

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El parque automotor en la ciudad de Tarija ha tenido una tendencia creciente en estos últimos años, debido al aumento poblacional, propio de ciudades en desarrollo. Por eso teniendo la mayor parte de las estructuras que se diseñan y construyen en la ciudad son flexibles o cuentan con rodaduras o superficies construidas con capas asfálticas, pues permiten deformaciones, y son más económicos que otros tipos de pavimentos. Sin embargo, las propiedades de algunos de los asfaltos convencionales utilizados en la región tienen como característica que no cumplen totalmente con las necesidades que se pretenden satisfacer, como las resistencias a esfuerzos abrasivos debido al tránsito y las cargas de servicio a las que estará sometida la estructura. Comúnmente las vías que tienen deterioros prematuros, presentan en la carpeta asfáltica deformaciones permanentes, fisuras y en casos más extremos pérdidas de capa estructural.

Ante esta situación es importante el uso de materiales asfálticos que presenten mejores comportamientos que los tradicionales. Es decir, la utilización de asfaltos modificados con la adición de algún material, que modifique sus propiedades de resistencia mecánica de las mezclas asfálticas ante diferentes condiciones de carga.

La presente investigación tiene la finalidad de dar una metodología novedosa para la realización de ensayos, combinando porcentajes de polipropileno para mejorar las propiedades mecánicas de pavimentos flexibles de estructuras viales en la ciudad de Tarija.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Las características de las solicitaciones de carga, ambientales y climatológicas a las que se somete un pavimento han ido cambiando con el paso del tiempo, y en el ámbito constructivo es necesario que los pavimentos satisfagan las condiciones actuales y que cumplan con su vida útil del diseño, para evitar impactos ambientales y sobrecostos de

mantenimiento. Como se indicó líneas arriba, por lo general, los asfaltos convencionales presentan un comportamiento poco ideal respecto a las diversas condiciones en las que son sometidos, lo que se refleja en el rápido deterioro, y su consecuente incidencia en los costos de mantenimiento y en la óptima movilidad en las vías.

Por consiguiente esta situación ha sido motivación para diversas investigaciones encauzadas a buscar nuevas alternativas frente al asfalto convencional, las que utilizan distintos materiales para mejorar las características de las mezclas buscando que estas sean más duraderas, que resistan las deformaciones plásticas, los esfuerzos abrasivos del tráfico, la acción de los agentes climatológicos y que sea flexible y deformable bajo cargas lentas.

Es por esto que se hace necesario continuar buscando materiales que contribuyan a optimizar las propiedades de las mezclas asfálticas. En este sentido, la presente investigación aporta el estudio de una alternativa que busca mejorar las condiciones para afrontar dicha problemática.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

1.3.1. Situación problemática

Actualmente en la ciudad de Tarija existe una gran cantidad de vías con pavimento flexible o cuentan con rodaduras construidas con capas asfálticas. Sin embargo, son muy pocas las vías que se encuentran en perfecto estado, pues a que muchas de estas estructuras trabajan bajo condiciones extremas, debido a la cantidad de vehículos que circulan por ellas. Esto genera problemas a corto plazo como grietas o deformaciones permanentes, causadas posiblemente por falencias en la estructura de la mezcla como la baja cohesión, que se traduce en la baja adhesión entre el ligante asfáltico y el agregado. Asimismo, dentro de los factores que causan el deterioro prematuro, las grietas y ahuellamientos, están las condiciones climatológicas, esfuerzos abrasivos debido al tráfico, cargas de servicio a la que será sometida la estructura, entre otras.

Probablemente la causa más importante es la mala calidad del asfalto, lo que produce

una baja cohesión y adhesión entre el ligante y el agregado. Además, un asfalto de mala calidad puede causar grandes deformaciones permanentes o, por el contrario, poca resistencia a los esfuerzos de tensión repetidos que forman agrietamientos, debido a la fatiga que se genera.

Es importante mencionar que, ante esta problemática, en los últimos años a lo largo de muchos países, han surgido diferentes investigaciones en donde evalúan el comportamiento que tiene los asfaltos modificados con diferentes materiales ya sea con desechos de cauchos, fibras, etc., en donde se evidencia” resultados favorables en comparación con los asfaltos de tipo convencional.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación busca resolver problemas de deterioros prematuros que conllevan a disminuir la durabilidad de carpetas asfálticas, analizando el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente: densa, semidensa y abierta, modificada con adición de polipropileno.

1.3.2. Problema

¿Qué comportamiento presentan las mezclas asfálticas? ¿densa, semidensa y abierta, cuando se les adiciona polipropileno?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Analizar la combinación de mezclas asfálticas, densa, semidensa, y abierta; con cantidades variables de polipropileno, de tal manera, se pueda observar el comportamiento mecánico de la estabilidad y fluencia.

1.4.2. Objetivos específicos

Establecer las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente.

Describir el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con polipropileno.

Determinar el porcentaje óptimo de polipropileno en las mezclas asfálticas densas, semidensas y abiertas para modificar su comportamiento mecánico.

1.5. HIPÓTESIS

La adición de polipropileno a las mezclas asfálticas en caliente, determinada a partir de las propiedades mecánicas de mezclas densa, semidensa y abierta con polímero, permitirá mejorar la estabilidad y fluencia.

1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

Tipo de mezcla asfáltica:

- Densa
- Semidensa
- Abierta

Cantidad de polipropileno

1.6.2. Variable dependiente

Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en estabilidad y fluencia.

1.6.3. Conceptualización y Operacionalización de las variables

Tabla 1.2 Conceptualización de variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Propiedades mecánicas.	estabilidad	Lb	Ensayos método Marshall
	fluencia	Plg	Ensayos Método Marshall

Fuente: Elaboración Propia

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1. Unidad de Estudio.

La unidad de estudio son los ensayos de mezclas.

1.7.2. Población

Todos los ensayos existentes.

1.7.3. Muestra

Técnicas de muestreo:

Estabilidad, fluencia

Criterios

1.7.4. Muestreo

Se realizará el muestreo del cemento asfáltico (85-100) para la preparación de las mezclas asfálticas, tomando la muestra de los turriles que vienen de la fábrica del tipo Bitumen, para los cuales se aplicara los ensayos de consistencia y caracterización correspondientes.

Para los agregados minerales pétreos de las mezclas asfálticas se utilizarán agregados resultantes de los procesos de chancado, para los cuales se realizarán sus ensayos de caracterización correspondientes.

1.8. SELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MUESTREO

Para le presente investigación se harán ensayos de laboratorio con el material granular recolectado, se comenzará el ensayo de granulometría para determinar el tipo de suelo que es de acuerdo a la norma AASHTO. Posteriormente se aplicará ensayo de clasificación.

Luego se elaborarán la realización de las viguetas para poder encontrar la dosificación ideal para densas, semidensas, y abiertas, encontrando la óptima dosificación adicionando el polipropileno

Finalmente se realizará el ensayo de Marshall, para tener el valor de la resistencia máxima que se aumentará.

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 ensayado.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica determinamos las siguientes curvas:

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

Para cada mezcla de estudio como ser la densa, semidensa y abierta; de cada curva, se selecciona el valor del porcentaje de cemento asfáltico modificado más adecuado, previo análisis.

1.10 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En resumen, el alcance que tendrá este trabajo es el análisis mecánico de la mezcla asfáltica densa, semidensa y abierta adicionada con polipropileno.

En el primer capítulo, se describe de manera general de que trata la investigación para el contenido del polipropileno que se aplicará en la mezcla asfáltica donde se dará a conocer, la situación problemática, los objetivos, la justificación y la hipótesis del presente proyecto.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es

todo lo referente a las modificaciones y los agregados a utilizar, diseño de las mezclas asfálticas según el método Marshall, normas, etc.

El tercer capítulo, describe los medios y criterios para obtener los datos de caracterización de los materiales granulares de aportación, que luego son procesados y analizados según normas.

También se aplica el diseño de briquetas con el método Marshall, en planta en caliente, con tres tipos de análisis, el primero con la mezcla asfáltica densa, el segundo con una mezcla asfáltica semidensa y la tercera mezcla asfáltica abierta con 3 diferentes porcentajes de polipropileno, para luego hacer un análisis final de datos, según curvas de correlación de la variable independiente porcentajes de polipropileno en las mezclas asfálticas, con la variable dependiente que es propiedades de resistencia Marshall. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

El cuarto capítulo, establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos, dándose a conocer los resultados finales de las comparaciones que se tendrá de las mezclas asfálticas con el polipropileno del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

2.1. ANTECEDENTES DEL ASFALTO

El término asfalto, se deriva del vocablo acadio asphatu o asphallo, que significa dividirse, resquebrajarse. Posteriormente, fue adoptado por los griegos como adjetivo cuyo significado es estable, seguro y al verbo estabilizar o asegurar. De, donde se supone que el primer uso del asfalto en las civilizaciones antiguas es que fue utilizado en forma de cemento, para asegurar o unir objetos. Del griego pasó al latín, después al francés (asphalte) y finalmente al inglés (asphalt).

Desde la antigüedad hasta hoy en día, el asfalto ha sido utilizado como cemento para ligar, cubrir o impermeabilizar objetos. Es un material muy versátil, se puede decir que es el material de ingeniería más antiguo utilizado por el hombre.

A principios del siglo XIX el descubrimiento del asfalto refinado por medio de la destilación del petróleo crudo y el auge de la industria automovilística, dió lugar al aumento en el consumo de este. Fue utilizado como material para pavimentar caminos y otras aplicaciones.

Tabla 2.1 Historia del asfalto.

AÑO	USO
6000 a. C.	En sumeria, se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel es una de las tantas construcciones en donde se utilizó como mortero.
3200- 2600 a. C.	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
	Excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estructuras de muros.
300 a. C.	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamamientos.
1802 d. C.	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1838 d. C.	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.

1870 d. C.	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
1876 d. C.	Construcción del primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D. C. con asfalto de lago importado.
1902 d. C.	En Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año.

Fuente: Conferencia: Esquema Actual y Futuro de Producción de Asfaltos en PEMEX Refinación. Ing.: Jorge Rodríguez

2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.2.1. Definición de 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. (Kraemer et al., 2004).

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.

2.2.2. 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 semi-cerradas 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 2.2. Clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo a su granulometría

Tipo de Mezcla		Tamiz (mm/U.S. Standard)									
		37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
		1 ½ "	1 "	¾ "	½ "	3/8 "	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 80	Nº 200
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semi densa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto módulo	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo		0	4 %					3 %			2 %

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.

2.3. COMPONENTES MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.3.1. Cemento asfáltico

2.3.1.1. Cemento asfáltico

La sociedad americana de pruebas y materiales (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.

2.3.1.2. Refinación del petróleo para la obtención del cemento asfáltico

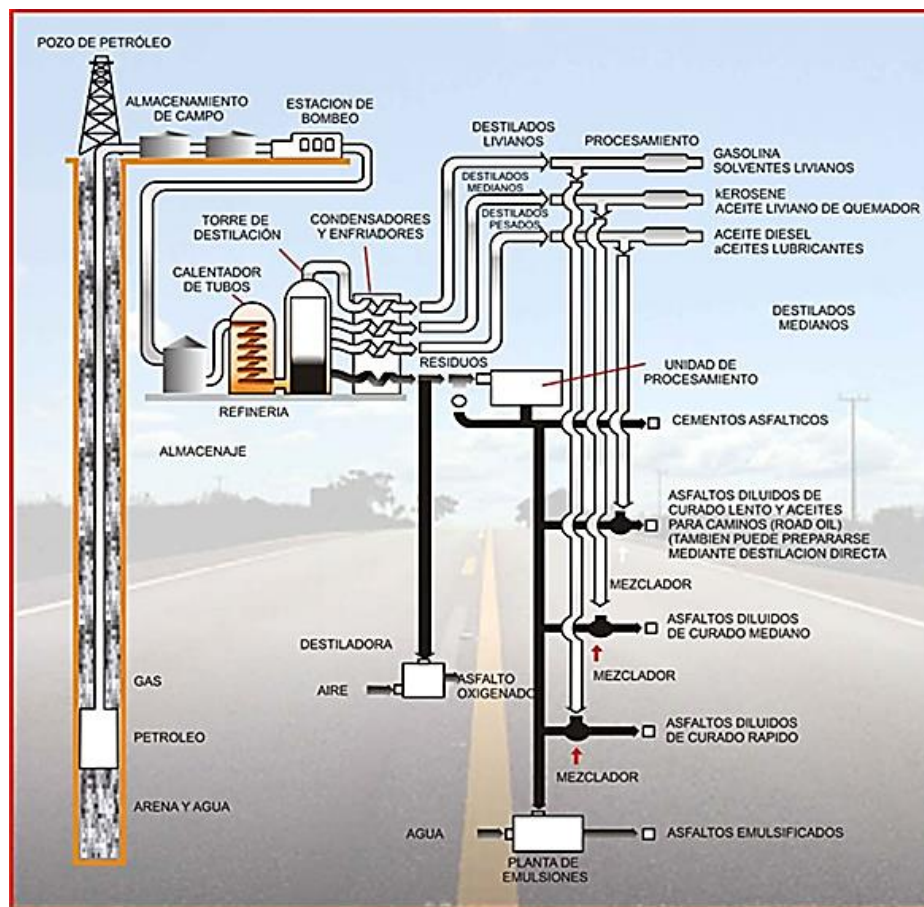
El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. El diagrama del proceso para la extracción del asfalto de petróleo (figura 2.3) 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 oíl 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 2.1 Proceso de refinación del petróleo para la obtención del asfalto



Fuente: Instituto del asfalto

2.3.1.3. Composición química del asfalto

Está constituido por tres grupos básicos: asfaltenos, 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. Los asfáltenos son producto de la condensación de las resinas.

Tabla 2.3 Composición química del asfalto.

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

Fuente: Introducción al Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente, Guía Práctica y Teórica para su Control de Calidad

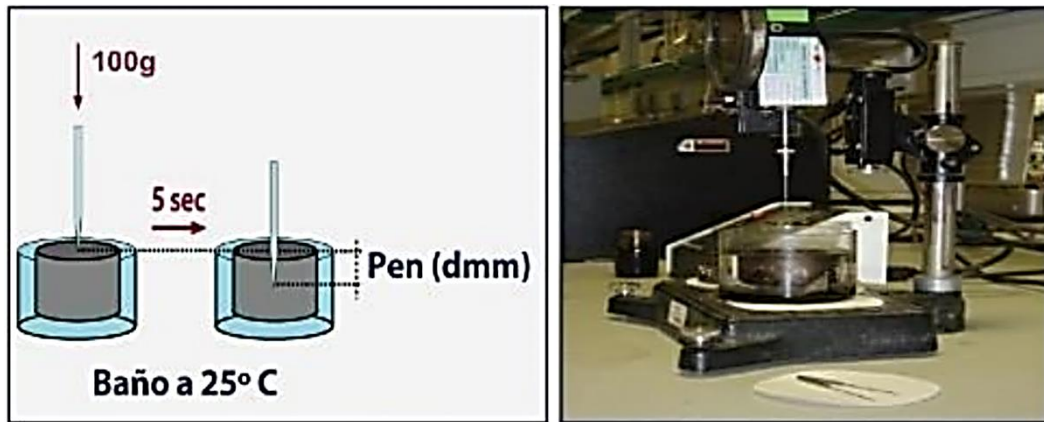
2.3.1.4. Ensayos para caracterizar el cemento asfáltico

- Ensayos de penetración
- Ensayo de ductilidad
- Ensayo punto de inflamación
- Ensayos de viscosidad
- Solubilidad
- Peso específico

2.3.1.4.1. 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 2.2 Ensayo normal de penetración



Fuente: Manual del asfalto-Institute, A.

2.3.1.4.2. 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 2.3 Ensayo de ductilidad



Fuente: Manual del asfalto-Institute, A.

2.3.1.4.3. 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.

2.3.1.4.4. 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.

2.3.1.4.5. 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.

2.3.1.4.6. 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.

2.4. AGREGADOS

Ya que la calidad y gradación de los agregados tienen un efecto importante en las propiedades de la mezcla, el tipo de agregado debe ser considerado cuidadosamente, pues las propiedades varían según el lugar de producción. La calidad y gradación del agregado obtenida en ensayos de laboratorio indican los niveles recomendables de su uso. Así, la selección apropiada del agregado depende esencialmente del propósito de su aplicación, tomando en cuenta los factores económicos.

Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían de obra en obra, debido a que la mayoría de las agencias contratantes no tienen especificaciones para dichos procedimientos. Esencialmente las agencias exigen que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación para el agregado. Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía con los diferentes niveles del acopio. Deberán prepararse superficies firmes y limpias, y se deberán tomar precauciones para mantener separadas las reservas así

prevenir el mezclado de las partículas. La separación se consigue ya sea manteniendo ampliamente espaciadas, o mediante muros de contención entre ellas:

En el manejo del agregado para la elaboración de mezclas asfálticas, generalmente se tritura por efectos del excesivo manipuleo, generando consecuentemente partículas de diferentes graduaciones, que afectan considerablemente la calidad de la mezcla final; considerando este problema es que se recomienda que el agregado sea el mínimo posible para prevenir cualquier segregación por degradación.

2.4.1. Tipos de agregados utilizados en mezclas asfálticas

2.4.1.1. 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

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".

2.4.1.2. 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

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 N° 4 y quedan retenidas en el N° 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 N° 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"

2.4.1.3. 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 2.5 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 N°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.

2.4.1.4. Propiedades de los agregados

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:

- Graduación
- Tamaño máximo de partícula
- Textura de la superficie
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Dureza
- Afinidad con el asfalto
- Forma de la partícula
- Peso específico

Cada una de estas propiedades importantes que debe poseer un agregado que será utilizado en pavimentación, se describen a continuación.

Graduación

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado, estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado, es comúnmente llamada graduación del agregado o gradación del agregado.

Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

Tamaño máximo de partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partícula; éstos se describen a continuación:

Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

Una mezcla de pavimentación, se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregados. El análisis de tamices, consiste en pasar la muestra por una serie de tamices.

Textura superficial

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

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

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

Limpieza

Las especificaciones de la obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales extraños que adulteran el agregado, generalmente estos materiales extraños los constituyen: vegetación, arcilla, partículas blandas, etc. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente, mediante inspección visual. Por un tamizado de lavado (donde el peso de la muestra de agregados antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075mm (N° 200).

Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto, es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado.

Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables para su utilización en mezclas asfálticas, a pesar de su alta capacidad de absorción.

Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie, deben ser más duros, es decir deben tener más resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Resistencia al Desgaste de Agregado Grueso de Tamaño Pequeño por Impacto y Abrasión en la Máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96 o ASTM E 31), es la medida más común de la dureza en los agregados.

Este ensayo nos permite tener una idea, de la forma en que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causados por el tráfico, además nos proporciona una idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.

Los agregados intemperizados, tendrán valores de desgaste elevados, por lo que su uso

será limitado o nulo dentro de un proyecto de pavimentación. Por lo tanto, este valor, es muy utilizado como un indicador de la relativa calidad de los agregados a utilizarse en pavimentación.

Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son conocidos como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución.

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto sin compactar, es sumergida en agua; y las partículas cubiertas son observadas visualmente.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua, posteriormente ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo a la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida, la forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento

(movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N°4 (4.75mm) de una muestra de agregados pétreos.

Peso específico

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa un mayor espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto.

Por consiguiente, para poder cubrir todas las partículas de agregado, mas asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto

porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado.

La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación, es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego, restando de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformará la mezcla; el resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra. Todos los agregados son hasta cierto punto porosos.

Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

Peso específico bulk.

Peso específico aparente.

Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

2.5. CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente

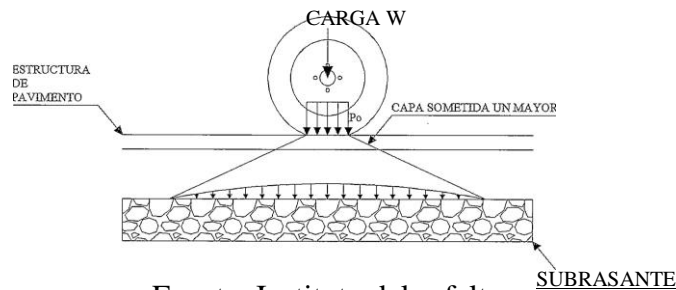
considerada como un factor de calidad, sin embargo, este no es el caso necesariamente para mezclas en caliente para pavimento. Una estabilidad extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados, y viceversa.

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 2.4.

Figura 2.4 Distribución de esfuerzos



Fuente: Instituto del asfalto

2.5.1. Ensayos realizados a los agregados

2.5.1.1. 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 2.6 Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría.

Designación de tamices			
Para agregados gruesos		Para agregados finos	
Sistema métrico (mm)	Sistema habitual norteamericano	Sistema métrico (mm)	Sistema habitual norteamericano
63.00	2 ½ "	2.360	N° 8
50.00	2"	1.180	N° 16
37.50	1 ½ "	0.600	N° 30
25.00	1 "	0.300	N° 50
19.00	¾ "	0.150	N° 100
12.50	½ "	0.075	N° 200
9.50	3/8 "		
4.75	N° 4		

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

2.5.1.2. 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.

2.5.1.3. 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).

2.5.1.4. 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.

2.5.1.5. 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.

2.5.1.6. 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.

2.5.1.7. 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.

2.5.2. Especificaciones que deben cumplir los agregados

2.5.2.1. 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 2.7 Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso

Nº	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	ASTM D 5821	75 % máx
4	Planas y alargadas	ASTM D 4791	10 % máx

Fuente: Elaboración Propia.

2.5.2.2. 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 2.8 Especificaciones que debe cumplir el agregado fino

Nº	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35 % min
2	Equivalente de arena	AASHTO T 176	45 % min
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 2.9 Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29

Graduación del agregado fino						
Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), masa, %				
Nº	(mm)	Graduación Nº 1	Graduación Nº2	Graduación Nº 3	Graduación Nº4	Graduación Nº5
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

2.6.- CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas preparadas en laboratorios deben ser analizadas para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento, determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Dentro de las principales características que se pueden mencionar que están presentes en una mezcla asfáltica de calidad tenemos:

- Densidad
- Vacíos de Aire
- VMA (Vacíos en el Agregado Mineral)
- Contenido de Asfalto
- VFA (Vacíos Llenos de Asfalto)
- Estabilidad y flujo

Densidad.- La densidad de una mezcla asfáltica afecta a la mayoría de las pruebas de estabilidad; sin embargo, la estabilidad máxima no ocurre siempre a la densidad máxima determinada antes de la prueba. Las temperaturas a las cuales se determinan la densidad y la estabilidad, generalmente, no son iguales. La densidad de una mezcla asfáltica determina el grado de compactación del pavimento y esto nos indica si la compactación fue la adecuada en el proyecto.

