

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DEL EFECTO QUE TIENE EL LLENANTE MINERAL EN LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DEL EFECTO QUE TIENE EL LLENANTE MINERAL EN LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

1.1. Introducción

Las mezclas asfálticas utilizadas en la ejecución de pavimentos flexibles deben conseguir determinadas características estructurales y funcionales, que son fundamentales para garantizar su resistencia y durabilidad durante su periodo de diseño. En nuestro país se ha vuelto un común denominador la mala calidad de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles, las mismas que al poco tiempo de haber sido colocadas denotan un deterioro, provocando la destrucción de los mismos.

El control de calidad de las mezclas asfálticas se lo realiza sobre una muestra que se extrae de la planta asfáltica, en la cual se determina sus parámetros según el diseño Marshall. La calidad final de la mezcla una vez colocada y compactada, el control consiste en la extracción de testigos en la cual se evalúa su densidad comparándolo con la densidad Marshall. Sin embargo, esta metodología de control no considera los parámetros de mecánicos de la capa asfáltica una vez ejecutado.

Los pavimentos flexibles se encuentran sometidos a un ciclo constante de carga y descarga debido al tráfico al que sirve. El constante paso de tráfico da paso a la aparición de fisuraciones y fallas por ahuellamiento, etc.

La adición de llenante mineral es un factor importante en el comportamiento de una mezcla asfáltica, es importante conocer las características que componen para determinar el efecto que tienen en las mezclas asfálticas.

Por ello se ha llevado a cabo estudios sobre la aplicación del ensayo Marshall orientado a la búsqueda de una metodología de control de calidad de mezclas asfálticas que evalúe sus características físicas y mecánicas de la mezcla.

Con todo lo mencionado en lo anterior, se desarrolla esta presente investigación que estará centrada en el Análisis del efecto que tiene el llenante mineral en las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas. Con los resultados se pretende establecer una herramienta de control que pueda brindar y garantizar una mezcla de buena calidad, como también durabilidad y seguridad, en el tiempo de servicio.

1.2. Justificación

La constante búsqueda del ser humano por mejorar las condiciones de transitabilidad por las vías que hace que se planteen la colocación de carpetas de rodadura que sean resistentes y duraderas tanto a los agentes de intemperismo como a los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito, es por ello que la composición de los materiales y la calidad de los mismos juegan un papel importante para que puedan conseguir las características deseadas del pavimento como la seguridad, comodidad y resistencia. De esta forma y conociendo los factores climáticos, se espera a través de esta investigación la obtención de una mezcla asfáltica con mejor comportamiento físico y mecánico a través de la variación de las características granulométricas.

La estructura típica conformada por carpeta asfáltica, base y subbase granular soportan esfuerzos de tracción debajo de la carpeta asfáltica y de compresión a nivel de las otras capas incluido el terreno de fundación, es por esto que al conocer la coyuntura actual de nuestro país en donde la mayor parte de nuestras carreteras, están concebidos como carreteras de pavimento flexible, tienden a fisurarse prematuramente, debido a los esfuerzos que soportan por la circulación del tráfico pesado.

Asimismo, se observa que los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica, originando esfuerzos en la fibra inferior de la carpeta, por lo que se debe estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas de tal forma conocer y mejorar el diseño de las mezclas asfálticas.

Al estudiar la influencia que tienen los llenantes minerales en la mezcla asfáltica, se podrá ver qué tipo de llenante mineral es el más adecuado para su uso en pavimentos flexibles. También las propiedades que mejora, y en qué proporción.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

Actualmente en nuestro país se ha podido observar en las diferentes obras que se vienen ejecutando, donde ya sea a corto y mediano plazo no proporcionan buenos resultados, por lo tanto, no garantizan la durabilidad de las vías pavimentadas haciendo que el mantenimiento sea ejecutado en menos del tiempo previsible.

El análisis en el diseño de las mezclas asfálticas se realiza a partir de la composición de los agregados minerales, el cemento asfáltico y los parámetros obtenidos según el procedimiento Marshall es la propiedad de la estabilidad. Con esta metodología no se consideran los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica lo cual con lleva a que el control sea insuficiente.

Los diseños de las mezclas asfálticas ejecutadas y reflejadas en la ejecución de la carpeta asfáltica de nuestro medio, tienen un periodo de vida útil, por lo tanto, se debe cerciorar técnicamente que los diseños ejecutados deban cumplir ciertos requisitos de calidad y deban enmarcarse en las normas establecidas.

