podemos llegar a reutilizar la mayor cantidad de neumáticos fuera de uso</p>	3

4.3.10. Resumen de factibilidad de las alternativas

Aspecto	Técnico	Económico	Social	Ambiental	Total/100
Ponderación	40	30	10	20	100
Alternativa 1	3	3	0	0	70
Alternativa 2	2	2	1	1	56.6666667
Alternativa 3	1	1	2	2	43.33333333
Alternativa 4	0	0	3	3	30

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se pudo cumplir el objetivo general de esta investigación que era: Identificar las propiedades de mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de polvo triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) aplicando diferentes ensayos y pruebas de laboratorio, para conocer sus nuevas características.

La alternativa mas recomendable en base a las ponderaciones de factibilidad dadas por el investigador, es la de polvo de caucho al 1%.

En vista de que el caucho disminuye las propiedades de una mezcla asfáltica, se llegó a la conclusión de que no es una alternativa recomendable tomando en cuenta el aspecto social y ambiental, pero si lo es tomando en cuenta únicamente el aspecto ambiental.

A medida que se aumenta las cantidades de polvo de neumático, disminuyen los valores de estabilidad y aumentan los valores de fluencia.

A mayor presencia de polvo de caucho, la densidad disminuye

Si bien, la factibilidad económica es negativa para las alternativas de 2 y 3%, contemplando los demás aspectos resultan factibles y recomendables como alternativas de solución principalmente en el ámbito ambiental.

Ahora se conoce que en Bolivia se está avanzando en el campo del reciclaje y una gran parte de los desechos que los humanos producen son los neumáticos, que una vez cumplen su vida útil deberían ser reutilizados y el pavimento flexible es una solución real que no afecta la naturaleza más de lo debido.

Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar su contenido de Cemento Asfáltico Optimo, dando como resultado un valor de 5,07%.

Las muestras sin alterar con un contenido óptimo de cemento asfáltico arrojaron una estabilidad de 4656.44 libras, y cuando se le empezó a añadir polvo de caucho la estabilidad disminuyó gradualmente.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda usar el polvo de caucho en cantidades del 1, 2 y 3% en mezclas asfálticas flexibles, debido a que se puede reciclar neumáticos fuera de uso en grandes cantidades, y de esta manera disminuir la contaminación ambiental.

Se recomienda, analizar otros posibles usos para este nuevo material que cada vez, está ganando campo en el ámbito de la construcción en nuestro país

No se recomienda utilizar polvo de neumático reciclado en cantidades iguales o superiores al 4% debido a que la estabilidad ya no cumple con los valores mínimos de la norma Marshall de 1800 lb.

Es recomendable antes de la selección del tamaño de partícula del residuo de caucho que se utilizara, realizar un cuarteo para la mejor selección de muestra y otras actividades que permitan subclasificarlos. (del estado, uso, marca, procedencia, etc.)

Se recomienda que al trabajar con mezcla asfáltica a temperaturas altas se utilice el equipo necesario de seguridad para su manipuleo: guantes de cuero o lona, gafas de seguridad, ropa adecuada de preferencia un overol y mascarillas (tipo barbijo) para evitar la inhalación de gases u otras sustancias; es decir aplicar lo que corresponde a la Seguridad Industrial.

A momento de incluir el polvo de caucho a la preparación de una mezcla asfáltica se recomienda el uso de una máscara de filtro de aire para evitar intoxicaciones a causa de los gases que se generan.

Es necesario tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos; además de la sensibilidad de los mismos.

También es importante considerar que al utilizar el martillo Marshall mecánico, realizar el control de golpes ya que a veces el aparato lleva mal el conteo.

Es importante y se recomienda dar mantenimiento y realizar la calibración del dial de prensa Marshall, antes de realizar la rotura de briquetas para obtener valores correctos.