Cabe mencionar que tanto la densidad como los vacíos de aire se encuentran relacionados entre sí, por lo que son inversamente proporcionales, mientras la densidad sea menor, el porcentaje de vacíos en la mezcla aumentará, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua, mientras que si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrará en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable.

Vacíos de aire.- Los vacíos de aire en una mezcla asfáltica son todos aquellos espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregados pétreos con asfalto, una vez la mezcla asfáltica ya fue compactada.

El principal uso que tienen los vacíos de aire en una mezcla asfáltica es que es uno de los parámetros en los métodos de diseño y para la evaluación de la compactación en los diferentes proyectos de compactación

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor será la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona conductos a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro.

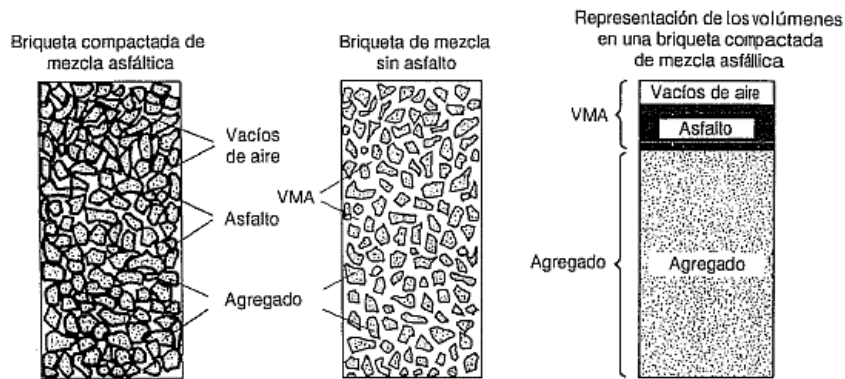
Vacíos en el agregado mineral (VAM)¹.- Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos

¹ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág. 60

necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA 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 cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

Figura 2.5 Ilustración del VMA en una probeta de Mezcla compactada



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

Asphalt Institute

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca.

Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

Figura 2.6 Porcentaje mínimo de VMA

Tamaño máximo en (mm) Porcentaje		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento ³		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	Nº. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	Nº. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	Nº. 4	16.0	17.0	18.0
9.50	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

¹ Especificación normal para tamaños de tamices usados en pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)
² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más de 10 % del material.
³ Interpola el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

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

Asphalt Institute

Contenido de asfalto.- El contenido de asfalto es una de las principales características que debe tener la mezcla asfáltica, ya que si se agrega poca cantidad de la que regularmente es, la mezcla podría resultar con una apariencia seca, granular, de recubrimiento defectuoso y los rodillos no la compactarían de una forma satisfactoria, mientras que si el contenido de asfalto es en exceso la mezcla asfáltica se vuelve densa y flexible por lo que la carpeta de rodadura puede llegar a sufrir ondulaciones en el terreno y puede disminuir su resistencia.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran parte de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Es decir, entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir

uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados de gran tamaño) exigen menos asfalto debido a que poseen menor área superficial total.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado.

Vacíos llenos de asfalto (VFA).- Es toda aquella porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción que resulta de quitarle el volumen de vacíos de aire al volumen de vacíos en agregado mineral.

En otras palabras, podemos mencionar que los vacíos llenos de asfalto son la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene lígate asfáltico.

Estabilidad y flujo.- La norma AASHTO T 245 establece el procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo de una mezcla. En ella se define como estabilidad, a la carga máxima que puede soportar una probeta hecha de la mezcla en cuestión, al ser comprimida en los cabezales de prueba. El flujo, es el valor de la deformación que sufre la probeta mientras es cargada.

Se necesita un valor equilibrado de estabilidad, pues un valor alto pronostica una baja durabilidad, mientras que un valor muy bajo podría indicar que la mezcla es muy susceptible al ahuellamiento.

2.7.- PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Cada tipo de mezcla asfáltica tiene propiedades intrínsecas diferentes, por lo que sus campos de aplicación también lo son. En principio, no es posible proyectar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras depende de la funcionalidad y estructura del pavimento. Las buenas mezclas asfálticas trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Las propiedades de las mezclas asfálticas son las siguientes:

Estabilidad.- La estabilidad es la primera característica que debe tenerse en cuenta en

toda mezcla asfáltica, ya que ésta tiene la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito, sin producir deformaciones excesivas. Se dice que un pavimento es estable cuando este es capaz de mantener su forma bajo las cargas repetitivas de tráfico.

Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para soportar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exigen las condiciones de tránsito.

Valores muy altos de estabilidad indican la presencia de un pavimento demasiado rígido y por lo tanto menos durable de lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna en las partículas de agregado que está relacionada con las características propias de los agregados pétreos, tales como su forma y textura superficial.

Durabilidad.- La durabilidad de una mezcla asfáltica tiene como habilidad resistir efectos tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, tránsito o una combinación de ambos. Generalmente la durabilidad de una mezcla asfáltica puede ser mejorada de tres formas:

Utilizando la mayor cantidad de asfalto posible.

Usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y diseño.

Compactando la mezcla asfáltica para obtener la máxima impermeabilidad.

Una mayor cantidad de asfalto aumenta la durabilidad debido a que las películas gruesas de asfalto no envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas.

En consecuencia, el asfalto retiene por más tiempo sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua.

Flexibilidad.- Es la capacidad de una mezcla asfáltica para acomodarse sin que se produzcan agrietamiento por movimiento y/o asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido al fenómeno de asentamiento que sufren la mayoría de carreteras en las capas inferiores de la estructura de pavimentos, cuando estas son sometidas a cargas de tránsito; en caso contrario, cuando se producen expansiones debido a la temperatura. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es generalmente más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

Se debe prever que las mezclas asfálticas puedan extenderse en capas de reducido espesor (menor a 10 cm.) o sobre superficies de rodamiento ya existentes, por lo que estas deben poseer la suficiente flexibilidad para que no se rompan o fisuren con excesiva rapidez (fatiga prematura).

Impermeabilidad.- La impermeabilidad de una mezcla asfáltica es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento; la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas asfálticas compactadas, todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras poseen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptado siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

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

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y

rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla asfáltica, como en curvas pronunciadas, tapas de alcantarillas y obstáculos similares.

Resistencia al deslizamiento.- La resistencia al deslizamiento de una mezcla asfáltica tiende a minimizar el resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para lograr una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en lugar de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento, fenómeno conocido como hidropneumático.

La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de graduación abierta, con un tamaño máximo de 9.5mm (3/8") – 12.5mm (1/2").

Resistencia a la fatiga.- La resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica es la resistencia a la flexión repetida bajo cargas de tránsito. Estudios han demostrado que los vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga, por lo que a medida que aumenta el porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica, ya sea por diseño o por falla de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga.

Se dice que el comportamiento de la mezcla asfáltica frente a las bajas temperaturas y altas velocidades, es fundamentalmente elástico, pero la repetición de cargas generalmente muy inferiores a la de rotura, produce un agotamiento progresivo por fatiga del material. La fatiga se traduce en un aumento de las deformaciones elásticas en superficie y cuando se llega a un avanzado estado de la misma se pueden observar agrietamientos generalizados denominados comúnmente piel de cocodrilo. (Pavimentación Asfáltica Formación Básica para ingenieros, 2008)

2.8. COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Como se mencionó, la mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos y asfalto; por tanto, el comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado tanto por las

propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación de ambos componentes dentro del sistema. En los siguientes párrafos se explica brevemente el comportamiento de cada uno de los componentes de la mezcla, así como su comportamiento en conjunto.

2.9. COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Con respecto al comportamiento de la mezcla asfáltica, las características más importantes del cemento asfáltico son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad, y el envejecimiento. De las tres anteriores, la que sobresale es la susceptibilidad a la temperatura, ya que sus propiedades mensurables dependen de ésta.

La cantidad de asfalto que fluye podría ser la misma para una hora a 60 °C o 10 horas a 25 °C. En otras palabras, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados; el comportamiento a temperaturas altas en periodos de corto tiempo, es equivalente al que ocurre a temperaturas bajas y duraciones largas.

Figura 2.5 Comportamiento del flujo del asfalto



Fuente: Paul Garnica Anguias, Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas

A altas temperaturas (>100 °C), o bajo carga sostenida (por ejemplo, movimientos lentos, o estacionamiento de camiones), el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso, es decir, tiene un comportamiento plástico. La viscosidad es la característica física del material usada para describir la resistencia de un líquido a fluir, y también se emplea para expresar la diferencia entre las fuerzas resistentes y la velocidad relativa con que fluye una capa con respecto a otra en el cemento asfáltico caliente.

A bajas temperaturas ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bajo cargas aplicadas rápidamente (por ejemplo, movimiento rápido de camiones), el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico; cuando es cargado se deforma y cuando es descargado regresa a su forma original.

Aunque el cemento asfáltico es un sólido elástico a bajas temperaturas, éste puede llegar a ser muy frágil y agrietarse cuando es cargado excesivamente. Por esta razón, el agrietamiento a bajas temperaturas, algunas veces ocurre durante el invierno.

En el pavimento en servicio, la temperatura que se presenta normalmente es intermedia respecto a los extremos mencionados previamente. En este rango de temperaturas, el asfalto presenta ambas características, las de un fluido viscoso y las de un sólido elástico. Debido a esta amplitud de comportamiento, el asfalto es un excelente material adhesivo en la pavimentación.

Después de que se enfría, el asfalto actúa como un pegamento que mantiene al agregado junto en una matriz sólida. En esta etapa, el comportamiento se conoce como viscoelástico; tiene ambas características, dependiendo de la temperatura y la velocidad de la carga.

Otra característica importante del asfalto es su composición química, pues debido a que está compuesto por moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente produciéndose la oxidación, y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se vuelve más dura y frágil, y da origen al término endurecimiento por oxidación, o endurecimiento por envejecimiento.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para el mezclado y la compactación. Esta propiedad explica el por qué la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos que se construyen en lugares con climas cálidos y desérticos.

Otra forma de endurecimiento es la volatilización y el endurecimiento físico. La

volatilización ocurre durante el mezclado y la construcción, cuando los componentes volátiles del asfalto tienden a evaporarse. El endurecimiento físico se presenta cuando el cemento asfáltico se expone a bajas temperaturas por periodos largos. Cuando la temperatura se estabiliza a un valor bajo constante, el cemento asfáltico continúa contrayéndose y endureciéndose. El endurecimiento físico es más notable a temperaturas menores a 0 °C (Asphalt Institute SP-1, 1996).

2.9. COMPORTAMIENTO DEL AGREGADO MINERAL

Los agregados minerales para elaborar la mezcla asfáltica pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales o glaciares, y utilizados sin ningún procesamiento para elaborar la mezcla asfáltica. Los agregados triturados se explotan en canteras, y reducidos a los tamaños deseados mediante trituración mecánica; mientras que el agregado sintético es un subproducto industrial, como la escoria de altos hornos.

Figura 2.6 Agregados pétreos de trituración



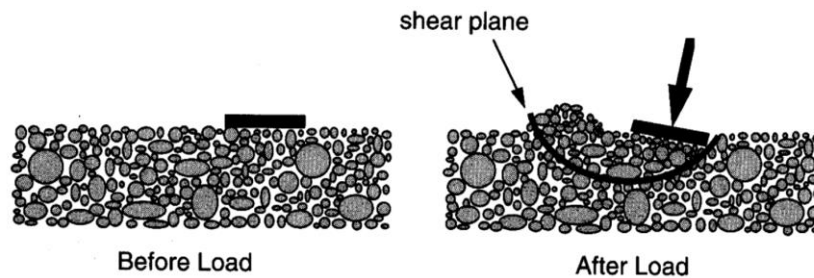
Fuente: Elaboración Propia

Independientemente de la fuente; en los métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir aplicaciones de carga repetidas.

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, producen mayor resistencia que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna que una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una masa más compacta de material.

Las partículas redondeadas, en vez de trabarse tienden a deslizarse unas sobre otras. Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas se deslicen o cizallen unas respecto de las otras (Figura 2.9) lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado es de especial importancia en la mezcla asfáltica.

Figura 2.7 Comportamiento del agregado sometido a carga de corte



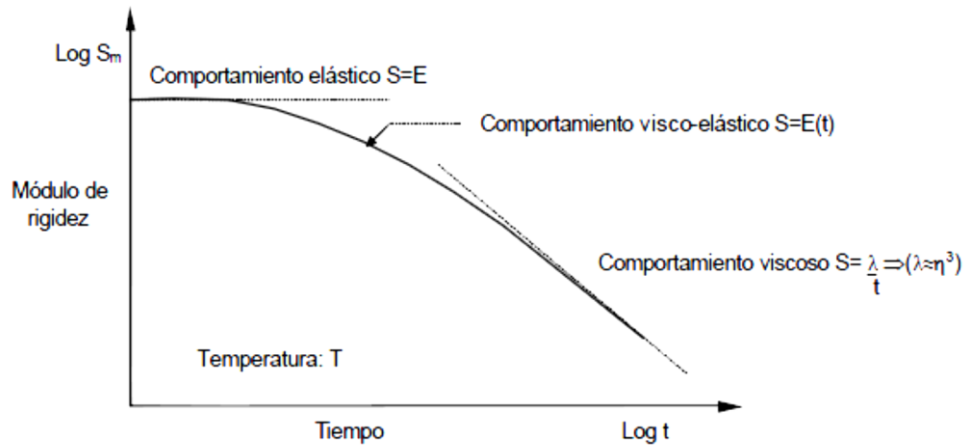
Fuente: Delgado, 2005

Por otro lado, al someter una masa de agregado a tensiones de corte, las partículas deben fracturarse o arrastrarse unas sobre otras si se produce un desplazamiento. Este fenómeno se llama dilatancia, pues resulta en una expansión o incremento de volumen de la masa de agregados. Los materiales resistentes, con una mayor densificación y alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles (Asphalt Insitute SP-2, 1996).

2.10. COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Como resultado de la naturaleza de la integración de los comportamientos de sus componentes, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico (Figura 2.10). Por un lado, el agregado pétreo tiene un comportamiento elastoplástico y por el otro, el mástico (asfalto más polvo mineral) tiene un comportamiento viscoelástico. Por tanto, las mezclas asfálticas poseen un comportamiento que se puede llamar visco-elástico-plástico (Cepeda, 2002).

Figura 2.8 Comportamiento mezcla asfáltica en función al tiempo de acción de carga



Fuente: Paul Garnica Anguias, Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas

2.11. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

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

Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.

Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.

Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.

Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

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

de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.11.1. Demanda de asfalto para la combinación de agregados

Puede determinarse por el ensayo CKE (equivalente centrífugo de kerosene) o estimarse con la fórmula empírica:

$$Pc = 0.035 a + 0.045 b + K c + F$$

Donde:

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total.

a = Porcentaje de agregado, mayor a 2.36 mm(Nº8).

b = Porcentaje de material entre 2.36 mm y 75µm (Nº8 y Nº 200).

c = Porcentaje de partículas menores a 75µm (Nº 200).

K = 0.15 si el porcentaje inferior a 75 µm está entre 11 y 15; 0.18 si su porcentaje está entre 6 y 10; 0.20 si es menor o igual a 5.

F = Varía entre 0 y 2 % de acuerdo a la absorción del agregado. La fórmula se basa en un peso específico promedio de 2.60 a 2.70. Si no se dispone información, se puede tomar un valor de 0.7 a 1.0, rango dentro del cual se encuentran la mayoría de los casos.

2.11.2. Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla

La cantidad de asfalto nuevo por adicionar en las mezclas recicladas es igual a la demanda total, menos el porcentaje de asfalto del pavimento asfáltico recuperado.

$$Pr = Pc - Pa * \frac{Pp}{100}$$

Donde:

Pr = Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla.

Pa = Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada del pavimento.

Pp = Porcentaje en que interviene el pavimento asfáltico recuperado dentro de la mezcla reciclada.

Si se requiere expresar el porcentaje de asfalto como porcentaje con respecto al peso de los agregados:

$$Pa = \frac{100 * Pr}{100 - Pr}$$

2.11.3. Tanteos de diseño de la mezcla y selección de la fórmula de trabajo

Se hacen tanteos utilizando el método Marshall. El contenido de asfalto se puede ajustar cambiando la cantidad de asfalto nuevo, hasta llegar a una mezcla que cumpla con el criterio del procedimiento de diseño utilizado.

2.11.4. Método de diseño Marshall

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

Dicho cuerpo de ingenieros decidió adoptar el método Marshall, y desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito y de estudios de correlación, en el laboratorio, el cuerpo de ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento del ensayo Marshall y posteriormente desarrolló criterios de diseño de mezclas.

El propósito del método Marshall, es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, solo se aplica a mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contienen

agregados con tamaños máximos de 25.00 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El ensayo Marshall usa probetas de dimensiones normalizadas de 4" (10 cm) de diámetro por 2.5" (6.3 cm) de altura. Sobre esta muestra se hace un análisis de densidad-vacíos y estabilidad-flujo. La máxima resistencia que la muestra puede desarrollar a 60 C es la estabilidad Marshall. El movimiento total, medido en 0.25 mm de incremento, que ocurre entre la carga cero y la carga máxima es el flujo de la mezcla. Se aceptan como mínimo estabildades de 500 lbs (227 kg o 2.22 KN). El contenido de vacíos oscila entre 3 % a 5 %.

A continuación, se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall.

2.11.4.1. Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

AASHTO T 245

Diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe de tener la mezcla asfáltica de pavimentación, y seleccionar un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez efectuado lo anterior, se procede con la preparación de ensayos.

2.11.4.2. Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las de asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinan la fórmula para la mezcla de pavimentación. La receta será extraída solamente si los

ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

2.11.4.3. Preparación del agregado

La relación del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas del mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

Secado del agregado

El método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos. Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a temperatura de 110 °C (230 °F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa, y se registra su valor.

La muestra se calienta por segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir

una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

- 1) Cada muestra de agregado es secada y pesada.
- 2) Luego cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (No. 200), para remover cualquier polvo mineral que este cubriendo el agregado.
- 3) Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
- 4) El peso seco de cada muestra es registrada. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

Determinación del Peso Específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esta sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregados, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

2.11.4.4. 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

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 pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no 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 briqueta 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.

2.11.4.5. 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.

2.11.4.6. 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.

2.11.4.7. 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 briqueta 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.

2.11.4.8. 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.

2.11.4.9. 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.

2.11.4.10. 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.

2.11.4.11. 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/m^3 (62.4 lb/ft^3).

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.

2.12. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

En el mundo la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga. Para modificar dichas propiedades, la tendencia actual es adicionar al asfalto (vía húmeda) o a la mezcla asfáltica (vía seca) aditivos poliméricos productos de desechos industriales con el fin de mitigar el impacto ambiental que éstos producen.

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad,

cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento.

Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Forigua, 2014).

Los ligantes asfálticos tradicionales tienen limitaciones en su respuesta a las cargas que día a día aumentan su frecuencia y su intensidad, sin olvidar la acción del clima que en muchos proyectos han generado ondulamientos y agrietamientos prematuros. En consecuencia es necesario buscar y desarrollar materiales más resistentes que alarguen el periodo de servicio y disminuyan los gastos de conservación. Los ligantes modificados han demostrado capacidad para mejorar el comportamiento de los tradicionales, dando la oportunidad de adecuarlos a unas condiciones específicas de respuesta en los proyectos.

Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se realizarán ensayos Marshall, módulo dinámico y deformación permanente. Para el cemento asfáltico (CA) con y sin aditivo se realizarán ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad.

Un número de factores que incluyen el clima y la carga de tráfico influyen en el rendimiento de pavimento flexible. Hay una necesidad urgente de contar con la especificación basada en el desempeño y el uso de innovadores materiales de alto rendimiento para la construcción de pavimentos bituminosos. Al mejorar la resistencia y durabilidad de las mezclas, la reducción del espesor de la capa y el aumento de la vida media puede ser conseguida.

En síntesis existen en el mundo dos técnicas de utilización de polímero o aditivos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas. A estas técnicas de modificación se les denomina vías húmeda o seca. Por vía húmeda, el polímero o aditivo es agregado al asfalto a alta temperatura y, luego este ligante ya modificado es adicionado al

agregado pétreo para conformar la mezcla asfáltica. Por vía seca, el aditivo reemplaza parte del agregado pétreo y se adiciona a este a alta temperatura para luego recibir el asfalto y formar la mezcla asfáltica.

2.13. MEZCLA ASFÁLTICA DENSA, SEMIDENSA Y ABIERTA ADICIONADA CON POLIPROPILENO

De esta manera se puede observar en Bolivia en una escala menor que en otras partes del mundo, el ingreso de aplicaciones en los pavimentos con estructuras modificadas desde la estructura de pavimento como en su capa de rodadura, hallando un buen aliado en los polímeros ya que aportan para mejorar aspectos que alargan la vida de operación de un proyecto vial.

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos porque son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son utilizados para modificar asfaltos ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo (estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de los plastómeros se encuentran entre otros: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y el Policloruro de vinilo (PVC).

2.13.1. Mezcla asfáltica Densa, Semidensa y Abierta

Este trabajo consiste en la elaboración, transporte, colocación y compactación, de una o más capas de mezcla asfáltica, preparada y colocada en caliente, de acuerdo con esta especificación y de conformidad con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los planos. Esta Sección cubre las mezclas asfálticas en caliente de tipo denso (MD), semidenso (MS), y grueso (MG), diferenciadas por su granulometría y

campo de aplicación, como se define más adelante. Asimismo, comprende las mezclas en caliente de alto módulo (MAM), entendiéndose por tales aquellas cuyo módulo resiliente, medido por medio de la norma de ensayo INV E- 749-07 a 20° C y una frecuencia de 10 Hz, sea superior a diez mil megapascuales (10,000 MPa).

La granulometría del agregado obtenido mediante la combinación de las distintas fracciones, incluido el llenante mineral, deberá estar comprendida dentro de alguna de las franjas fijadas en la Tabla 10. El análisis granulométrico se deberá efectuar de acuerdo con la norma INV E-213.

Tabla 2.10 Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29

Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente

Tipo de Mezcla		Tamiz (mm/U.S. Standard)									
		37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
		1 ½ "	1 "	¾ "	½ "	3/8 "	N° 4	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semi densa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto modulo	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo		0	4 %					3 %			2 %

Fuente: Norma INV E-213

Para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la presente especificación, el material que produzca el Constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del

tamiz adyacente y viceversa.