De esta manera se garantice la correcta transmisión de esfuerzos en todo el paquete estructural con todos sus componentes (carpeta asfáltica, capa base, capa subbase y terreno de fundación) trabajando como un solo elemento estructural.

Las especificaciones técnicas generales de los diferentes proyectos contienen no regulan aspecto del control y seguimiento de la calidad de las mezclas asfálticas en cuanto a su propiedad de resistencia, esto debido a que principalmente un pavimento es concebido para trabajar a compresión.

1.3.1.2. Formulación del problema

¿Qué efectos tiene el llenante mineral en las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas?

1.3.2. Objetivos

1.3.2.1. Objetivo general

Analizar los efectos que tiene el llenante mineral dentro de una mezcla asfáltica, usando polvo de roca, cal hidratada y cemento portland IP-30 en las propiedades de resistencia de pavimentos flexibles.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- ❖ Analizar los aspectos técnicos inherentes a las mezclas asfálticas y sus propiedades.
- ❖ Realizar la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico, según normas establecidas.

- ❖ Realizar los diseños granulométricos a diferentes porcentajes del llenante mineral (0%,2%,4%,6% y 8%).
- ❖ Dosificar y elaborar briquetas con el método Marshall para tres tipos de llenante mineral (polvo de roca, cal hidratada y cemento portland) según diseño granulométrico
- ❖ Determinar las propiedades de las mezclas asfálticas de cada tipo de llenante mineral.
- ❖ Analizar el efecto que tienen los llenantes minerales en las mezclas asfálticas.
- ❖ Establecer conclusiones y recomendaciones.

1.3.3. Hipótesis

Al realizar estudios de las propiedades de resistencia con polvo de roca, cal hidratada y cemento Portland, se podrá analizar los efectos que tiene el llenante mineral en mezclas asfálticas.

1.3.4. Conceptualización de las variables independiente y dependiente

1.3.4.1. Variable independiente

- ❖ Llenante mineral

Tabla 1.1. Operacionalización de la variable independiente

Independiente	Operacionalización			
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción y técnicas
Llenante mineral	Es la parte más fina que cubre la parte porosa de las partículas más grandes, se lo llama también filler.	Polvo de roca	%	Porcentaje propuesto
		Cal hidratada	%	Porcentaje propuesto
		Cemento Portland	%	Porcentaje propuesto

Fuente: Elaboración propia.

1.3.4.2. Variable dependiente

- ❖ Resistencia de mezclas asfálticas.

Tabla 1.2. Operacionalización de la variable dependiente

Dependiente	Operacionalización			
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción y técnicas
Resistencia de mezclas asfálticas	Resistencia a la compresión y deformación diametral	Estabilidad	Lbf	Valor calculado por ecuación
		Fluencia	0,01 pulg	Valor medidodirecto

Fuente: Elaboración propia.

1.3.4.3. Unidad de observación

El presente trabajo de investigación: “*Análisis del efecto que tiene el llenante mineral en las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas*”, se centrará en el efecto que tendrá el llenante mineral en una mezcla asfáltica y de esta manera saber cómo influirá en el comportamiento físico y mecánico.

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Unidad de estudio y decisión muestral

1.4.1.1. Unidad de estudio

En este trabajo se centrará en el efecto que tendrá el llenante mineral en una mezcla asfáltica y de esta manera saber cómo influirá en el comportamiento físico y mecánico.

1.4.1.2. Población

La población usada dentro de la unidad de estudio es la mezcla asfáltica, es decir todos los elementos que la componen, el agregado grueso, agregado fino y el cemento asfáltico. se enmarca en una investigación de tipo de diseño experimental.

1.4.1.3. Muestra

Llenantes minerales: filler polvo de roca, cal hidratada y cemento portland IP-30, de esta manera la investigación está enfocada en un diseño experimental, debido a que la variable independiente es manipulada y la variable dependiente será sometida a medición, para la obtención de resultados.

1.4.2. Métodos y técnicas empleadas

1.4.2.1. Experimentales

La realización del presente trabajo de investigación se plantea como:

Experimental, puesto que se realizará netamente ensayos de laboratorio para caracterizar y lograr valorar el efecto que tendrá la llenante mineral en una mezcla asfáltica. El presente trabajo de investigación será de utilidad, ya que aportará con nuevos conocimientos al plantear la alternativa del Ensayo Marshall para que sirva como herramienta de control y a su vez asegure la calidad de las mezclas durante su elaboración, por lo que las capas asfálticas tengan un mejor desempeño una vez puesta en servicio.