Las mezclas en caliente objeto del presente artículo se diseñarán, salvo justificación en contrario, por el método Marshall, efectuando el ensayo de estabilidad y flujo en acuerdo con la Norma de Ensayo INV E-748 y utilizando los procedimientos de cálculo establecidos en la Norma de ensayo INV E-799. En todos los casos, se evaluarán las propiedades de empaquetamiento de los agregados en la mezcla, mediante el método Bailey. Los criterios para la definición preliminar del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, son los indicados en la Tabla 2.11. El diseño preliminar de la fórmula de trabajo, obtenida a partir de los requisitos establecidos en la Tabla 2.11 deberá ser sometido a una primera comprobación, con base en los criterios de la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall

Característica		Norma de ensayo INV	Mezcla densas semi densas gruesas			Mezcla de alto modulo
			Categoría de transito			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima (kg)		E-748	500	750	900	1500
Flujo (mm)		E-748	2 - 4	2 - 4	2 - 3.5	2 - 3
Vacíos con aire (v1)*,%	rodadura	E-736 o E-799	3 - 5	3 - 5	4 - 6	-
	intermedia		4 - 8	4 - 8	4 - 7	4 - 6
	base		-	5 - 9	5 - 8	-
Vacíos en los agregados minerales (VAM) %	mezcla 0	E-799	≥13	≥13	≥13	-
	mezcla 1		≥14	≥14	≥14	≥14
	mezcla 2		≥15	≥15	≥15	-
	mezcla 3		≥16	≥16	≥16	-
% de vacíos llenos de asfalto(VFA) (volumen de asfalto efectivo/vacíos en los agregados minerales) x 100 capas de rodadura e intermedia		E-799	65 - 80	65 - 78	65 - 75	63 - 75
Relación llenante/ asfalto efectivo, en peso		E-799	0.8 - 1.2			1.2 - 1.4

Concentración de llenante valor máximo	E-745	Valor critico
--	-------	---------------

Fuente: Norma INV E-799

2.13.2. POLIPROPILENO

El polipropileno (PP) empezó a comercializarse a finales de la década del '50 y se ha convertido en el polímero termoplástico de mayor producción mundial. Actualmente, el PP se utiliza para fabricar desde el paragolpes de un auto hasta el tejido que recubre los pañales descartables, pasando por tuberías, fibras, cajas, envases, films, juguetes y un larguísimo etcétera. La gran versatilidad de este material se debe a su estructura química y disposición espacial, que le confieren un gran número de cualidades deseables. Se trata del polímero comercial de menor densidad, posee una excelente resistencia química, buenas propiedades eléctricas derivadas de su a polaridad, inercia química y biológica, alta estabilidad térmica, es de fácil procesamiento y admite ser reciclado. Sin embargo, el PP posee ciertas desventajas que limitan su aplicación en altas prestaciones. Estas limitaciones se deben a su baja tenacidad a la fractura especialmente cuando es solicitado a bajas temperaturas y en condiciones de impacto.

El Polipropileno es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del polipropileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo. Todo esto desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión. El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos (homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto), los cuales pueden ser modificados y adaptados para determinados usos.

2.13.2.1 Características

El polipropileno (PP), es un polímero termoplástico de gran consumo y su aplicación han crecido significativamente debido a que es un polímero muy versátil, es decir, posee gran capacidad para ser modificado y diseñado para distintas aplicaciones específicas. Debido a su comportamiento térmico y geológico, cuando se encuentra fundido, puede ser procesado en un amplio intervalo de condiciones que van desde el moldeo por inyección hasta el soplado. Su baja densidad en el mercado, tanto por sus

propiedades mecánicas como por su baja relación costo/volumen. Los productos de polipropileno poseen una mayor flexibilidad y simplicidad para el reciclado, debido a su alta resistencia química y medio ambiental, y su baja densidad que favorece la separación de otros materiales.

Óptima relación costo / beneficio.

Versatilidad: compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como, packaging, industria automotriz, textiles, menaje, medicina, tuberías, etc.

Buena procesabilidad: es el material plástico de menor peso específico ($0,9\text{g/cm}^3$), lo que implica que se requiere de una menor cantidad para la obtención de un producto terminado.

Barrera al vapor de agua: evita el traspaso de humedad, lo cual puede ser utilizado para la protección de diversos alimentos.

Buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia

2.13.2.2 Propiedades

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas del polipropileno le permiten ser aplicado en una amplia variedad de productos formados mediante procesos de extrusión o de inyección. El polipropileno (PP) es una poliolefina que se sintetiza mediante catálisis a partir del polipropileno para formar un homopolímero o copolímero con otras olefinas.

Propiedades físicas:

La densidad del polipropileno, está comprendida entre 0.90 y 0.93gr/cm^3 . Por ser tan baja permite la fabricación de productos ligeros.

Es un material más rígido que la mayoría de los termoplásticos. Una carga de 25.5kg/cm^2 , aplicada durante 24hrs no produce deformación apreciable a temperatura ambiente y resiste hasta los 70°C .

Posee una gran capacidad de recuperación elástica.

Tiene una excelente compatibilidad con el medio.

Es un material fácil de reciclar

Posee alta resistencia al impacto

Propiedades mecánicas:

Puede utilizarse en calidad de material para elementos deslizantes no lubricados.

Tiene buena resistencia superficial.

Tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse.

Tiene buena dureza superficial y estabilidad dimensional.

Propiedades químicas:

Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos.

Presenta poca absorción de agua; por lo tanto, no presenta mucha humedad.

Tiene gran resistencia a soluciones de detergentes comerciales.

El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV (salvo estabilización o protección previa).

Punto de Ebullición de 320°F (160°C)

Punto de Fusión (más de 160°C)

2.14 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 2.12 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: The Asphalt Institute.

Tabla 2.13 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: The Asphalt Institute.

Requisitos del agregado pétreo

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

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

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 2.15 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.

Requisitos del ligante asfáltico

Tabla 2.16 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 ^[1])	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 ^[1]), 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.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. ANTECEDENTES GENERALES

A través de los años se observa el buen comportamiento de los polímeros como modificador del asfalto, en mezclas calientes se ha encontrado incremento en la estabilidad de Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo de rigidez y fatiga, dando mejoras en las propiedades reológicas de los asfaltos (Alataş & Yilmaz, 2013), lo cual se ve convertido en mayores tiempos de servicio y disminución en daños por envejecimiento e impacto de factores climáticos, lo cual genera la expectativa de encontrar buenos resultados en el proyecto

El presente proyecto de investigación se enfoca en el empleo de Polipropileno y como mejorador de la mezcla asfáltica para su uso en la construcción de pavimentos flexibles; se realizará diseños como propuesta de mejorar las mezclas asfálticas densas, semidensas y abiertas. Los materiales de asfaltos modificados son el producto de la disolución o en la incorporación de materiales nuevos en la mezcla, son sustancias estables, en el tiempo y cambio de temperatura; que se le añaden al material para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, mejorando su reacción frente a cambios bruscos de cargas y temperaturas.

Por esta razón existen varios trabajos a nivel internacional que tratan el tema del uso de polímeros en la construcción. La estabilidad que presentaron las mezclas con polipropileno fue más alta que en las mezclas con agregado tradicional, contribuyendo a la durabilidad del pavimento, volviéndolo más resistente a la deformación causada por el tráfico.

Los ensayos realizados y la profundidad en el análisis, buscando obtener el valor óptimo que mejore las resistencias mecánicas de las mezclas asfálticas densas, semidensas y abiertas.

3.2 RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE APLICACIÓN.

En cuanto al sitio de aplicación podemos establecer que se desarrollará en dos etapas, la primera etapa de campo y la segunda etapa de laboratorio y gabinete.

En cuanto a la primera etapa consiste en reconocer en campo el lugar preciso de donde se extraerá la muestra en la cantidad suficiente para realizar tanto la caracterización como el estudio.

Los materiales componentes a utilizarse en el diseño de la mezcla asfáltica se ubican en el acopio de la planta SEDECA - SAN JOSÉ DE CHARAJA, ubicada en la comunidad del mismo nombre.

Figura 3.1 Recolección del agregado chancadora Charaja.



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, Suelos y Hormigones Consultora y laboratorio S.A.H donde se realizarán todas las pruebas necesarias con los materiales y equipos adecuados, para un posterior procesamiento de datos.

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 emulsión asfáltica que vamos a diseñar en esta investigación.

A continuación, están descritos cada uno de los ensayos de los agregados, emulsión asfáltica y POLIPROPILENO, su procedencia, con imágenes gráficas y su comparativa con respecto a las normas y especificadores técnicas usadas.

UBICACIÓN

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



Fuente: <http://www.turismo.tarija.gob.bo/index.php/es/tarija/mapa-politico>

3.2.2 Ubicación en el contexto regional

El proyecto de investigación se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija en el campus universitario de la U.A.J.M.S.



Fuente: <http://cercadoop.blogspot.com/2015/01/cercado.html>

Ubicación del banco de materiales

Imagen Ubicación de la comunidad de San José de Charaja



Fuente: Programa Google Earth

Imagen Ubicación de la chancadora de Charaja



Fuente: Programa Google Earth

Imagen Croquis de ubicación del acopio de agregados pétreos



Fuente: Programa Google Earth

3.3 OBTENCIÓN DEL POLIPROPILENO

3.3.1 Material polipropileno

Este material para su recolección fue extraído de los tubos de polipropileno que se comercializa ya que no fue complicado conseguir; se realiza en primera instancia el corte del polipropileno en forma manual, y luego se procede a limar para obtener limaduras pequeñas que será adicionada como filler en la mezcla asfáltica como se puede observar en la figura 3.2.

Figura 3.2 Polipropileno



Fuente: Elaboración Propia

3.4. MATERIAL DE APORTACIÓN

3.4.1 AGREGADOS

3.4.1.1 DISEÑO GRANULOMÉTRICO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS, SEMIDENSAS Y ABIERTAS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (DOCUMENTO REFERENCIAL ASTM D422 – AASHTO T88)

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas pueden denominarse densas, open-graded o gap-graded. Estas denominaciones dependen de la granulometría de la mezcla. Todo diseño de mezclas asfálticas parte del diseño de los agregados.

Los agregados pueden proceder de diferentes canteras, la calidad de los materiales deberá ser evaluado en el laboratorio para verificar si cumple con las especificaciones técnicas.

Objetivo

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz #200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.1: Resumen de resultados de granulometría grava, gravilla y arena
Mezcla Densa

AGREGADO		Grava - Triturada		Gravilla - Tritura		Arena Triturada - Charaja		% QUE PASA	FAJA		
% USADO		34%		18%		48%			ESPECIF. GRAD. MEDIA	INF.	SUP.
TAMICES		% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.				
PULG	mm.										
1"	25,40	100,0	34,0	100,0	18,0	100,0	48,0	100,0	100	100	
3/4"	19,10	75,0	25,5	100,0	18,0	100,0	48,0	91,5	80	95	
1/2"	12,50	40,6	13,8	100,0	18,0	100,0	48,0	79,8	67	87	
3/8"	9,50	12,2	4,1	98,8	17,8	100,0	48,0	69,9	60	77	
#4	4,75	2,0	0,7	31,6	5,7	98,2	47,1	53,5	43	59	
#10	2,000	1,1	0,4	3,1	0,6	76,9	36,9	37,8	29	45	
#40	0,425	0,8	0,3	0,9	0,2	37,3	17,9	18,3	14	25	
#80	0,180	0,5	0,2	0,6	0,1	24,1	11,6	11,9	8	17	
#200	0,075	0,4	0,1	0,4	0,1	10,5	5,1	5,3	4	8	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2 Resumen de resultados de granulometría grava, gravilla y arena
Mezcla Semidensa

AGREGADO		Grava - Triturada		Gravilla - Tritura		Arena Triturada - Charaja		% QUE PASA	FAJA		
% USADO		42%		18%		40%			ESPECIF. GRAD. MEDIA	INF.	SUP.
TAMICES		% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.				
PULG	mm.										
1"	25,40	100,0	42,0	100,0	18,0	100,0	40,0	100,0	100	100	
3/4"	19,10	75,0	31,5	100,0	18,0	100,0	40,0	89,5	80	95	
1/2"	12,50	40,6	17,0	100,0	18,0	100,0	40,0	75,0	65	80	
3/8"	9,50	12,2	5,1	98,8	17,8	100,0	40,0	62,9	55	70	
#4	4,75	2,0	0,8	31,6	5,7	98,2	39,3	45,8	40	55	
#10	2,000	1,1	0,5	3,1	0,6	76,9	30,8	31,8	24	38	
#40	0,425	0,8	0,3	0,9	0,2	37,3	14,9	15,4	9	20	
#80	0,180	0,5	0,2	0,6	0,1	24,1	9,6	10,0	6	12	
#200	0,075	0,4	0,2	0,4	0,1	10,5	4,2	4,5	3	7	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3 Resumen de resultados de granulometría grava, gravilla y arena
Mezcla Abierta

AGREGADO		Grava - Triturada		Gravilla - Tritura		Arena Triturada - Charaja		% QUE PASA	FAJA		
% USADO		50%		18%		32%			ESPECIF. GRAD. MEDIA	INF.	SUP.
TAMICES		% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.	% TOTAL	% ENC.				
PULG.	mm.										
1"	25,40	100,0	50,0	100,0	18,0	100,0	32,0	100,0	100	100	
3/4"	19,10	75,0	37,5	100,0	18,0	100,0	32,0	87,5	75	95	
1/2"	12,50	40,6	20,3	100,0	18,0	100,0	32,0	70,3	55	75	
3/8"	9,50	12,2	6,1	98,8	17,8	100,0	32,0	55,9	40	60	
#4	4,75	2,0	1,0	31,6	5,7	98,2	31,4	38,1	26	46	
#10	2,000	1,1	0,6	3,1	0,6	76,9	24,6	25,7	17	32	
#40	0,425	0,8	0,4	0,9	0,2	37,3	11,9	12,5	7	17	
#80	0,180	0,5	0,3	0,6	0,1	24,1	7,7	8,1	4	11	
#200	0,075	0,4	0,2	0,4	0,1	10,5	3,4	3,6	2	6	

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.2. PESO ESPECÍFICO EN AGREGADOS FINOS DOCUMENTO REFERENCIAL (ASTM C-128)

El método es como sigue:

1. Aproximadamente 1000gr. de agregado fino se seca a peso constante.
2. Se sumerge el material por 24 hrs en agua.
3. La muestra se extiende en una superficie plana y se expone a una corriente de aire caliente.
4. La condición saturada superficialmente seca se alcanza cuando el material cae al invertirse el cono en el que la muestra del material fue suavemente compactada.
5. Aproximadamente 500gr. del material en la condición saturada superficialmente seca se colocan en un matraz que se llena con agua y se eliminan los aires atrapados.
6. El agregado se saca del matraz, se seca al horno a peso constante
7. La gravedad específica se calcula de la siguiente manera:

A peso en el aire del agregado seco al horno

B peso del matraz (picnómetro) con agua

C peso del matraz (picnómetro) con el agregado y agua hasta la marca

D Peso del material saturado superficialmente seco (500+10gr)

$$\text{gravedad específica seca aparente, } G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{gravedad específica seca bulk, } G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$$

$$\text{gravedad específica sat. sup. seca bulk, } G_{ssb} = \frac{D}{B + D - C}$$

$$\text{absorción(\%)} = \left(\frac{D - A}{A} \right) * 100$$

Objetivo

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado fino, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino según ASTM C128-12.

El procedimiento de la práctica se verá en el ANEXO 1

3.4.1.3. PESO ESPECÍFICO EN AGREGADOS GRUESOS (GRAVA, GRAVILLA), ASTM C-127

La gravedad específica del agregado es necesaria para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, la *gravedad específica* de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C (73.4°F). La ecuación usada es:

$$\text{gravedad específica} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen} * \text{peso específico}}$$

Cuando se trabaja en el SI, el peso específico del agua es 1.0gr/cm³, convirtiendo la ecuación de la gravedad específica en:

$$gravedad\ especifica = \frac{peso}{volumen}$$

Además, existen tres diferentes gravedades específicas relacionadas al diseño de mezclas asfálticas en caliente que definen el volumen de las partículas de agregados:

Gravedad Específica Seca Aparente

Gravedad Específica Seca Bulk (Base Seca) y Saturada Superficialmente Seca Bulk2

Gravedad Específica Efectiva

El procedimiento de la práctica se verá en el ANEXO 1

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.4 Resumen de resultados de peso específico Arena, grava, gravilla

AGREGADO	P. E. A GRANEL (gr/cm ³)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
ARENA	2,585	2,614	2,644	1,12
GRAVILLA	2,636	2,662	2,707	1.0

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.4. ENSAYO DE ABRASIÓN POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES" DOCUMENTO REFERENCIAL (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser más resistentes que los agregados usados en capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

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

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

OBJETIVO

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.5 Resumen de resultados de peso específico grava, gravilla y arena

AGREGADO	MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
GRAVA	A				40% MAX
	B	5000,00	3945	21.1	40% MAX
GRAVILLA	C	5000,0	3885	22.3	40% MAX
	D	-	-	-	40% MAX

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.5. EQUIVALENTE DE ARENAS Y AGREGADOS FINOS

(DOCUMENTO REFERENCIAL ASTM D 2419)

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

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

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.6 Resultado del Equivalente de Arena

RESUMEN	
Muestra N°1 =	52,8 %
Muestra N°2 =	50,0 %
Muestra N°3 =	52,2 %
EQUIVALENTE ARENA PROMEDIO =	52,2 %

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.6. DURABILIDAD SULFATO DE SODIO

(DOCUMENTO REFERENCIAL T-104)

Este método de ensayo estima la capacidad de los agregados de disolver cuando están

sujetos a las acciones climáticas en concretos y otras aplicaciones. Esto es conseguido por repetidas inmersiones en solución saturada de sulfato de sodio, seguidas por secado al horno hasta una deshidratación parcial o completa, en donde la sal se precipita en los espacios porosos permeables.

La fuerza de expansión interna, derivada de al rehidratación de la sal en la re-inmersión, simula la expansión del agua en el enfriamiento.

Los valores para el porcentaje de pérdida permitido por este método son usualmente diferentes para agregado grueso y fino.

Solución requerida:

El volumen de la solución debe ser de por lo menos 5 veces el volumen de los sólidos de toda muestra inmersa al mismo tiempo.

Para prevenir la contaminación de la solución con agentes externos y para reducir la evaporación, cuidar que la solución este todo el tiempo cubierta cuando su acceso no sea necesario. Se permite que la solución enfrié hasta una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

Volver a menear y permitir a la solución permanecer en la temperatura designada por lo menos 48 horas antes de usarla.

Previo a cada uso disolver el bollo de sal que hubiere en el contenedor y determinar la gravedad específica que debe estar entre **1,151 y 1,174**.

Muestras:

Agregado Fino

El agregado fino debe pasar el tamiz 3/8plg. La muestra no debe ser menor a 100gr en cada uno de los siguientes tamices.

Agregado grueso

El material más fino que el tamiz N° 4, no es tomado en cuenta

Si las muestras contienen menos de un 5% de cualquiera de los tamaños específicos anteriormente, ese tamaño no debe ensayarse, pero debe considerarse que ese tamaño inferior próximo; o si uno de estos tamaños está ausente, deben considerarse que ese tamaño tiene la misma pérdida que el tamaño inferior próximo o uno superior próximo cualquiera que esté presente.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.7 Resultado del Durabilidad

Agregado	% Pérdida de peso	% Perdida total	Especificación ASTM
Grueso	0.91	2.79	12 % MAX
Fino	1.88		

Fuente: Elaboración Propia

3.5. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLADO

Descripción

Después de haber obtenido los resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85/100 convencional donde se obtendrá resultados que posteriormente serán analizados.

3.5.1 ENSAYO DE PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS.

(DESIGNACIÓN AASHTO: T 49-93) (DESIGNACIÓN ASTM: D 5-86)

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos. Los materiales que tienen penetraciones debajo de 350 pueden ser probados por el aparato normal y con el siguiente procedimiento. Para materiales que tienen penetraciones entre 350 y 500mm, se debe usar un aparato especial.

DESCRIPCIÓN DE TÉRMINO

La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja normalizada penetra verticalmente bajo las condiciones fijas de temperatura, carga y tiempo

RESUMEN DEL MÉTODO

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

Figura 3.3 Realización del ensayo de penetración.



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 2

3.5.2 ENSAYO DE DUCTILIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS.

(DESIGNACIÓN ASTM: D -113)

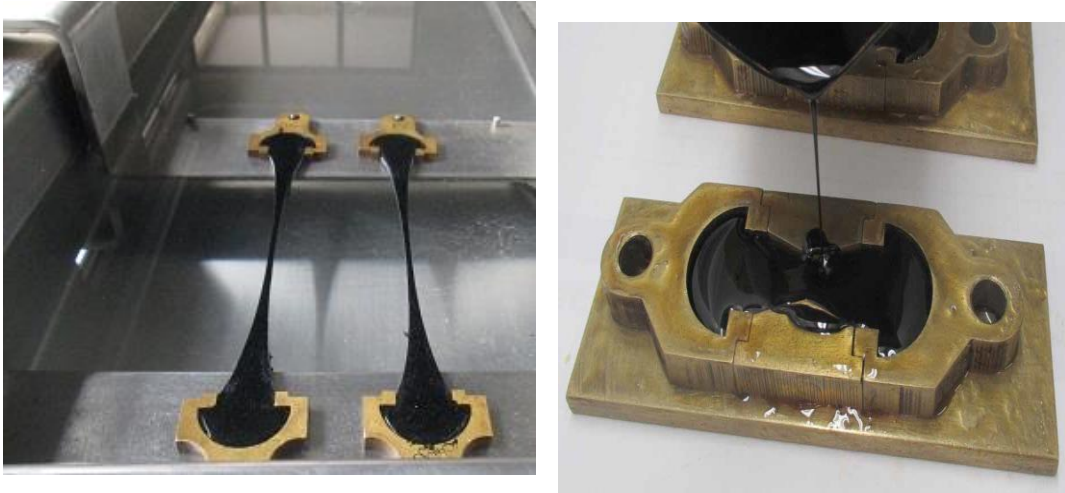
El ensayo de ductilidad, es la distancia en centímetro que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida en un equipo denominado “ductilímetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de ligante asfáltico es extendida o estirada a una velocidad de 5cm/minuto, en baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento del ensayo:

La probeta se monta en el ductilímetro, introduciendo cada pareja de clavijas de los sistemas fijos y móvil en los correspondientes orificios de cada pinza, poniendo a

continuación en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada (ver figura 4-3).

Figura 3.3 Muestras estiradas antes de que se rompan



Fuente: Elaboración propia

El material asfáltico entre las pinzas se va paulatinamente estirado hasta formar un hilo, produciéndose la rotura en un punto en el que el hilo no tiene apenas sección transversal.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 2

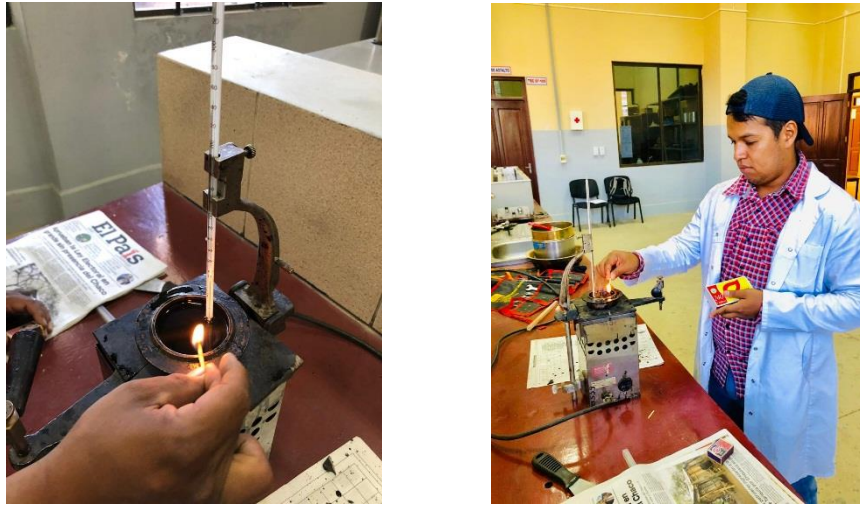
3.5.3 ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN.

(DESIGNACIÓN ASTM: D-92)

El punto de inflamación del ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan sólo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Procedimiento del ensayo:

Figura 3.4 Ejecución del ensayo Punto de Inflamación



Fuente. Elaboración Propia

Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie. No debe confundirse la llama verdadera con el halo azulado que algunas veces rodea la llama de ensayo

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 2

3.5.4 ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT - FUROL.

(DESIGNACIÓN ASTM: E- 102)

Este ensayo se empleó para el cemento asfáltico, en el cual se determinó el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 centímetros cúbicos de líquido, a una temperatura determinada, a través de un tubo de dimensiones específicas. En esta investigación se determina a una temperatura de 135°C.

Figura 3.5 Ejecución de viscosidad Saybolt-Furol



Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 2

3.5.5 ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO.

(DESIGNACIÓN ASTM: D - 70)

El peso específico del ligante asfáltico, material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C.

Procedimiento del ensayo:

Figura 3.6 Ejecución del ensayo peso específico del ligante



Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 2

3.6. CARACTERÍSTICAS DEL POLIPROPILENO - PP

El **polipropileno** es un material cuya ventaja más importante es su excelente resistencia química, especialmente a los reactivos orgánicos y a los ácidos. Es un plástico de aplicaciones similares al polietileno: temas alimenticios y de “contacto” con el ser humano. No absorbe humedad, por lo cual tiene una buena estabilidad dimensional, y tiene buenas cualidades dieléctricas y de aislamiento térmico.

Figura 3.7 Polipropileno para la elaboración de la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración Propia

Es atóxico, por lo tanto puede emplearse en la manipulación de alimentos. Se puede soldar, tiene una gran dureza y rigidez y posee una excelente resistencia al impacto.

PROPIEDADES

Flota. (Densidad $> 1\text{gr/cm}^3$.)

Buen resistente a los agentes químicos.

Buena flexibilidad y elasticidad.

Absorben muy poco agua, casi nada.

Resistencia a la temperatura - Resistencia a la temperatura - Buenos aislantes eléctricos (incluso con altas frecuencias)

Buenos aislantes térmicos.

Elevado Coeficiente de Dilatación Térmica (10 veces la del acero).

Buenas características anti adhesivo.

Sistemas específicos de soldadura.

Fáciles de trabajar a torno o fresadora.

Tabla 3.8 Características Polipropileno

Características Mecánicas	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Densidad	53479	0,91	gr/cm ³
Resistencia a la Tracción	53455	33	gr/cm ³
Resistencia a la Rotura por Alargamiento	53455	650	%
Módulo de Elasticidad a la Tracción	53457	1300	MPa
Dureza Shore D	53505	73	
Resistencia al Impacto	53453	10	KJ/m ²
Coeficiente de Fricción		0,4	

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante

CAPÍTULO IV

DISEÑO, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para conocer y analizar posteriormente la incidencia de agregar porcentajes de Polipropileno, en el cemento asfáltico que afecta en las mezclas asfálticas modificadas se realizó el siguiente procedimiento, que se describe a continuación:

Se realizaron diferentes mezclas modificadas Densas – Semidensas y Abiertas añadiendo distintos porcentajes de Polipropileno, al cemento asfáltico donde se obtuvieron resultados con diferentes porcentajes de Polipropileno obteniendo 3 porcentajes (0.5%, 1%, 1.5%) que se utilizarán para hacer el ensayo Marshall.

4.2. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE.

El diseño de mezcla asfáltica Convencional se realizara según la normativa ABC y para la realización de la mezclas densas, semidensas y abiertas se realizará según la normativa de INVIAS, en su apartado sobre mezclas asfálticas caliente, establece que esté se realizará a partir de probetas cilíndricas del tipo Marshall elaboradas de acuerdo a los procedimientos establecidos en la misma, similar a la norma AASHTO.

4.2.1. Preparación y fabricación de briquetas

Las mezclas asfálticas caliente se diseñan a partir de briquetas cilíndricas tipo Marshall, en general, el número mínimo de briquetas para fabricar es de tres por cada mezcla. En este caso se realizarán tres diseños Marshall cada diseño con cuatro contenidos de asfalto.

4.2.1.1. Preparación de las muestras

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6mm (4plg) de diámetro y 63.5 mm (2 ½plg) de altura, preparado como se describe en la norma.

Figura 4.1 Briquetas de estudio



Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.2. Cálculo de materiales diseño Marshall

Se realizó la dosificación de agregados para cada briqueta que cumpla con la franja granulométrica de especificaciones, el cálculo de materiales se presenta en la Tablas siguientes.

4.2.1.3. Compactación de las briquetas

Se preparó el molde y el martillo, limpiando completamente el conjunto de molde y cara del martillo de compactación, el molde debe de estar previamente calentado antes de colocar la mezcla en el fondo del molde debe encontrarse un papel parafinado que evitará que la mezcla se pegue al martillo compactador, luego se coloca el conjunto collar, molde y base en el pedestal del compactador.

Figura 4.2 Preparación del molde y colocada de la mezcla



Fuente: Elaboración Propia

Para la compactación es utilizado un martillo Marshall formado por una masa de compactación de $3.36 = 20$ grs de masa y un pisón de $4.55 = 20$ grs montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de $460 = 3$ mm. Según la norma NLT 159.

Se llenó el molde con una espátula, acomodando la mezcla en el perímetro y el centro, la temperatura antes de compactar debe estar en los límites establecidos.

Con el martillo de compactación se aplicaron 75 golpes en un tiempo no superior a 90sg. Se saca la base y el collar se invierte y se reensambla el molde, se aplicó en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado.

Inmediatamente después de compactada la briqueta, debe ser removida el papel parafinado.

4.2.1.4 Peso y volumen de las briquetas

Después de ser desmoldadas las briquetas se procede a tomar el peso de cada una de las briquetas a través de una balanza de 0.1g de precisión y cuatro medidas de diámetro y cuatro medidas de altura de las briquetas tomadas por medio de un vernier.

Figura 4.3 Pesado de briquetas en aire y sumergido



Fuente: Elaboración Propia

Las medidas son necesarias para que con el promedio sea obtenido el volumen de la briqueta. Se muestra en la tabla 3-14 los volúmenes y peso de las briquetas ensayadas.

4.2.2 Densidad Bulk

Se determinó la densidad Bulk, de la mezcla asfáltica compactada, a partir de su masa seca (grs) y de su volumen (cm³) y se promediaron los resultados.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Pa}}{\text{Pa} - \text{pag}}$$

Donde:

Pa= Peso de la briqueta en el aire en gramos.

Tal como establece el procedimiento, se midió la altura de la briqueta con especial cuidado y precisión; así mismo, se midió su diámetro en cuatro sitios diferentes y se calculó su promedio.

Se calculó el volumen de la muestra de forma “geométrica” con base en la altura promedio y en la medida del diámetro, mediante la siguiente expresión para el cálculo de volumen de un cilindro.

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

Ya con el volumen fue posible estimar la densidad de la probeta para finalmente convertir la densidad Bulk en gravedad específica Bulk, dividiendo por 0.99707 gr/cm³ o 9997.07 kg/m³, densidad del agua a 25°C (77°F).

4.2.3 Gravedad específica máxima teórica

Se determinó la gravedad específica máxima teórica en base a la norma ASTM D 2041, sobre una mezcla asfáltica comparable, para evitar la influencia de diferencias en la granulometría, contenido de asfalto, etc.

4.2.4. Cálculo de vacíos

Con los resultados anteriores en los que se calculó la gravedad específica Bulk y la gravedad específica máxima teórica se determina el contenido de vacíos para cada contenido de asfalto con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{G_{em} - G_{eb}}{G_{em}} * 100$$

Donde:

G_{em} = Gravedad específica máxima teórica.

G_{eb} = Gravedad específica Bulk (Valor promedio).

4.2.5 Pruebas de estabilidad y fluencia

Después de obtenido el peso específico Bulk de la mezcla compactada, se procede a la ejecución de los ensayos de estabilidad y fluencia, de la siguiente manera:

- a. Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4 debajo del pivote.

- b. Sumergir las briquetas en baño de agua a 60°C (140°F), durante 30 a 40 mnts.
- c. Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a 37,8°C (70 a 100°F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.
- d. Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guiador superior de la mordaza.
- e. Aplicar la carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 plg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newtons (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia).
- f. Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guiador, y retírese en el instante mismo que la carga empieza a decrecer, se anota el valor de flujo en unidades de 0,25mm (0.01). Por ejemplo, si la muestra se deforma 3,8mm (0,15plg), su fluencia será 15.
- g. Se promedian los valores de estabilidad y flujo para todas las muestras con cada contenido de ligante.

Las pruebas de estabilidad y fluencia, a partir de la extracción de los núcleos del baño, no deben durar un tiempo mayor a 30 sg.

4.3. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE DENSAS – SEMIDENSAS Y ABIERTAS.

Para esta investigación se realizó el diseño Marshall, de las mezclas densas, semi densas y abiertas, tanto convencionales como las modificaciones en los siguientes

porcentajes: 0.5%, 1.0% y 1.5% de polipropileno en las cuales se podrá realizar un análisis de sus propiedades mecánicas.

Asimismo se realizó el cálculo del cemento asfáltico para una mezcla convencional con 0% de polipropileno.

La clasificación de la mezcla asfáltica se la hizo en función de la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Franjas Granulométrías Mezclas Asfálticas en Caliente

Tipo de Mezcla		Tamiz (mm/U.S. Standard)									
		37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
		1 ½ "	1 "	¾ "	½ "	3/8 "	N° 4	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semi densa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto modulo	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo		0	4 %					3 %			2 %

Fuente: Instituto Nacional de Vías - Invías art. 450

4.3.1. Preparación y fabricación de briquetas densas, semidensas y abiertas

En la mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: las proporciones de materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente el desempeño de la misma como pavimento terminado.

4.3.1.1. Preparación de las muestras

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6mm (4plg) de diámetro y 63mm (2 ½plg) de altura, preparado como se describe en la Norma INV E-748-07. Preparación de las muestras con el porcentaje óptimo.

Figura 4.4 Briquetas de estudio



Fuente: Elaboración Propia

El proceso experimental se realizó en dos secciones, en la primera sección se realizaron 12 probetas con el fin de poder graficar el contenido de asfalto óptimo con la gradación del agregado según los lineamientos de INVIAS; siguiendo la mismas normas se realizó la mezcla con los porcentajes de cemento asfáltico 85-100 de penetración, con valores de 4.5%, 5.0%, 5.5% , 6.0% y 6.5%, teniendo en cuenta los rangos y numero de probetas indicados en las especificaciones del INVIAS para diseño de mezclas con el método de Marshall.

Después de encontrado el porcentaje de asfalto óptimo, en este caso 5.48% de CA, se procedió a realizar las probetas, las cuales se dosificaron con la adición de Polipropileno al 0.5%, 1.0 % y 1,5%.

Tabla 4.2 Criterios para el Diseño de la mezcla Asfáltica en caliente por el método Marshall

Característica	Norma de Ensayo	Mezclas densas, semidensas y abiertas		
		Categoría de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
Compactación (Golpes/ cara)	E- 748	50	75	75
Estabilidad mínima (N)		5000	7500	9000
Fluencia (mm)		2.0 – 4.0	3.0 – 5.0 (4.5 – 7.5)	3.0 – 6.0 (3.0 – 5.3)
Vacíos con aire (%)	E – 736	3.0 – 5.0	3.0 – 5.0	4.0 – 6.0

Fuente: Norma INVIAS

El procedimiento fue el mismo para los dos tipos de mezclas asfálticas, las semi densas y las abiertas. Los resultados finales se muestran a continuación en el siguiente Resumen:

Tabla 4.3 Resultados Obtenidos

Tipo de Mezcla						Especificaciones	
Densa							
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2612.00	2723.00	2856.40	2996.00	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100 "	12.42	13.26	12.00	16.07	8	16
Vacíos	%	3.80	3.95	4.08	4.30	3	5
C.A.	%	5.48	5.50	5.51	5.55		

Semidensa						Especificaciones	
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2418.0 0	2490.0 0	2705.0 0	2732.0 0	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100 "	12.52	13.28	14.60	16.20	8	16
Vacíos	%	4.50	4.14	4.31	4.65	3	5
C.A.	%	5.38	5.41	5.45	5.47		
Abierta						Especificaciones	
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2180.0 0	2384.0 0	2676.0 0	2752.0 0	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100 "	12.72	13.45	15.54	17.20	8	16
Vacíos	%	4.25	4.36	4.65	5.10	3	5
C.A.	%	5.32	5.34	5.36	5.40		

Fuente: elaboración propia

Como se puede ver en el resumen las mezclas elaboradas cumplen con las especificaciones, según la tabla N° 4.14.

El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 3

4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.4.1. Resultados de los ensayos de evaluación de calidad y caracterización

Los resultados se evalúan a partir de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas calientes se realiza un análisis comparativo de resultados el mismo que es importante para determinar las características de la mezcla caliente con respecto a la mezcla convencional.

Para el efecto de análisis se realizaron tablas y gráficos que muestran la diferencia de resultados.

Asimismo las propiedades que se analizaran son la estabilidad y la fluencia.

Por lo tanto debe entenderse por:

Estabilidad Marshall:

De una mezcla asfáltica es la carga máxima (lb). que soporta una probeta de 6,35cm. de altura y 10,16cm. de diámetro cuando se la ensaya a una temperatura dada, cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5,08cm./min, en la forma que indica según norma aplicada.

Fluencia Marshall:

Es la deformación total (1/100plg). que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

4.4.2. Análisis de Resultados de la Mezcla Densa

Tabla 4.4 Análisis Resultados Mezclas Densas

Tipo de Mezcla						Especificaciones	
Densa							
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2612.00	2723.00	2856.40	2996.00	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100"	12.42	13.26	12.00	16.07	8	16
Vacíos	%	3.80	3.95	4.08	4.30	3	5
C.A.	%	5.48	5.50	5.51	5.55		

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos en la mezcla convencional densa, para un 0% de polipropileno se determinó un contenido óptimo de 5.48%, proyectan resultados aceptables frente a los valores exigidos por las especificaciones INVIAS, cumpliendo con los rangos de

estabilidad y flujo, con lo que se puede ver la calidad del agregado y el cemento asfáltico usado.

Teniendo como base esta información, fue posible adicionar el polipropileno dentro de la mezcla asfáltica.

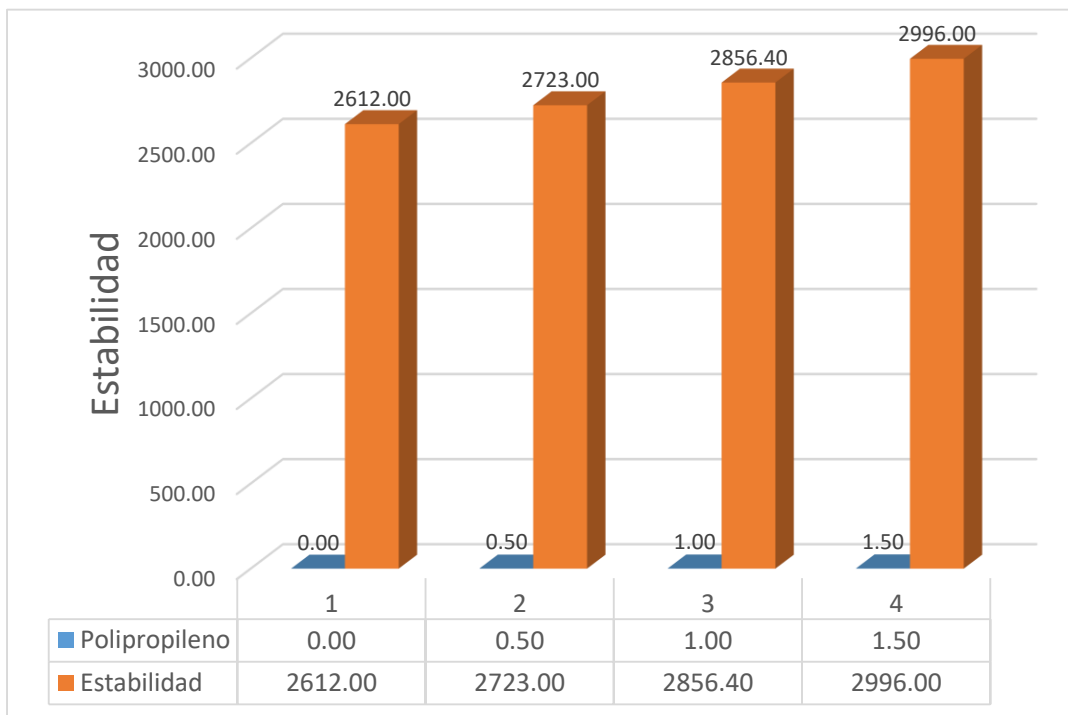
Después del análisis del diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional, se procedió a incorporar polipropileno, en porcentajes del 0.5%, 1.0% y 1.5% respecto al peso total de la mezcla asfáltica. Las tablas anteriores indican los resultados obtenidos de parámetros Marshall para la mezcla de control y las mezclas con adición de polipropileno, así como también el comparativo de los parámetros según la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Por lo tanto, se puede concluir:

- La estabilidad Marshall aumenta de forma proporcional en función de la adición del contenido de polipropileno hasta 1.5 %.

Figura 4.5 Estabilidad Marshall

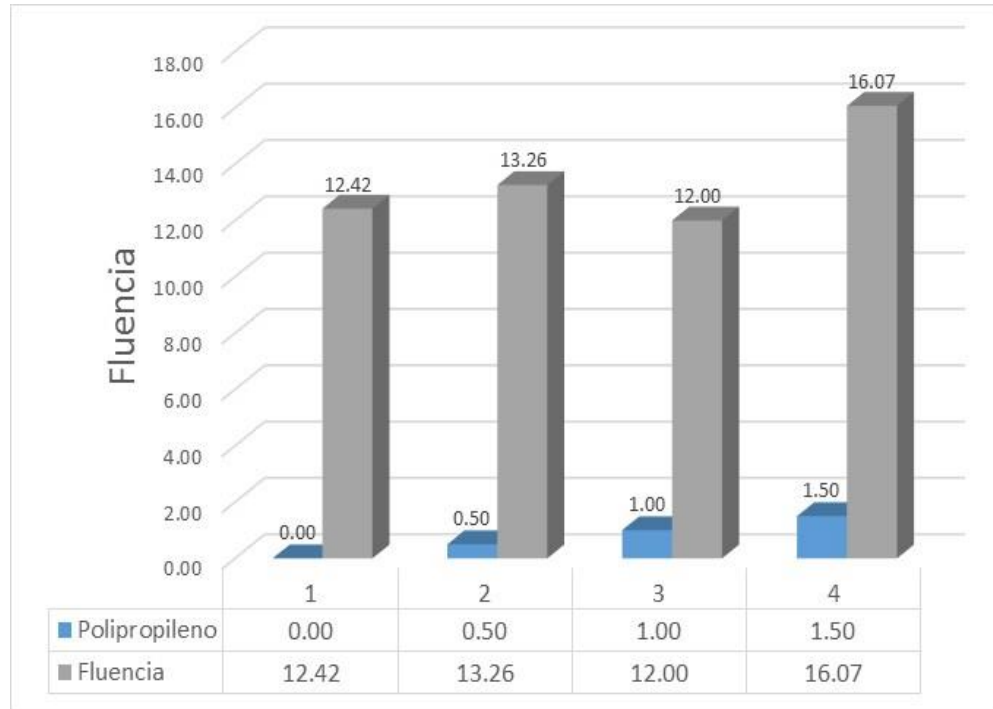
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración Propia

- El valor de la Fluencia, entendido como la deformación del material, aumenta de forma proporcional al aumento de polipropileno. Sin embargo podemos observar que al 1% la deformación bajo a un valor menor del convencional. En este sentido, las fibras de polipropileno pueden actuar como un elemento que permite mayores niveles de deformación ante la acción de la carga.

Figura 4.6 Fluencia Marshall



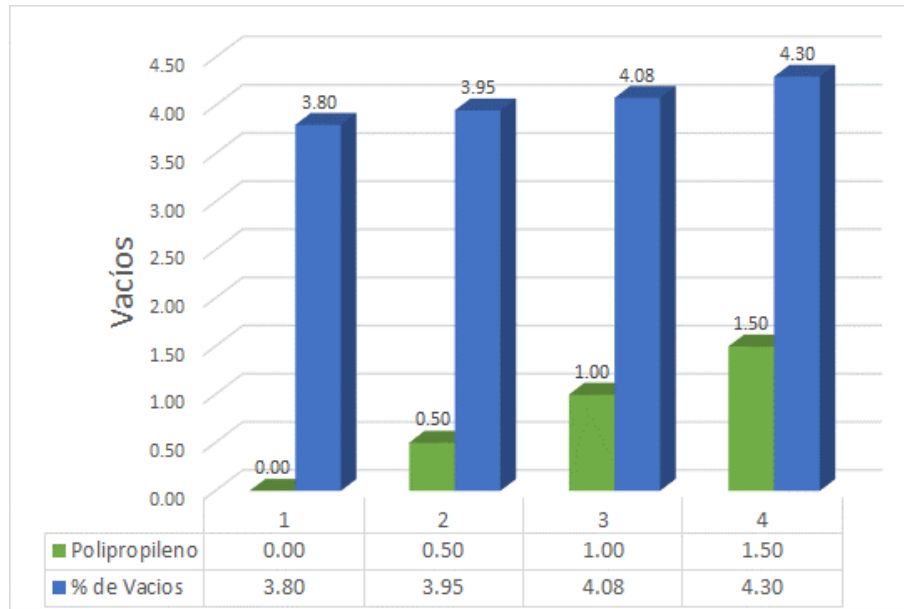
Fuente: Elaboración Propia

De forma general, la adición del polipropileno tiene una tendencia de aumentar la estabilidad en función del aumento de contenido de polipropileno, generando una capacidad de resistir cargas después de su rotura inicial a diferencia del asfalto convencional.

La mezcla convencional con 1.0% de polipropileno nos muestra el mejor valor máximo de carga y cumple la fluencia según las especificaciones.

La estabilidad genera en la mezcla asfáltica, un comportamiento más consistente y que aumenta los espacios entre el agregado, haciendo que la mezcla se desplace menos, pero a la vez sea dúctil, aumentando la resistencia al ser sometida a las cargas de los vehículos, siendo estas reiterativas sobre el mismo punto del pavimento, por lo que la mezcla asfáltica debe tener la capacidad recuperarse después de la carga.

Figura 4.7% Vacíos Marshall



Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. Análisis de la mezclas semidensas

Tabla 4.5 Análisis resultados mezcla semidensa

Tipo de mezcla						Especificaciones	
Semidensa							
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2418.00	2490.00	2705.00	2732.00	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100"	12.52	13.28	14.60	16.20	8	16
Vacíos	%	4.50	4.14	4.31	4.65	3	5
C.A.	%	5.38	5.41	5.45	5.47		

Fuente: Elaboración propia

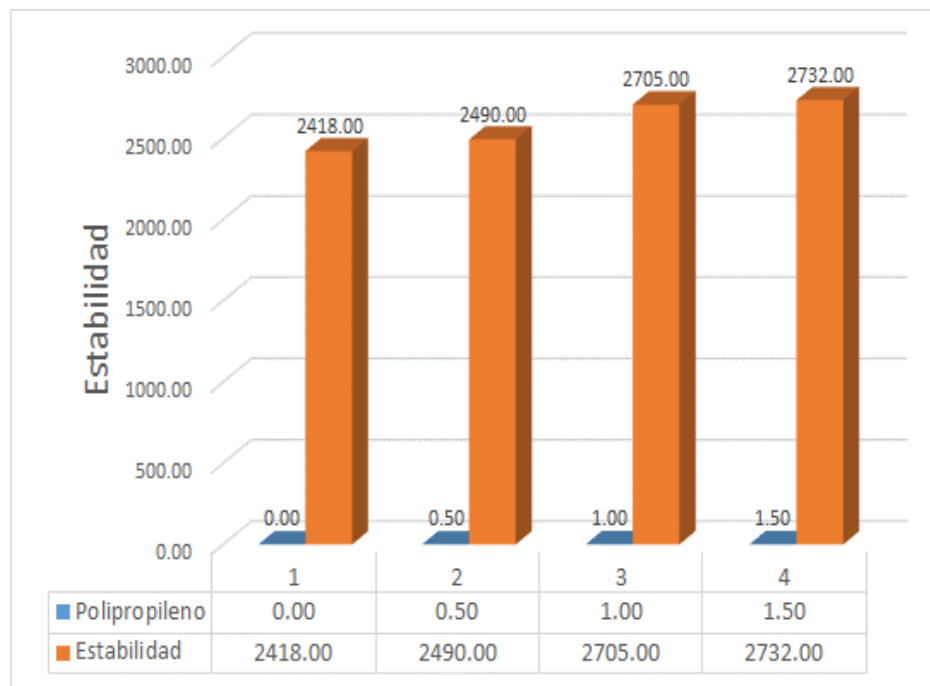
Los resultados obtenidos en la mezcla convencional Semidensa con un contenido óptimo de 5.38%, proyectan un resultado aceptable frente a los valores exigidos por las especificaciones INVIAS, cumpliendo con los rangos de estabilidad y flujo, con lo que se puede ver la calidad del agregado y el cemento asfáltico usado. Teniendo como base esta información, fue posible adicionar el polipropileno dentro de la mezcla asfáltica.

Después del análisis del diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional, se procedió a incorporar polipropileno, en porcentajes del 0.5%, 1.0% y 1.5% respecto al peso total de la mezcla asfáltica. Las tablas anteriores indican los resultados obtenidos de parámetros Marshall para la mezcla de control y las mezclas con adición de polipropileno, así como también el comparativo de los parámetros según la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Según los resultados anteriormente presentados, se puede concluir:

- La Estabilidad Marshall aumenta de forma proporcional en función del contenido de polipropileno hasta 1.5%.

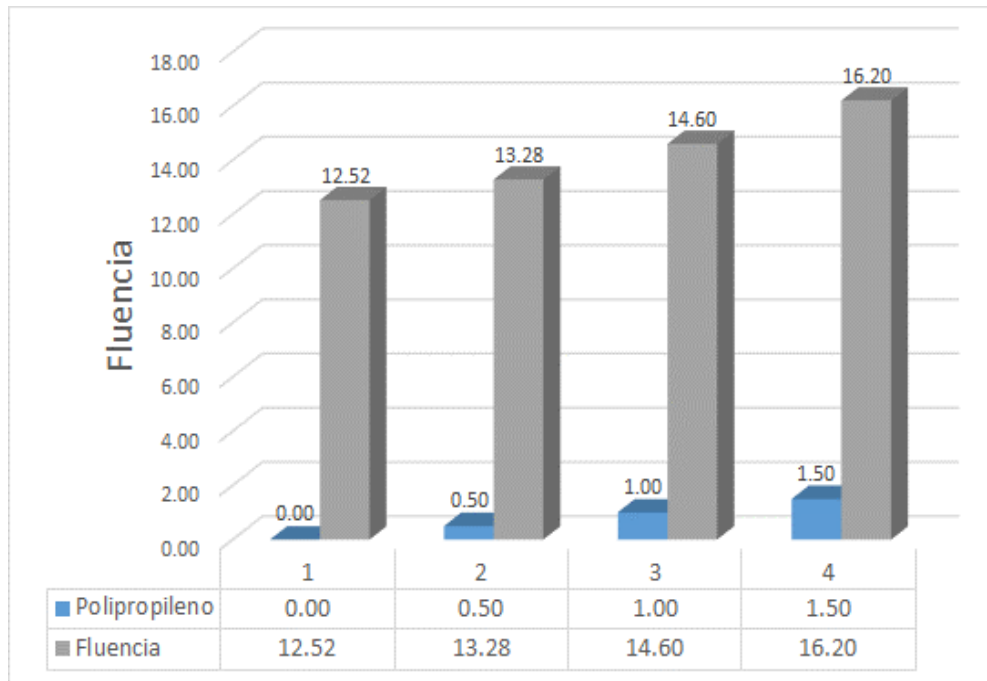
Figura 4.8 Estabilidad Marshall



Fuente: Elaboración Propia

- El valor de la Fluencia, entendido como la deformación del material, aumenta de forma proporcional al aumento de polipropileno. En este sentido, las fibras de polipropileno pueden actuar como un elemento que permite mayores niveles de deformación ante la acción de la carga.

Figura 4.9 Fluencia Marshall



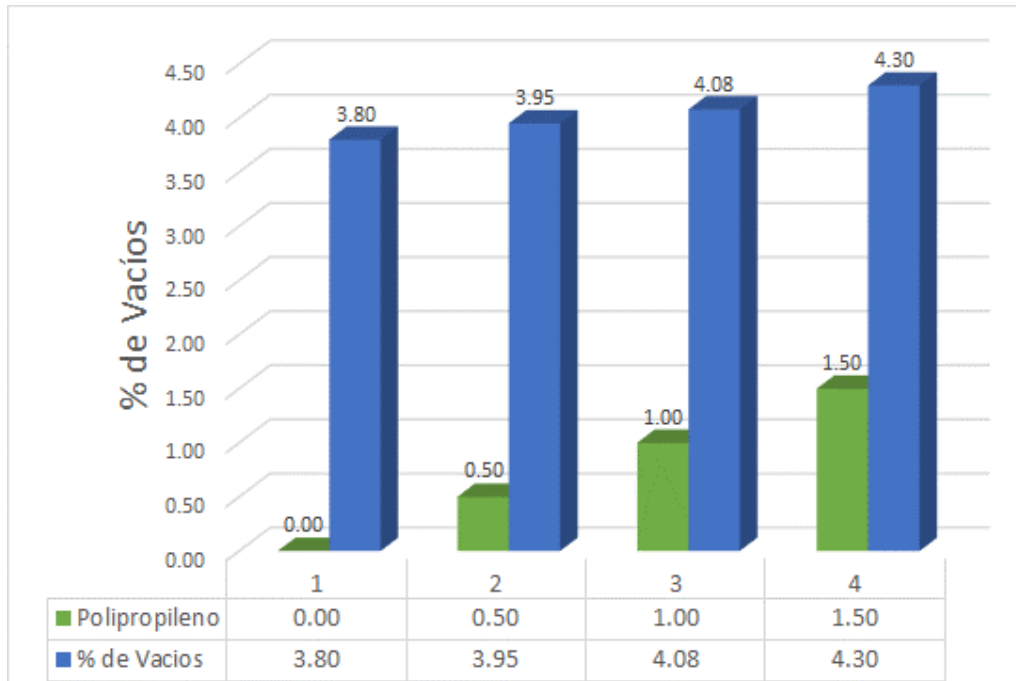
Fuente: Elaboración Propia

De forma general, la adición del polipropileno tiene una tendencia de aumentar la estabilidad en función del aumento de contenido de polipropileno, generando una capacidad de resistir cargas después de su rotura inicial a diferencia del asfalto convencional.

La mezcla convencional con 1.0% de polipropileno nos muestra el mejor valor máximo de carga y cumple la fluencia según las especificaciones.

La estabilidad genera en la mezcla asfáltica, un comportamiento más consistente y que aumenta los espacios entre el agregado, haciendo que la mezcla se desplace menos, pero a la vez sea dúctil, aumentando la resistencia al ser sometida a las cargas de los vehículos, siendo estas reiterativas sobre el mismo punto del pavimento, por lo que la mezcla asfáltica debe tener la capacidad recuperarse después de la carga.

Figura 4.10 % Vacíos Marshall



Fuente: Elaboración Propia

4.4.4. Análisis de la Mezclas Abiertas

Tabla 4. 6 Análisis resultados mezcla abierta

Tipo de mezcla						Especificaciones	
Abierta							
Polipropileno	%	0.00	0.50	1.00	1.50		
Estabilidad	Lb	2180.00	2384.00	2676.00	2752.00	> 1600 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia	1/100"	12.72	13.45	15.54	17.20	8	16
Vacíos	%	4.25	4.36	4.65	5.10	3	5
C.A.	%	5.32	5.34	5.36	5.40		

Fuente: Elaboración Propia

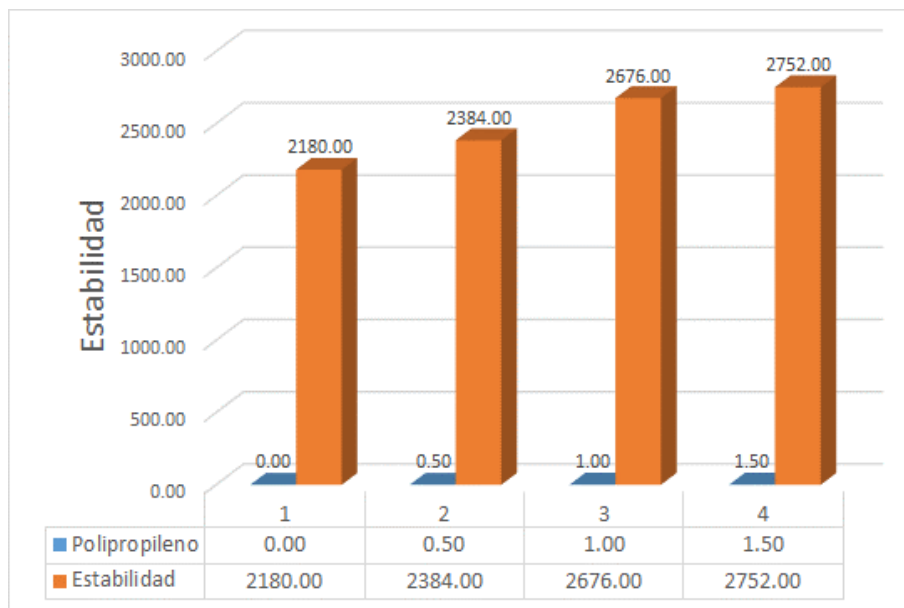
Los resultados obtenidos en la mezcla convencional abierta con un contenido óptimo de 5.32%, proyectan un resultado aceptable frente a los valores exigidos por las especificaciones INVIAS, cumpliendo con los rangos de estabilidad y flujo, con lo que se puede ver la calidad del agregado y el cemento asfáltico usado. Teniendo como base estas informaciones, fue posible adicionar el polipropileno dentro de la mezcla asfáltica.

Después del análisis del diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional, se procedió a incorporar polipropileno, en porcentajes del 0.5%, 1.0% y 1.5% respecto al peso total de la mezcla asfáltica. Las tablas anteriores indica los resultados obtenidos de parámetros Marshall para la mezcla de control y las mezclas con adición de polipropileno, así como también el comparativo de los parámetros según la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Según los resultados anteriormente presentados, se puede concluir:

- La Estabilidad Marshall aumenta de forma proporcional en función del contenido de polipropileno hasta 1.5%.

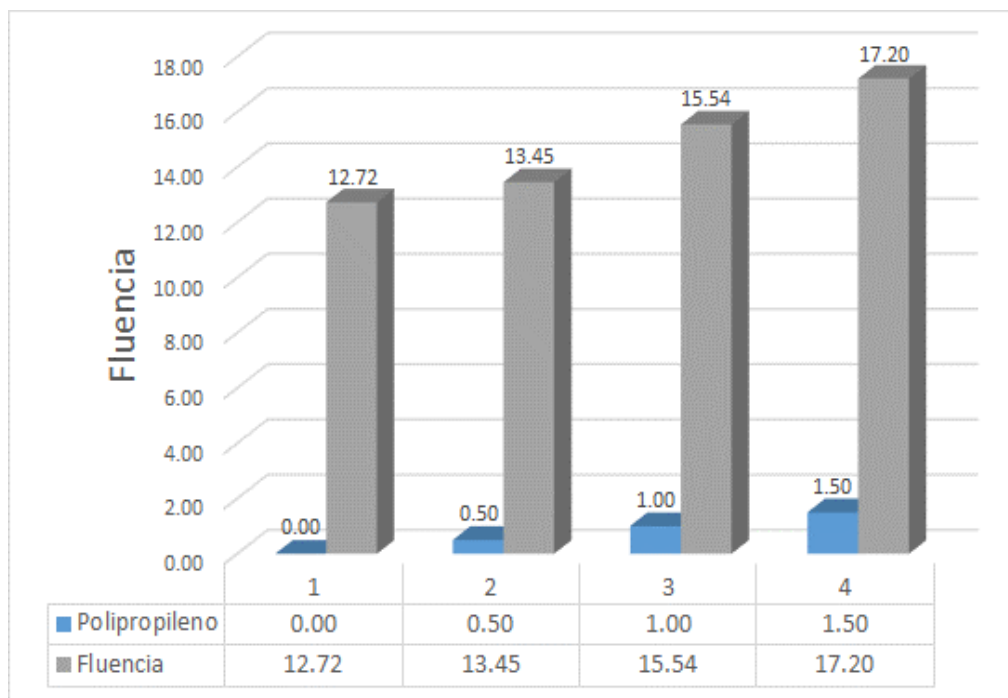
Figura 4.10 Estabilidad Marshall



Fuente: Elaboración Propia

- El valor de la Fluencia, entendido como la deformación del material, aumenta de forma proporcional al aumento de polipropileno. En este sentido, las fibras de polipropileno pueden actuar como un elemento que permite mayores niveles de deformación ante la acción de la carga.
- También podemos observar que al aumentar 1.5% de polipropileno el valor de la deformación no cumple con las especificaciones.

Figura 4.11 Fluencia Marshall



Fuente: Elaboración Propia

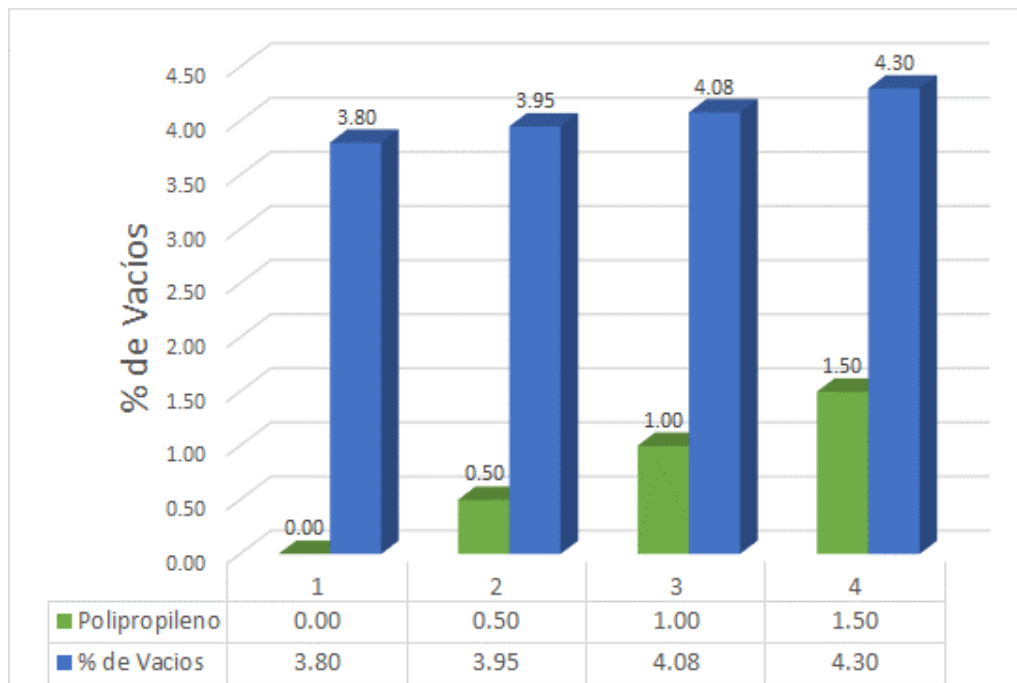
De forma general, la adición del polipropileno tiene una tendencia de aumentar la estabilidad en función del aumento de contenido de polipropileno, generando una capacidad de resistir cargas después de su rotura inicial a diferencia del asfalto convencional.

La mezcla convencional con 1.0% de polipropileno nos muestra el mejor valor máximo de carga y cumple la fluencia según las especificaciones.

La estabilidad genera en la mezcla asfáltica, un comportamiento más consistente, haciendo que la mezcla se desplace menos, pero a la vez sea dúctil, aumentando la resistencia al ser sometida a las cargas de los vehículos, siendo estas reiterativas sobre el mismo punto del pavimento, por lo que la mezcla asfáltica debe tener la capacidad recuperarse después de la carga.

De manera general podemos observar que las mezclas asfálticas tanto densas, semidensas y abiertas mejora las propiedades de estabilidad hasta un 1%, en las cuales las mezclas cumplen con las especificaciones.

Figura 4.12 % Vacíos Marshall



Fuente: Elaboración Propia

4.5 TRATAMIENTO ESTADISTICO

El análisis estadístico que se tratara en este punto posibilita las medidas de centralización dispersión y tendencia temporales en los valores hallados para cada una de las muestras variables dependientes que se tiene en función de nuestra variable independiente que es el porcentaje de polipropileno incorporado a la mezcla asfáltica.

Las variables dependientes que serán utilizados por medio de la estadística descriptiva son la densidad, estabilidad y fluencia de la mezcla densas semidensas y abiertas serán desglosadas junto a tablas y gráficos.

MEZCLA ASFÁLTICA DENSA

Tabla 4.7 Datos de la densidad de la mezcla densa + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	N° de briqueta	Denominación	Densidad (gr/cm ³)	Media Aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	2.334	2.334	0.003	0.001	0.120
	2	2A	2.327				
	3	3A	2.338				
	4	4A	2.334				
	5	5A	2.337				
1	1	1B	2.325	2.333	0.003	0.001	0.137
	2	2B	2.336				
	3	3B	2.334				
	4	4B	2.333				
	5	5B	2.337				
1.5	1	1C	2.329	2.330	0.001	0.001	0.062
	2	2C	2.331				
	3	3C	2.332				
	4	4C	2.33				
	5	5C	2.327				
				Suma	0.007	0.003	0.319
				Error Total	0.002	0.001	0.106

A continuación, partiendo de 15 datos de densidad que se tiene de las briguetas se procede al cálculo estadístico relevante.

Tabla 4.8 Datos Estadísticos de la densidad de la mezcla densa + polipropileno

Datos estadísticos revelantes de la densidad (gr/cm³)	
Media	2,332
Mediana	2,333
Desviación Estándar	0,004025734
Varianza de la Muestra	1,5126E-05
Curtosis	-0,87885604
Coefficiente de asimetría	-0,25820852
Mínimo	2,325
Máximo	2,338
Suma	34,984
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,002740	

Teniendo todos los datos estadísticos de la densidad se procede a la elaboración de la base de datos, obteniéndose los intervalos con un límite superior e inferior, los grupos o marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual de frecuencia para cada grupo o clase.

Tabla 4.9 Matriz de base de datos de la mezcla densa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	2,325		0	0	0
2,325	2,328	2,326	3	0,2	20
2,328	2,330	2,329	1	0,1	6,7
2,330	2,333	2,332	3	0,2	20,0
2,333	2,336	2,335	5	0,3	33,3
2,336	2,339	2,337	3	0,2	20
			15	1	100

Figura 4.13 Histograma de frecuencia de la densidad mezcla densa + polipropileno

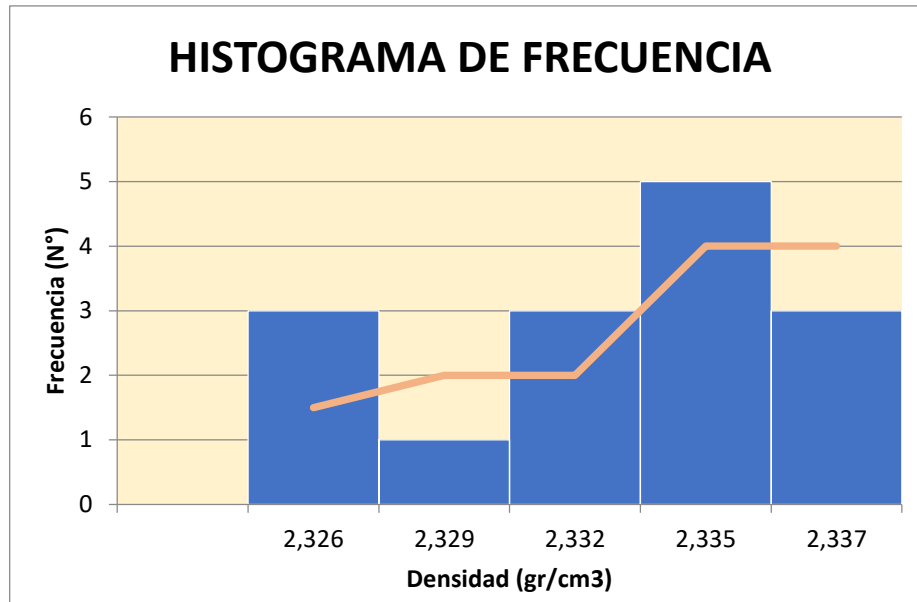


Tabla 4.10 Datos % de vacíos de la mezcla densa + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	Nº de Briqueta	Denominación	% Vacíos de la mezcla (%)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	4.24	4.18	0.05	0.01	1.13
	2	2A	4.21				
	3	3A	4.14				
	4	4A	4.22				
	5	5A	4.11				
1	1	1B	4.28	4.19	0.07	0.02	1.72
	2	2B	4.11				
	3	3B	4.22				
	4	4B	4.25				
	5	5B	4.09				
1.5	1	1C	4.26	4.30	0.05	0.01	1.23
	2	2C	4.28				
	3	3C	4.24				
	4	4C	4.31				
	5	5C	4.43				
Suma					0.17	0.04	4.07
Error Total					0.06	0.01	1.36

Tabla 4.11 Datos Estadísticos % de vacíos de la mezcla densa + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la densidad (gr/cm3)	
Media	4,264
Mediana	4,244
Desviación estandar	0,153723872
Varianza de la muestra	2,2056E-02
Curtosis	-0,09364085
Coefficiente de asimetria	0,599638169
Minimo	4,044
Maximo	4,580
Suma	64,004
Cuenta	15

Numero clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,109840	

Tabla 4.12 Matriz de base de datos % de vacíos de la mezcla densa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	4,044		0	0	0
4,044	4,154	4,099	4	0,27	26,67
4,154	4,264	4,209	5	0,33	33,33
4,264	4,374	4,319	3	0,20	20,00
4,374	4,483	4,429	1	0,07	6,67
4,483	4,593	4,538	2	0,13	13,33
			15	1	100

Figura 4.14 Histograma de frecuencia % de vacíos de la mezcla densa + polipropileno

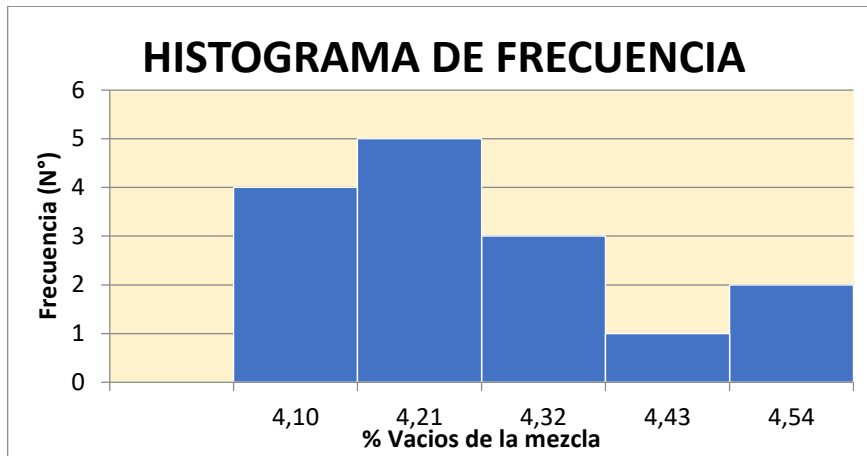


Tabla 4.13 Datos de la estabilidad de la mezcla densa + polipropileno

Porcentaje de polipropileno %	Nº de briqueta	Denominación	Estabilidad (lbs.)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	2726.2	2724.14	3.87	0.00	0.14
	2	2A	2720.8				
	3	3A	2726.7				
	4	4A	2717.8				
	5	5A	2729.2				
1	1	1B	2834.3	2832.42	3.62	0.00	0.13
	2	2B	2829.9				
	3	3B	2825.9				
	4	4B	2837.3				
	5	5B	2834.7				
1.5	1	1C	2937.8	2932.52	5.18	0.00	0.18
	2	2C	2928.3				
	3	3C	2938.1				
	4	4C	2923.8				
	5	5C	2934.6				
Suma					12.66	0.00	0.45
Error Total					4.22	0.00	0.15

Tabla 4.14 Datos Estadísticos de la Estabilidad de la mezcla densa + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la estabilidad	
Media	2847,512
Mediana	2864,681
Desviacion estandar	115,6212029
Varianza de la Muestra	1,2477E+04
Curtosis	-0,67879956
Coficiente de asimetría	0,144758614
Mínimo	2666,153
Máximo	3057,831
Suma	42745,451
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	80,243623	

Tabla 4.15 Matriz de base de datos Estabilidad de la mezcla densa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	2326,8		0	0	0
2326,8	2426,9	2376,880	3	0,20	20,00
2426,9	2527,0	2476,992	2	0,13	13,33
2527,0	2627,2	2577,103	1	0,07	6,67
2627,2	2727,3	2677,214	5	0,33	33,33
2727,3	2827,4	2777,325	4	0,27	26,67
			15	1	100

Figura 4.15 Histograma de frecuencia de la Estabilidad mezcla densa + polipropileno

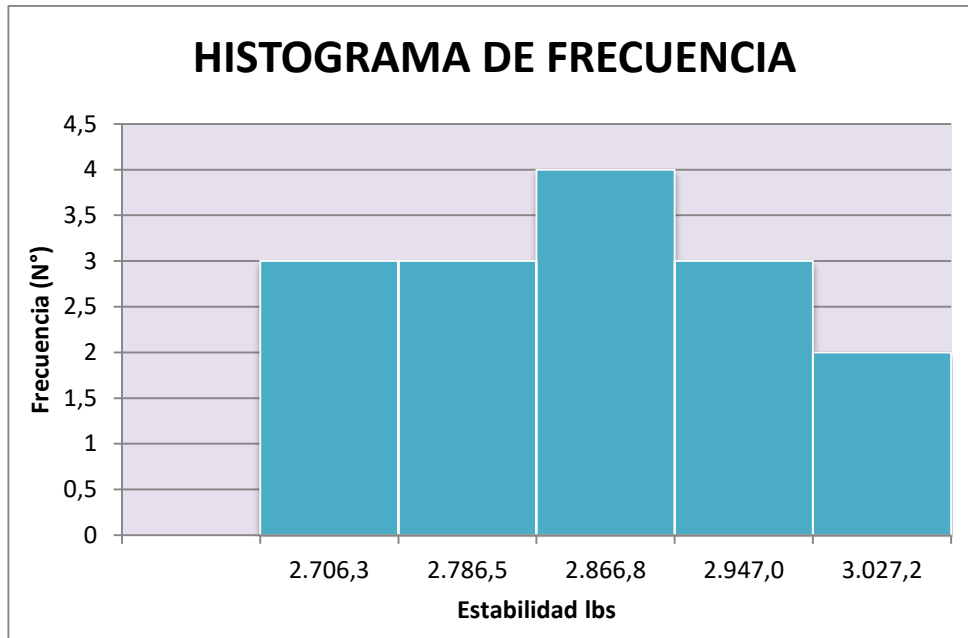


Tabla 4.16 Datos de la Fluencia de la mezcla densa + polipropileno

Porcentaje de polipropileno %	N° de briqueta	Denominación	Fluencia (pulgadas)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	13.1	13.30	0.15	0.01	1.13
	2	2A	13.5				
	3	3A	13.25				
	4	4A	13.48				
	5	5A	13.18				
1	1	1B	14.13	14.01	0.28	0.02	2.01
	2	2B	13.85				
	3	3B	13.96				
	4	4B	14.18				
	5	5B	13.92				
1.5	1	1C	15.97	16.14	0.31	0.02	1.89
	2	2C	16.25				
	3	3C	16.32				
	4	4C	16.15				
	5	5C	16				
Suma					0.74	0.05	5.03
Error Total					0.25	0.02	1.68

Tabla 4.17 Datos Estadísticos de la Fluencia de la mezcla densa + polipropileno

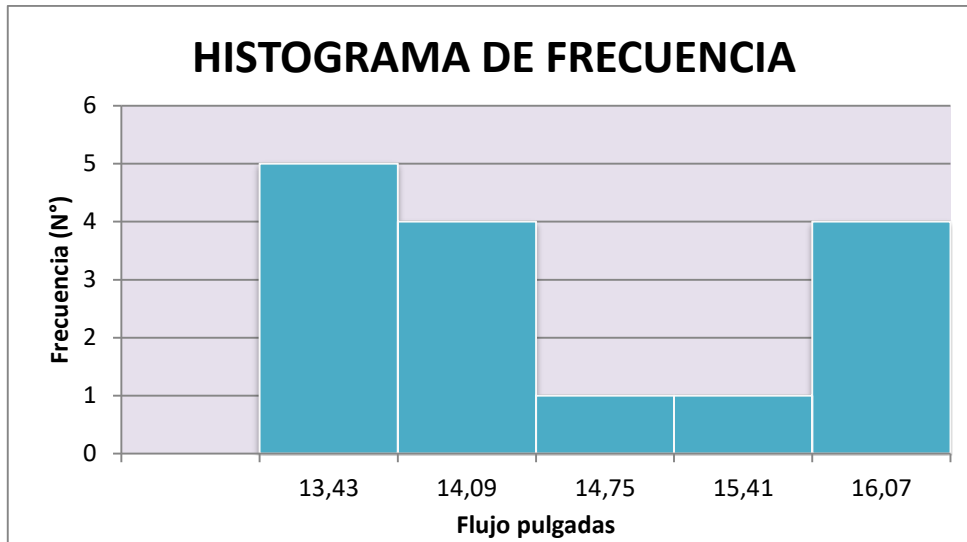
Datos estadísticos relevantes de la densidad (gr/cm3)	
Media	14,433
Mediana	13,960
Desviacion estandar	1,256380667
Varianza de la Muestra	1,4733E+00
Curtosis	-1,5543498
Coeficiente de asimetría	0,573996444
Mínimo	13,100
Máximo	16,320
Suma	217,240
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,659687	

Tabla 4.18 Matriz de base de datos Fluencia de la mezcla densa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	13,1		0	0	0
13,1	13,8	13,430	5	0,33	33,33
13,8	14,4	14,090	4	0,27	26,67
14,4	15,1	14,749	1	0,07	6,67
15,1	15,7	15,409	1	0,07	6,67
15,7	16,4	16,069	4	0,27	26,67
			15	1	100

Figura 4.16 Histograma de frecuencia de la Fluencia mezcla densa + polipropileno



MEZCLA SEMI DENSA

Tabla 4.19 Datos de la densidad de la mezcla semidensa + polipropileno

Porcentaje de polipropileno %	Nº de Briqueta	Denominación	Densidad (gr/cm ³)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	2.332	2.34	0.00	0.00	0.11
	2	2A	2.337				
	3	3A	2.335				
	4	4A	2.341				
	5	5A	2.338				
1	1	1B	2.332	2.33	0.01	0.00	0.27
	2	2B	2.333				
	3	3B	2.337				
	4	4B	2.33				
	5	5B	2.337				
1.5	1	1C	2.321	2.33	0.01	0.01	0.57
	2	2C	2.336				
	3	3C	2.33				
	4	4C	2.323				
	5	5C	2.334				
Suma					0.02	0.01	0.94
Error Total					0.01	0.00	0.31

Tabla 4.20 Datos estadísticos de la densidad de la mezcla semidensa + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la densidad (gr/cm³)	
Media	2,333
Mediana	2,334
Desviacion estandar	0,005414328
Varianza de la Muestra	2,7361E-05
Curtosis	0,80193879
Coefficiente de asimetría	-0,9933325
Mínimo	2,321
Máximo	2,341
Suma	34,997
Cuenta	15

Numero clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,004033	

Tabla 4.21 Matriz de base de datos de la mezcla Semidensa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	2,321		0	0	0
2,321	2,325	2,323	2	0,13	13,33
2,325	2,329	2,327	4	0,27	26,67
2,329	2,334	2,331	6	0,40	40,00
2,334	2,338	2,336	2	0,13	13,33
2,338	2,342	2,340	1	0,07	6,67
			15	1	100

Figura 4.17 Histograma de frecuencia de la Densidad mezcla Semidensa + polipropileno

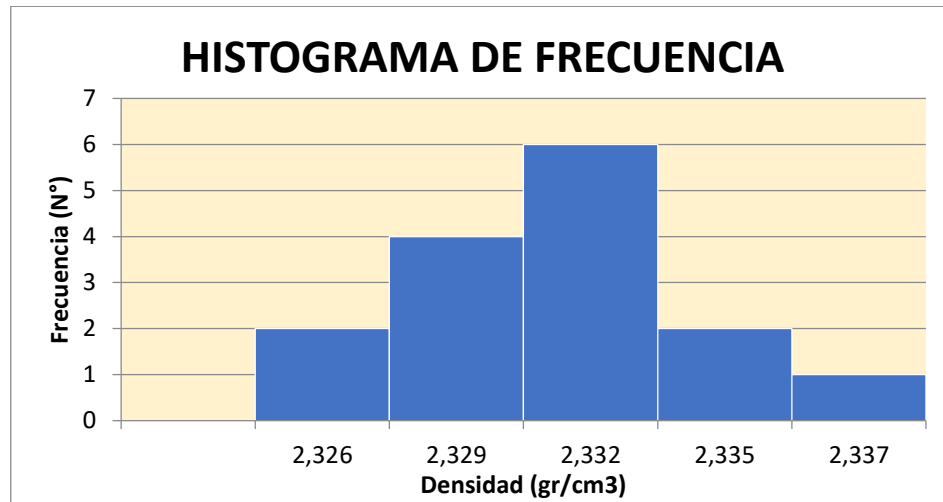


Tabla 4.22 Datos % de vacíos de la mezcla Semidensa + polipropileno

Porcentaje de polipropileno %	Nº de briqueta	Denominación	% Vacíos de la Mezcla (%)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	4.28	4.19	0.06	0.02	1.51
	2	2A	4.18				
	3	3A	4.25				
	4	4A	4.10				
	5	5A	4.12				
1	1	1B	4.23	4.19	0.17	0.04	3.94
	2	2B	4.26				
	3	3B	4.1				
	4	4B	4.27				
	5	5B	4.11				
1.5	1	1C	4.32	4.27	0.21	0.05	4.86
	2	2C	4.13				
	3	3C	4.36				
	4	4C	4.36				
	5	5C	4.2				
Suma					0.44	0.10	10.31
Error Total					0.15	0.03	3.44

Tabla 4.23 Datos Estadísticos % de vacíos de la mezcla Semidensa + polipropileno

Datos estadísticos relevantes % de vacíos (gr/cm3)	
Media	4,274
Mediana	4,246
Desviación Estándar	0,203365469
Varianza de la Muestra	3,8600E-02
Curtosis	0,752591291
Coficiente de asimetría	1,045600006
Mínimo	4,001
Máximo	4,722
Suma	64,177
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,147849	

Tabla 4.24 Matriz de base de datos % de vacíos de la mezcla semidensa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	4,001		0	0	0
4,001	4,149	4,075	5	0,33	33,33
4,149	4,296	4,222	4	0,27	26,67
4,296	4,444	4,370	3	0,20	20,00
4,444	4,592	4,518	1	0,07	6,67
4,592	4,740	4,666	2	0,13	13,33
			15	1	100

Figura 4.18 Histograma de frecuencia % de vacíos de la mezcla semidensa + polipropileno

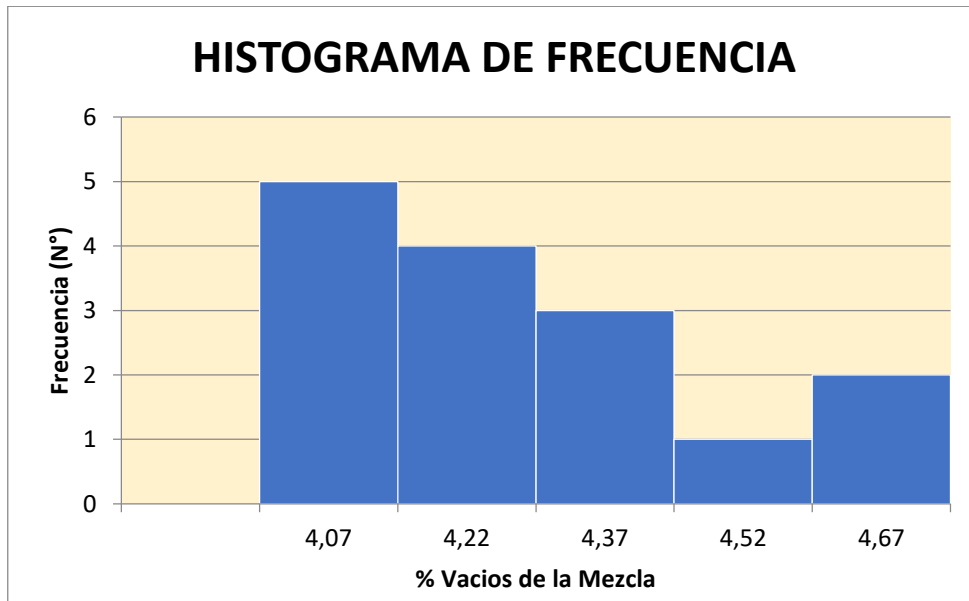


Tabla 4.25 Datos de la estabilidad de la mezcla semidensa + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	Nº de Briqueta	Denominación	Estabilidad (lbs.)	Media aritmética (x)	Error Absoluto e	Error Relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	2528.9	2496.72	40.42	0.02	1.62
	2	2A	2474				
	3	3A	2454.6				
	4	4A	2565.6				
	5	5A	2460.5				
1	1	1B	2742.3	2701.78	63.17	0.02	2.34
	2	2B	2666.2				
	3	3B	2698.9				
	4	4B	2723.9				
	5	5B	2677.6				
1.5	1	1C	2756.1	2747.28	70.69	0.03	2.57
	2	2C	2791.2				
	3	3C	2763				
	4	4C	2727.2				
	5	5C	2698.9				
Suma					174.29	0.07	6.53
Error Total					58.10	0.02	2.18

Tabla 4.26 Datos Estadísticos de la Estabilidad de la mezcla semidensa + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la estabilidad (gr/cm³)	
Media	2646,075
Mediana	2698,939
Desviación Estándar	118,4846067
Varianza de la Muestra	1,3103E+04
Curtosis	-1,13210144
Coficiente de asimetria	-0,68896929
Minimo	2454,613
Maximo	2791,228
Suma	39728,942
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	68,962917	

Tabla 4.27 Matriz de base de datos estabilidad de la mezcla semidensa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	2454,6		0	0	0
2454,6	2523,6	2489,094	3	0,20	20,00
2523,6	2592,5	2558,057	2	0,13	13,33
2592,5	2661,5	2627,020	1	0,07	6,67
2661,5	2730,5	2695,983	5	0,33	33,33
2730,5	2799,4	2764,946	4	0,27	26,67
			15	1	100

Figura 4.19 Histograma de frecuencia de la estabilidad mezcla semidensa + polipropileno

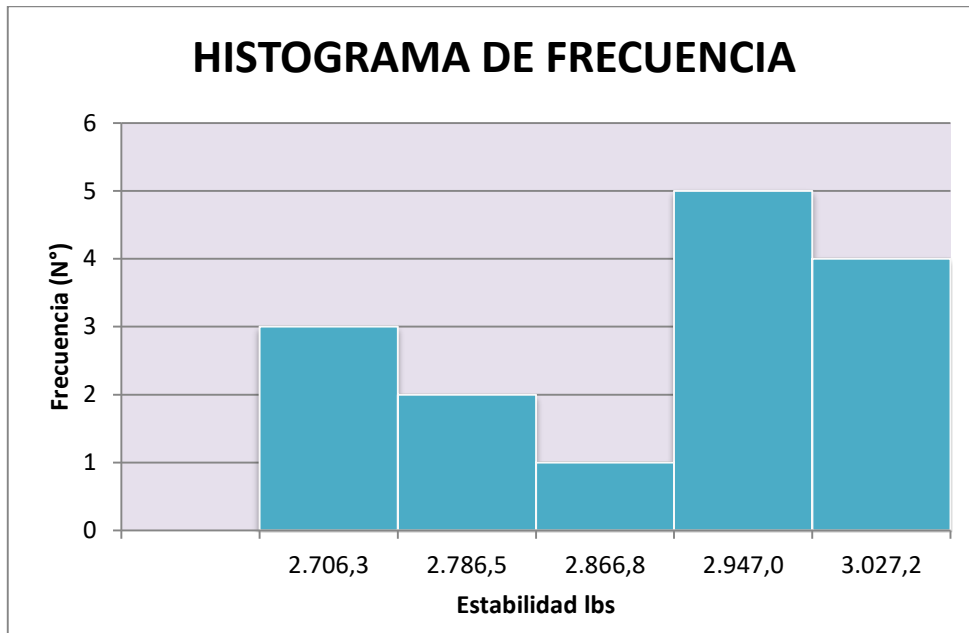


Tabla 4.28 Datos de la fluencia de la mezcla semidensa + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	Nº de Briqueta	Denominación	Fluencia (pulgadas)	Media Aritmética (x)	Error Absoluto e	Error Relativo E	Error Porcentual E (%)
0.5	1	1A	13.4	13.33	0.08	0.01	0.61
	2	2A	13.28				
	3	3A	13.18				
	4	4A	13.32				
	5	5A	13.46				
1	1	1B	14.8	14.65	0.24	0.02	1.65
	2	2B	14.56				
	3	3B	14.72				
	4	4B	14.5				
	5	5B	14.66				
1.5	1	1C	16.26	16.26	0.15	0.01	0.94
	2	2C	16.35				
	3	3C	16.15				
	4	4C	16.22				
	5	5C	16.3				
Suma					0.48	0.03	3.20

Tabla 4.29 Datos Estadísticos de la Fluencia de la mezcla Semidensa + polipropileno

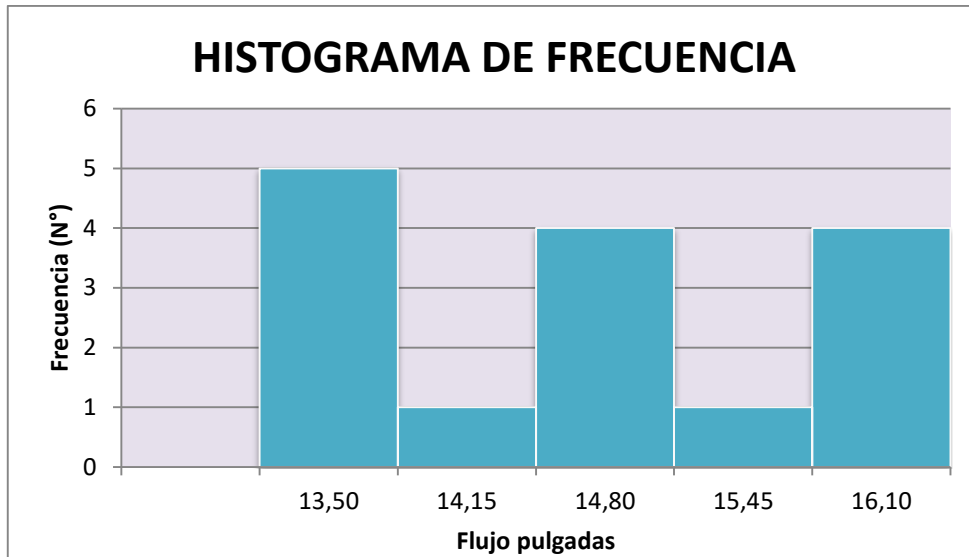
Datos estadísticos relevantes de la fluencia (gr/cm³)	
Media	14,695
Mediana	14,660
Desviación Estándar	1,242990633
Varianza de la Muestra	1,4420E+00
Curtosis	-1,59983352
Coefficiente de asimetría	0,127541058
Mínimo	13,180
Máximo	16,350
Suma	221,160
Cuenta	15

Número clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,649444	

Tabla 4.30 Matriz de base de datos fluencia de la mezcla semidensa + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	13,2		0	0	0
13,2	13,8	13,505	5	0,33	33,33
13,8	14,5	14,154	1	0,07	6,67
14,5	15,1	14,804	4	0,27	26,67
15,1	15,8	15,453	1	0,07	6,67
15,8	16,4	16,102	4	0,27	26,67
			15	1	100

Figura 4.20 Histograma de frecuencia de la fluencia mezcla semidensa + polipropileno



MEZCLA ABIERTA

Tabla 4.31 Datos de la densidad de la mezcla abierta + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	Nº de Briqueta	Denominación	Densidad (gr/cm ³)	Media Aritmética (x)	Error Absoluto e	Error Relativo E	Error Porcentual E (%)
0.5	1	1A	2.338	2.334	0.004	0.002	0.165
	2	2A	2.334				
	3	3A	2.333				
	4	4A	2.34				
	5	5A	2.326				
1	1	1B	2.326	2.328	0.008	0.004	0.356
	2	2B	2.328				
	3	3B	2.322				
	4	4B	2.333				
	5	5B	2.33				
1.5	1	1C	2.309	2.312	0.005	0.002	0.199
	2	2C	2.314				
	3	3C	2.311				
	4	4C	2.31				
	5	5C	2.314				
Suma					0.017	0.007	0.720
Error Total					0.006	0.002	0.240

Tabla 4.32 Datos estadísticos de la densidad de la mezcla abierta + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la densidad (gr/cm³)	
Media	2,324
Mediana	2,326
Desviación Estándar	0,010521617
Varianza de la Muestra	1,0332E-04
Curtosis	-1,38129887
Coficiente de asimetría	-0,21881663
Mínimo	2,309
Máximo	2,340
Suma	34,868
Cuenta	15

Numero clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	0,006306	

Tabla 4.33 Matriz de base de datos de la mezcla abierta + polipropileno

Intervalos		Grupos	Frecuencia	Fr	Fr %
Li	Ls				
	2,309		0	0	0
2,309	2,315	2,312	2	0,13	13,33
2,315	2,322	2,319	4	0,27	26,67
2,322	2,328	2,325	6	0,40	40,00
2,328	2,334	2,331	2	0,13	13,33
2,334	2,341	2,337	1	0,07	6,67
			15	1	100

Figura 4.21 Histograma de frecuencia de la densidad mezcla abierta + polipropileno

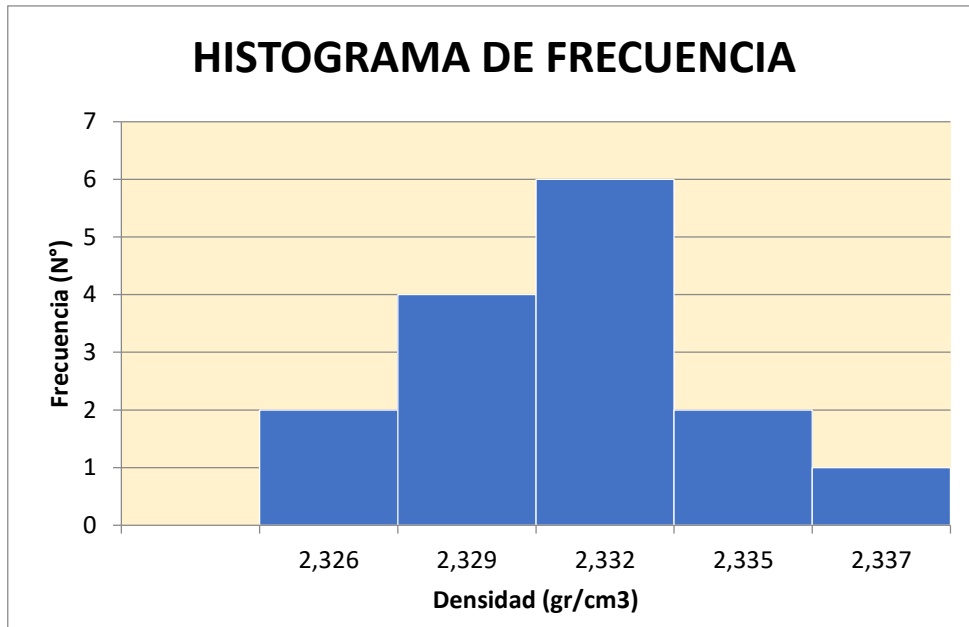


Tabla 4.34 Datos % de vacíos de la mezcla abierta + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	Nº de briqueta	Denominación	% Vacíos de la mezcla (%)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	4.15	4.31	0.16	0.04	3.69
	2	2A	4.34				
	3	3A	4.35				
	4	4A	4.08				
	5	5A	4.65				
1	1	1B	4.63	4.55	0.33	0.07	7.20
	2	2B	4.54				
	3	3B	4.77				
	4	4B	4.34				
	5	5B	4.46				
1.5	1	1C	5.25	5.15	0.18	0.04	3.53
	2	2C	5.06				
	3	3C	5.16				
	4	4C	5.22				
	5	5C	5.05				
Suma					0.67	0.14	14.42
Error Total					0.22	0.05	4.81

Tabla 4.35 Datos Estadísticos % de vacíos de la mezcla abierta + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la % vacíos (gr/cm³)	
Media	4,655
Mediana	4,633
Desviación estándar	0,395864031
Varianza de la muestra	1,4626E-01
Curtosis	-1,34938643
Coefficiente de asimetría	0,166087025
Mínimo	4,077
Máximo	5,252
Suma	70,064
Cuenta	15
Numero clases	4,8811 \approx 5
Tamaño de clases	0,240588

Tabla 4.36 Datos de la estabilidad de la mezcla abierta + polipropileno

Porcentaje de Polipropileno %	N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (lbs.)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E (%)
0.5	1	1A	2362.3	2402.56	46.41	0.02	1.93
	2	2A	2463.5				
	3	3A	2424				
	4	4A	2436.2				
	5	5A	2326.8				
1	1	1B	2644.3	2681.34	44.00	0.02	1.64
	2	2B	2700.1				
	3	3B	2693.6				
	4	4B	2679.7				
	5	5B	2689				
1.5	1	1C	2780.2	2737.14	126.24	0.05	4.61
	2	2C	2735.4				
	3	3C	2815.5				
	4	4C	2657.6				
	5	5C	2697				
Suma					216.64	0.08	8.18
Error Total					72.21	0.03	2.73

Tabla 4.37 Datos estadísticos de la estabilidad de la mezcla abierta + polipropileno

Datos estadísticos relevantes de la estabilidad lbs	
Media	2602,416
Mediana	2679,722
Desviación estándar	158,5143761
Varianza de la Muestra	2,3452E+04
Curtosis	-1,07430426
Coefficiente de asimetría	-0,64243784
Mínimo	2326,825
Máximo	2815,478
Suma	39105,396
Cuenta	15

Numero clases	4,8811	≈ 5
Tamaño de clases	100,111210	

4.6 Prueba de hipótesis

Análisis de Densidad

30 valores con rango desde 2.333 a 2.34

Este procedimiento está diseñado para resumir una sola muestra de datos. Calculará varios estadísticos y gráficas. También incluidos en el procedimiento están los intervalos de confianza y las pruebas de hipótesis. Use los botones de opciones Tabulares y de opciones gráficas en la barra de herramientas para análisis, para acceder a estos diferentes procedimientos.

Resumen estadístico para densidad

Recuento 30

Promedio 2.3365

Varianza 0.00000660345

Desviación estándar 0.00256972

Coefficiente de variación 0.109981%

Error Estándar 0.000469164

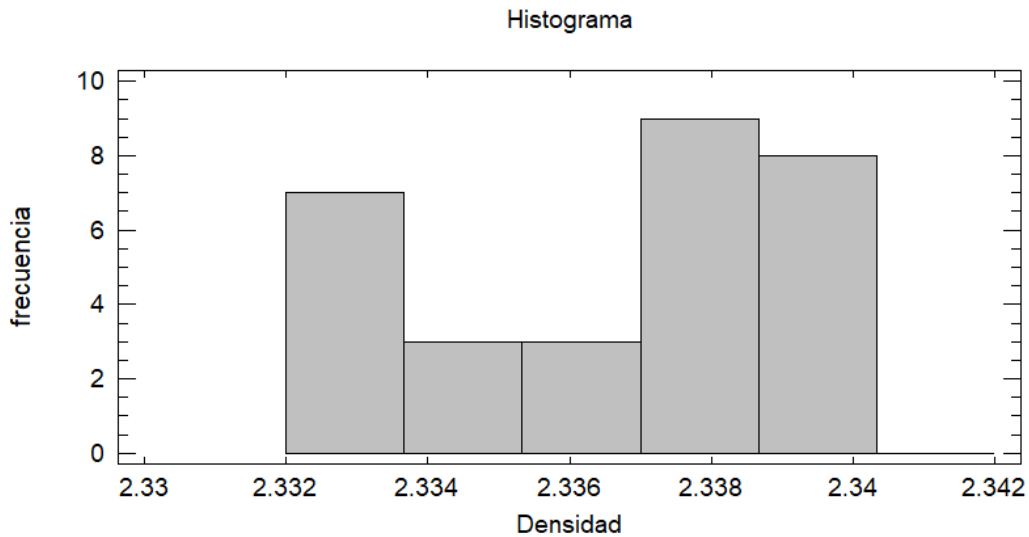
Mínimo 2.333
 Máximo 2.34
 Rango 0.007
 Sesgo estandarizado -0.467375
 Curtosis estandarizada -1.6105
 Suma de Cuadrados 163.777

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para densidad. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla de frecuencias para densidad

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. acum.
	menor o igual	2.332		0	0.0000	0	0.0000
1	2.332	2.33367	2.33283	7	0.2333	7	0.2333
2	2.33367	2.33533	2.3345	3	0.1000	10	0.3333
3	2.33533	2.337	2.33617	3	0.1000	13	0.4333
4	2.337	2.33867	2.33783	9	0.3000	22	0.7333
5	2.33867	2.34033	2.3395	8	0.2667	30	1.0000
6	2.34033	2.342	2.34117	0	0.0000	30	1.0000
	mayor de	2.342		0	0.0000	30	1.0000

Media = 2.3365 desviación estándar = 0.00256972



Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de densidad en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Puede cambiarse la definición de los intervalos pulsando el botón secundario del ratón y seleccionando opciones de ventana. Pueden verse gráficamente los resultados de la tabulación seleccionando Histograma de la lista de opciones gráficas.

Intervalos de confianza para densidad

Intervalos de confianza del 95.0% para la media: 2.3365 ± 0.00095955 [2.33554; 2.33746]

Intervalos de confianza del 95.0% para la desviación estándar: [0.00204654; 0.00345451]

Este panel muestra los intervalos de confianza del 95.0% para la media y la desviación estándar de densidad. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95.0% de confianza, que la media

verdadera de densidad se encuentra en algún lugar entre 2.33554 y 2.33746, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 0.00204654 y 0.00345451.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles. Si los datos no provienen de una distribución normal, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto. Para verificar si los datos provienen de una distribución normal, seleccione resumen estadístico de la lista de opciones tabulares, ó escoja gráfico de probabilidad normal de la lista de opciones gráficas.

Prueba de hipótesis para densidad

Media muestral = 2.3365

Mediana muestral = 2.337

Desviación Estándar de la muestra = 0.00256972

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 4980.13

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba de los signos

Hipótesis Nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Número de valores menores a la mediana hipotética: 0

Número de valores mayores a la mediana hipotética: 30

Estadístico para Grandes Muestras = 5.29465 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 1.19491E-7

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba de rangos con signo

Hipótesis Nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Rango medio de valores menores a la mediana hipotética: 0.0

Rango medio de valores mayores a la mediana hipotética: 15.5

Estadístico para Grandes Muestras = 4.7863 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 0.00000170097

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis nula: $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 0.0001915

Valor-P = 0.0

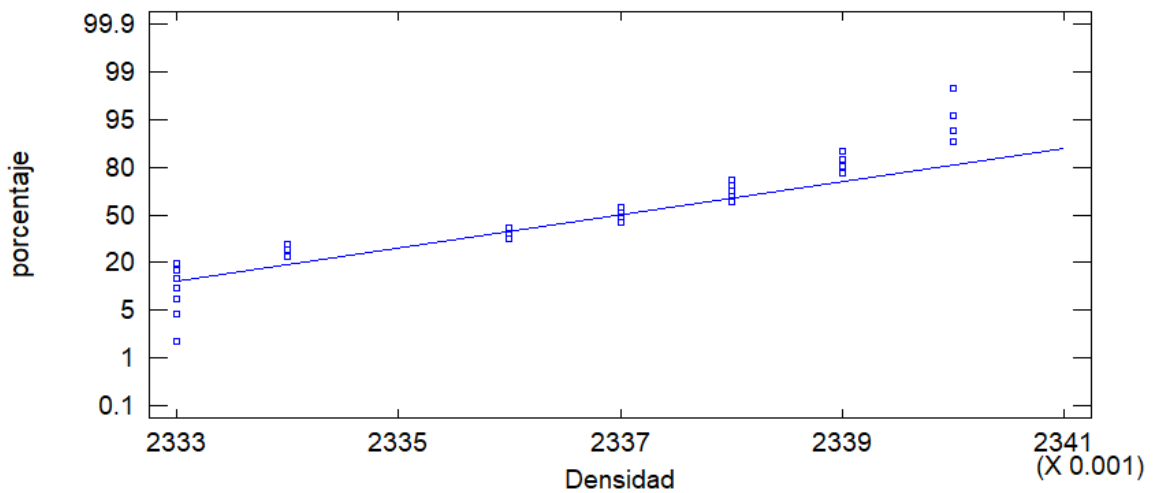
Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Esta ventana muestra los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de densidad. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de densidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de densidad es no igual a 0.0. debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis de que la mediana de densidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana densidad es no igual a 0.0. Se basa en contar el número de valores

arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de rangos con signo evalúa la hipótesis nula de que la mediana de densidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana densidad es no igual a 0.0. Se basa en comparar los rankeos promedio de los valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba del signo y la del signo con rango son menos sensibles a la presencia de valores aberrantes pero son un tanto menos potentes que la prueba-t si todos los datos provienen de la misma distribución normal.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de densidad es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de densidad es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

Gráfico de Probabilidad Normal



Análisis de Una Variable - Estabilidad

Datos/Variable: Estabilidad

30 valores con rango desde 2605.9 a 2644.7

Este procedimiento está diseñado para resumir una sola muestra de datos. Calculará varios estadísticos y gráficas. También incluidos en el procedimiento están los intervalos de confianza y las pruebas de hipótesis. Use los botones de opciones tabulares y de opciones gráficas en la barra de herramientas para análisis, para acceder a estos diferentes procedimientos.

Resumen Estadístico para Estabilidad

Recuento	30
Promedio	2617.8
Media geométrica	2617.78
Varianza	103.657
Desviación estándar	10.1812
Coficiente de Variación	0.388923%
Error estándar	1.85883
Mínimo	2605.9
Máximo	2644.7
Rango	38.8
Sesgo estandarizado	2.59173
Curtosis estandarizada	0.825003
Suma de cuadrados	2.05589E8

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para estabilidad. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la

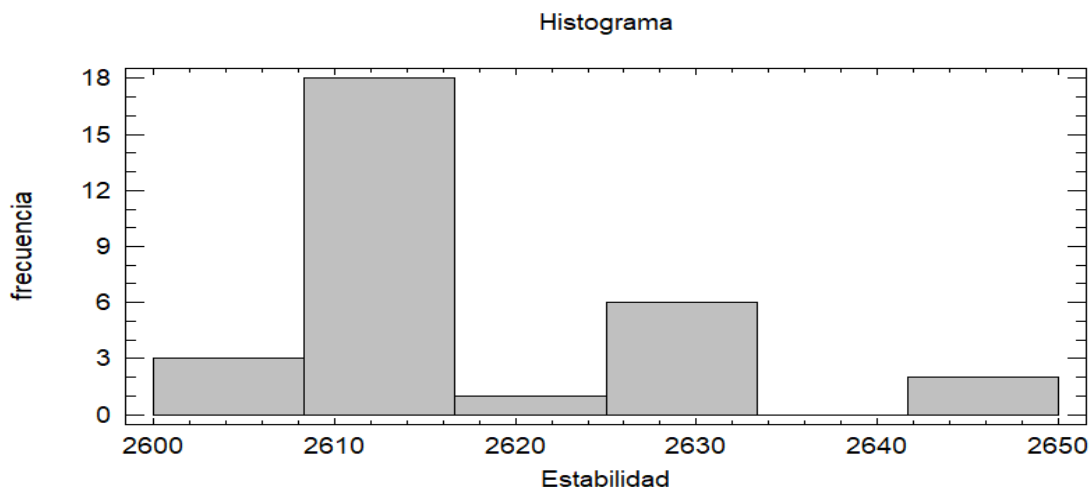
desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla de Frecuencias para estabilidad

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. acumd.
	menor o igual	2600.0		0	0.0000	0	0.0000
1	2600.0	2608.33	2604.17	3	0.1000	3	0.1000
2	2608.33	2616.67	2612.5	18	0.6000	21	0.7000
3	2616.67	2625.0	2620.83	1	0.0333	22	0.7333
4	2625.0	2633.33	2629.17	6	0.2000	28	0.9333
5	2633.33	2641.67	2637.5	0	0.0000	28	0.9333
6	2641.67	2650.0	2645.83	2	0.0667	30	1.0000
	mayor de	2650.0		0	0.0000	30	1.0000

Media = 2617.8 Desviación Estándar = 10.1812

Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de estabilidad en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Puede cambiarse la definición de los intervalos pulsando el botón secundario del ratón y seleccionando opciones de Ventana. Pueden verse gráficamente los resultados de la tabulación seleccionando histograma de la lista de opciones gráficas.



Intervalos de Confianza para Estabilidad

Intervalos de confianza del 95.0% para la media: 2617.8 ± 3.80174 [2614.0; 2621.6]

Intervalos de confianza del 95.0% para la desviación estándar: [8.10839; 13.6868]

Este panel muestra los intervalos de confianza del 95.0% para la media y la desviación estándar de estabilidad. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95.0% de confianza, que la media verdadera de steabilidad se encuentra en algún lugar entre 2614.0 y 2621.6, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 8.10839 y 13.6868.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles. Si los datos no provienen de una distribución normal, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto. Para verificar si los datos provienen de una distribución normal, seleccione resumen estadístico de la lista de opciones tabulares, ó escoja gráfico de Probabilidad Normal de la lista de opciones gráficas.

Prueba de Hipótesis para Estabilidad

Media muestral = 2617.8

Mediana muestral = 2614.3

Desviación estándar de la muestra = 10.1812

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0.0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 1408.31

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba de los signos

Hipótesis Nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Número de valores menores a la mediana hipotética: 0

Número de valores mayores a la mediana hipotética: 30

Estadístico para grandes muestras = 5.29465 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 1.19491E-7

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba de rangos con signo

Hipótesis nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Rango medio de valores menores a la mediana hipotética: 0.0

Rango medio de valores mayores a la mediana hipotética: 15.5

Estadístico para grandes muestras = 4.7863 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 0.00000170097

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 3006.06

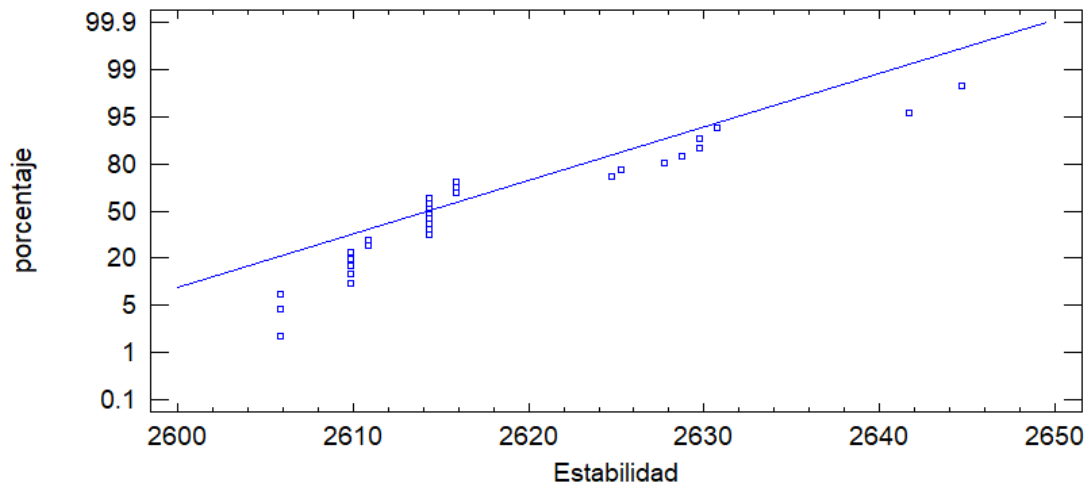
Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Esta ventana muestra los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de estabilidad. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de estabilidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de estabilidad es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis de que la mediana de Estabilidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana estabilidad es no igual a 0.0. Se basa en contar el número de valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de rangos con signo evalúa la hipótesis nula de que la mediana de estabilidad es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana estabilidad es no igual a 0.0. Se basa en comparar los rankeos promedio de los valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba del signo y la del signo con rango son menos sensibles a la presencia de valores aberrantes pero son un tanto menos potentes que la prueba-t si todos los datos provienen de la misma distribución normal.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Estabilidad es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Estabilidad es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

Gráfico de Probabilidad Normal



Análisis de una variable - fluencia

Datos/Variable: Fluencia

30 valores con rango desde 12.1 a 12.55

Este procedimiento está diseñado para resumir una sola muestra de datos. Calculará varios estadísticos y gráficas. También incluidos en el procedimiento están los intervalos de confianza y las pruebas de hipótesis. Use los botones de opciones tabulares y de opciones gráficas en la barra de herramientas para análisis, para acceder a estos diferentes procedimientos.

Resumen Estadístico para Fluencia

Recuento	30
Promedio	12.428
Mediana	12.45
Varianza	0.0068372 4
Desviación estándar	0.0826876
Coficiente de Variación	0.665333%
Error Estándar	0.0150966
Mínimo	12.1
Máximo	12.55
Rango	0.45
Sesgo Estandarizado	-4.97006
Curtosis Estandarizada	8.74314
Suma de Cuadrados	4633.85

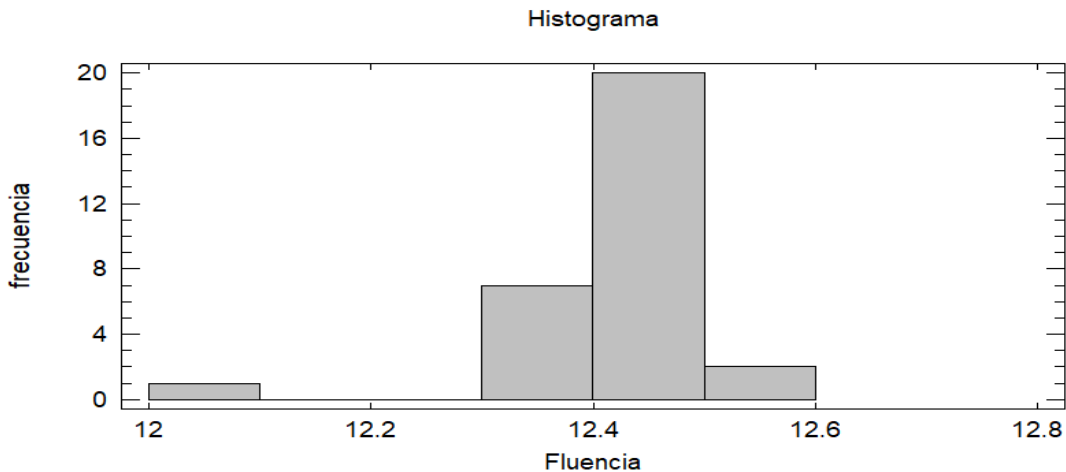
Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para fluencia. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla de Frecuencias para Fluencia

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. acum.
	menor o igual	12.0		0	0.0000	0	0.0000
1	12.0	12.1	12.05	1	0.0333	1	0.0333
2	12.1	12.2	12.15	0	0.0000	1	0.0333
3	12.2	12.3	12.25	0	0.0000	1	0.0333
4	12.3	12.4	12.35	7	0.2333	8	0.2667
5	12.4	12.5	12.45	20	0.6667	28	0.9333
6	12.5	12.6	12.55	2	0.0667	30	1.0000
	mayor de	12.6		0	0.0000	30	1.0000

Media = 12.428 Desviación Estándar = 0.0826876

Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de Fluencia en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Puede cambiarse la definición de los intervalos pulsando el botón secundario del ratón y seleccionando opciones de ventana. Pueden verse gráficamente los resultados de la tabulación seleccionando Histograma de la lista de opciones gráficas.



Intervalos de Confianza para Fluencia

Intervalos de confianza del 95.0% para la media: 12.428 +/- 0.0308761 [12.3971; 12.4589]

Intervalos de confianza del 95.0% para la desviación estándar: [0.065853; 0.111158]

Este panel muestra los intervalos de confianza del 95.0% para la media y la desviación estándar de fluencia. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95.0% de confianza, que la media verdadera de fluencia se encuentra en algún lugar entre 12.3971 y 12.4589, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 0.065853 y 0.111158.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles. Si los datos no provienen de una distribución normal, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto. Para verificar si los datos provienen de una distribución normal, seleccione resumen estadístico de la lista de opciones tabulares, ó escoja gráfico de probabilidad normal de la lista de opciones gráficas.

Prueba de Hipótesis para Fluencia

Media muestral = 12.428

Mediana muestral = 12.45

Desviación estándar de la muestra = 0.0826876

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 823.23

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba de los signos

Hipótesis nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Número de valores menores a la mediana hipotética: 0

Número de valores mayores a la mediana hipotética: 30

Estadístico para grandes muestras = 5.29465 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 1.19491E-7

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba de rangos con signo

Hipótesis nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Rango medio de valores menores a la mediana hipotética: 0.0

Rango medio de valores mayores a la mediana hipotética: 15.5

Estadístico para grandes muestras = 4.77628 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 0.00000178795

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis nula: sigma = 1.0

Alternativa: no igual

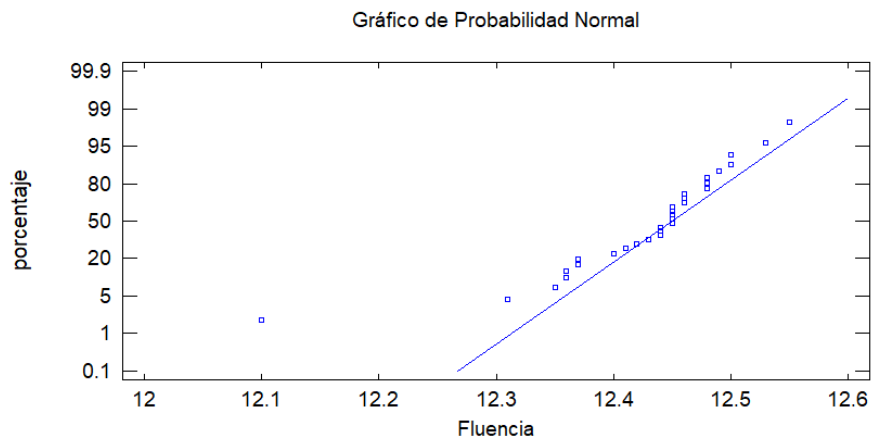
Chi-cuadrado calculado = 0.19828

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Esta ventana muestra los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de fluencia. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Fluencia es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de fluencia es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis de que la mediana de fluencia es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana fluencia es no igual a 0.0. Se basa en contar el número de valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de rangos con signo evalúa la hipótesis nula de que la mediana de fluencia es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana fluencia es no igual a 0.0. Se basa en comparar los rankeos promedio de los valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba del signo y la del signo con rango son menos sensibles a la presencia de valores aberrantes pero son un tanto menos potentes que la prueba-t si todos los datos provienen de la misma distribución normal.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de fluencia es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de fluencia es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.



Análisis de Una Variable - Vacíos

Datos/Variable: vacíos

30 valores con rango desde 3.96 a 4.19

Este procedimiento está diseñado para resumir una sola muestra de datos. Calculará varios estadísticos y gráficas. También incluidos en el procedimiento están los intervalos de confianza y las pruebas de hipótesis. Use los botones de opciones tabulares y de opciones gráficas en la barra de herramientas para análisis, para acceder a estos diferentes procedimientos.

Resumen Estadístico para Vacíos

Recuento	30
Promedio	4.081
Media Geométrica	4.08043
Varianza	0.0048162
	1
Desviación Estándar	0.0693989
Coficiente de Variación	1.70054%
Error Estándar	0.0126704
Mínimo	3.96
Máximo	4.19
Rango	0.23
Sesgo Estandarizado	0.202668
Curtosis Estandarizada	-1.29632
Suma de Cuadrados	499.776

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para vacíos. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos

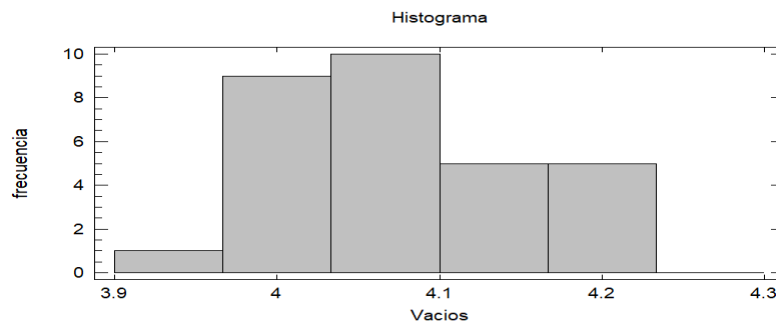
estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla de Frecuencias para vacíos

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. acum.
menor o igual	3.9			0	0.0000	0	0.0000
1	3.9	3.96667	3.93333	1	0.0333	1	0.0333
2	3.96667	4.03333	4.0	9	0.3000	10	0.3333
3	4.03333	4.1	4.06667	10	0.3333	20	0.6667
4	4.1	4.16667	4.13333	5	0.1667	25	0.8333
5	4.16667	4.23333	4.2	5	0.1667	30	1.0000
6	4.23333	4.3	4.26667	0	0.0000	30	1.0000
mayor de	4.3			0	0.0000	30	1.0000

Media = 4.081 Desviación estándar = 0.0693989

Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de vacíos en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Puede cambiarse la definición de los intervalos pulsando el botón secundario del ratón y seleccionando opciones de ventana. Pueden verse gráficamente los resultados de la tabulación seleccionando histograma de la lista de opciones gráficas.



Intervalos de Confianza para vacíos

Intervalos de confianza del 95.0% para la media: 4.081 ± 0.025914 [4.05509; 4.10691]

Intervalos de confianza del 95.0% para la desviación estándar: [0.0552698; 0.093294]

Este panel muestra los intervalos de confianza del 95.0% para la media y la desviación estándar de vacíos. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera o la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95.0% de confianza, que la media verdadera de vacíos se encuentra en algún lugar entre 4.05509 y 4.10691, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 0.0552698 y 0.093294.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles. Si los datos no provienen de una distribución normal, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto. Para verificar si los datos provienen de una distribución normal, seleccione resumen estadístico de la lista de opciones tabulares, ó escoja gráfico de probabilidad normal de la lista de opciones gráficas.

Prueba de Hipótesis para vacíos

Media muestral = 4.081

Mediana muestral = 4.07

Desviación Estándar de la Muestra = 0.0693989

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.0

Alternativa: no igual

Estadístico $t = 322.088$

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba de los signos

Hipótesis nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Número de valores menores a la mediana hipotética: 0

Número de valores mayores a la mediana hipotética: 30

Estadístico para Grandes Muestras = 5.29465 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 1.19491E-7

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba de rangos con signo

Hipótesis Nula: mediana = 0.0

Alternativa: no igual

Rango medio de valores menores a la mediana hipotética: 0.0

Rango medio de valores mayores a la mediana hipotética: 15.5

Estadístico para Grandes Muestras = 4.77438 (aplicada la corrección por continuidad)

Valor-P = 0.00000180488

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

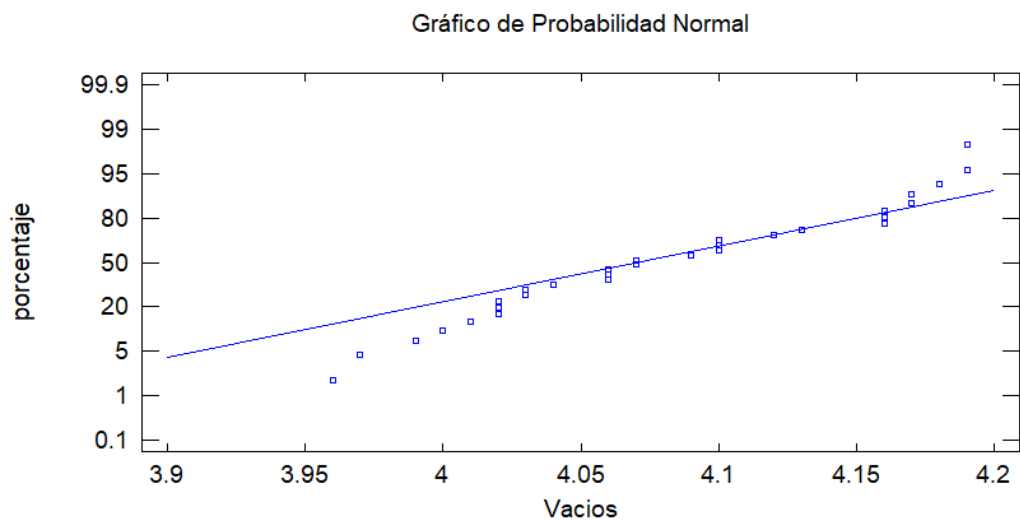
Chi-cuadrado calculado = 0.13967

Valor-P = 0.0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Esta ventana muestra los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de vacíos. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de vacíos es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de vacíos es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis

de que la mediana de vacíos es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana vacíos es no igual a 0.0. Se basa en contar el número de valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba de rangos con signo evalúa la hipótesis nula de que la mediana de vacíos es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la mediana vacíos es no igual a 0.0. Se basa en comparar los rankeos promedio de los valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. La prueba del signo y la del signo con rango son menos sensibles a la presencia de valores aberrantes pero son un tanto menos potentes que la prueba-t si todos los datos provienen de la misma distribución normal. La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de vacíos es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de vacíos es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.



4.7 ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO: CONSTRUCCIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE

Actividad: CARPETA DE CEMENTO
ASFÁLTICO

Unidad: m3

Cantidad: 1117,20

Moneda: Bs.

Descripción	Unid	Cantidad	Precio Unit	Costo Total
1. MATERIALES				
CEMENTO ASFALTICO	ton	0,154	5552,00	855,008
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m ³	0,48	162,00	77,76
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m ³	0,35	162,00	56,7
ARENA CLASIFICADA	m ³	0,49	145,00	71,05
DIESEL	lt	18	3,72	66,96
TOTAL MATERIALES				1127,48
2. MANO DE OBRA				
CHOFER	hr	0,0012	15,14	0,02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0,082	18,3	1,5
OPERADOR EN PLANTA	hr	0,09	23,28	2,1
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0,028	15,14	0,42
CAPATAZ	hr	1,8	22,6	40,68
PEON	hr	0,072	11,98	0,86
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55%)			71,18%	46,03
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DI			14,94%	14,98
TOTAL MANO DE OBRA				125,68
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS > 950	hr	0,0001	42227,00%	0,04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2	hr	0,035	30136,00%	10,55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO	hr	0,028	45875,00%	12,85
ESCOBA MECANICA AUTOPROPULSADO m2/hr	hr	0,028	6793,00%	1,9
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO T	hr	0,09	96234,00%	86,61
RODILLO NEUMATICO TSP > 1000	hr	0,084	33233,00%	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,075	68306,00%	51,23
VOLQUETA > 8m3	Unid	0,03	22306,00%	6,69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			5,00%	6,28
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				204,07
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			18,00%	262,3
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				262,3
5. UTILIDAD				
UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10,00%	171,95
TOTAL UTILIDAD				171,95
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3,09%	58,45
TOTAL IMPUESTOS				58,45
TOTAL PRECIO UNITARIO				1949,928

PROYECTO: CONSTRUCCION PAVIMENTO FLEXIBLE

Actividad: CARPETA DE CEMENTO ASFÁLTICO

Unidad: m3

Cantidad:1117,20

Moneda: Bs.

Descripción	Unid	Cantidad	Precio Unit	Costo Total
1. MATERIALES				
CEMENTO ASFALTICO CON POLIMEROS	ton	0,154	9716,00	1496,264
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m ³	0,48	162,00	77,76
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m ³	0,35	162,00	56,7
ARENA CLASIFICADA	m ³	0,49	145,00	71,05
DIESEL	lt	18	3,72	66,96
TOTAL MATERIALES				1768,73
2. MANO DE OBRA				
CHOFER	hr	0,0012	15,14	0,02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0,082	18,3	1,5
OPERADOR EN PLANTA	hr	0,09	23,28	2,1
AYUDANTE DE MAQUINRIA Y EQUIPO	hr	0,028	15,14	0,42
CAPATAZ	hr	1,8	22,6	40,68
PEON	hr	0,072	11,98	0,86
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55%			71,18%	46,03
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE			14,94%	14,98
TOTAL MANO DE OBRA				125,68
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS > 950	hr	0,0001	42227,00%	0,04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2	hr	0,035	30136,00%	10,55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO	hr	0,028	45875,00%	12,85
ESCOBA MECANICA AUTOPROPULSADO m2/hr	hr	0,028	6793,00%	1,9
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO T	hr	0,09	96234,00%	86,61
RODILLO NEUMATICO TSP > 1000	hr	0,084	33233,00%	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,075	68306,00%	51,23
VOLQUETA > 8m3	Unid	0,03	22306,00%	6,69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			5,00%	6,28
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				204,07
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			18,00%	377,73
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				377,73
5. UTILIDAD				
UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10,00%	247,62
TOTAL UTILIDAD				247,62
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3,09%	84,17
TOTAL IMPUESTOS				84,17
TOTAL PRECIO UNITARIO				2808,004

ANÁLISIS DE COSTO DEL PAVIMENTO CON POLIPROPILENO

El costo de la mezcla con polipropileno resulta más alto que el de la convencional hasta en un 24% pero, se puede reducir los espesores de la carpeta en un 20% y su ciclo de vida aumenta entre un 20-30%.

Valor de la tonelada del cemento asfáltico 5552,00 Bs

Costo del polipropileno por Tonelada

1ton = 1.000.000gr

Cantidad de cemento asfáltico = 1.000.000 gr – 10.000 gr

Cantidad de cemento asfáltico = 990.000gr

COSTO:

Costo de cemento asfáltico restando el polipropileno:

1.000.000gr ——— 5552,00 Bs

990.000gr ——— X Bs

X = 5498,48 Bs

2000 gr ——— 285 Bs

10.00gr ——— X1 Bs

X1 = 1.425 Bs

Costo del cemento asfáltico mas polipropileno

CAB = 5,498.48 Bs + 1.425 Bs

CAB = 6,923.48 Bs/ton

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Después de realizar la investigación de puede concluir lo siguiente

- ✎ La adición de polipropileno generó una disminución de la densidad, debido al aumento de porcentaje de vacíos presentes en la mezcla.
- ✎ Las mezclas densa y semidensa con un porcentaje de polipropileno de 1.5 %, presentan un aumento de estabilidad de 14.70 % y 12.99 % respectivamente; a pesar que dichas mezclas cumplen la especificación en % de vacíos, la fluencia supera lo especificado.
- ✎ Sin embargo, en las mezclas abiertas el comportamiento no fue el mismo, cuando se adiciona el 1.5% de polipropileno los vacíos no están dentro de las especificaciones con un valor más bien en cuenta.
- ✎ La mezcla densa modificada con el 1% de polipropileno presentó mayor estabilidad y un comportamiento muy similar en fluencia y vacíos razón por la cual se determinó que el valor optimo es del 1% para mejorar la mezcla.
- ✎ En la actualidad, para el diseño de mezcla asfáltica ya sea con asfalto convencional o modificado se le ha dado especial importancia al cumplimiento de las especificaciones de calidad de los agregados a utilizar, puesto que se ha logrado indagar que la granulometría del agregado es de gran influencia en la respuesta estructural del pavimento.
- ✎ Para tener una certeza de los resultados obtenidos en el diseño Marshall se realizó un análisis estadístico con un nivel de confianza del 95% para luego determinar el % óptimo de polipropileno después de determinar el % óptimo de CA.

5.2 RECOMENDACIONES

- ✎ Tener cuidado en la caracterización de los materiales, agregados y cemento asfáltico, para así evitar obtener datos erróneos en el momento de obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico.
- ✎ Tener especial cuidado en la temperatura de la mezcla convencional al momento de adicionar el polipropileno e igualmente al compactar la mezcla modificada.
- ✎ Mantener los rangos del agregado pétreo dentro de los estipulados por el INNVIAS, teniendo en consideración los resultados hallados y la gran importancia del mismo en la calidad del asfalto.
- ✎ Se recomienda continuar analizando el efecto de los polímeros en las mezclas asfálticas, por lo que es importante continuar las investigaciones, con diversos tipos de polímeros y diferentes grados de asfalto, para así poder encontrar los parámetros de diseño más convenientes.
- ✎ Se debe incentivar el uso de los asfaltos modificados por parte de las autoridades respectivas, con el fin de empezar a crear una base de datos con los desempeños obtenidos de las mezclas asfálticas en las distintas circunstancias de clima y cargas que se manejan en las distintas carreteras nuestro departamento; a partir de allí se podrán hacer los ajustes necesarios para satisfacer los requerimientos de cada zona.