1.4.2.2. Aplicación técnica – práctica

Las deformaciones que se forman en la parte inferior de las capas asfálticas, que constituyen la mayor parte de nuestras carreteras, provocan su rotura mecánica, por lo que deben ser estudiadas con detalle para poder mejorar el comportamiento mecánico y el diseño de los firmes. Para determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas se requiere de métodos suficientemente simples y representativos para que su aplicación también sea aceptada.

1.4.2.3. Plan de trabajo

El porcentaje de filler recomendado según las especificaciones sugiere hasta el 5% y para fines investigativos se procederá a hacer varias entre los porcentajes (0 %, 2%, 4%, 6% y 8%) dichos porcentajes serán variados en la elaboración. Con el criterio asumido se procederá a realizar la fabricación de mezclas asfálticas en caliente adicionando el llenante mineral.

1.4.2.4. Delimitación del espacio

Para la determinación de la propiedad de la Resistencia mediante el Ensayo Marshall de una mezcla asfáltica, se realizará todos los ensayos para la elaboración de los especímenes y su respectiva evaluación en el Laboratorio de Asfaltos de la Carrera de Ingeniería Civil.

1.4.2.5. Delimitación del tiempo

Las mezclas asfálticas que son utilizadas actualmente, no son sujetas a un análisis y control en cuanto a sus propiedades mecánicas.

CAPÍTULO II

ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SUS PROPIEDADES

CAPÍTULO II

ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SUS PROPIEDADES

❖ Marco conceptual

2.1. Mezclas asfálticas o bituminosas

Una mezcla asfáltica se compone de material pétreo, mezclado con asfalto, el material pétreo comúnmente llamado ‘‘agregado ‘‘ se clasifica en agregado grueso, agregado fino y llenante mineral (filler).

Las mezclas asfálticas son utilizadas en la construcción de pavimentos ya sea de capa de rodadura o capas inferiores y su función es proporcionar una superficie cómoda segura en las vías para facilitar la circulación de vehículos sobre esta.

Se entiende por mezcla bituminosa a la mezcla de agregados pétreos en proporciones exactas y un ligante asfáltico, de tal manera que las partículas queden cubiertas por una película continua de este último. La mezcla se fabrica de forma mecánica en centrales fijas o móviles, luego se transporta a obra, donde se extiende y se compacta.

Las operaciones de manejo, extendido y compactación también se realizan a temperaturas controladas y muy superiores a las del ambiente. Su aplicación es una de las más frecuentes en el ámbito vial, se utilizan en capas de rodadura, intermedias y de base y se caracterizan por:

- La calidad de los áridos (limpieza, resistencia mecánica).
- La viscosidad del ligante, que es betún puro o mejorado.
- Una granulometría con tolerancias muy estrictas.
- La alta calidad en la mezcla (compacidad, homogeneidad, calidad de la envuelta).
- Un mayor control durante su fabricación (separación de los áridos en varias fracciones).
- Su excelente comportamiento (estabilidad, durabilidad, tenacidad).
- Su calidad como capa de rodadura (regularidad, textura, comodidad).

2.2. Mezclas asfálticas en caliente

Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centrifugados, según la viscosidad del ligante, se calienta también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. la puesta en obra se realizará a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el llenante mineral y eventualmente aditivos de manera de manera que todas las partículas del agregado queden muy recubiertas por una película homogénea de ligante, su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.

Se emplea tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas. inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas asfálticas, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6 % de betún asfáltico en volumen de agregados pétreos.

2.2.1. Materiales utilizados para las mezclas asfálticas en caliente

Asfalto: El asfalto realiza la función de ligante en la mezcla asfáltica, este puede ser de origen natural o modificado y su función es aglutinar las partículas de agregados. son considerados como los ideales en la pavimentación debido a sus propiedades físicas como la durabilidad, flexibilidad y alta resistencia con los ácidos, sales y alcoholes.

Existen una serie de asfaltos clasificados de acuerdo a su aplicación, entre los que se encuentran los modificados, los cuales se alteran con el fin de obtener mayor durabilidad y elasticidad en las mezclas, un ejemplo de asfalto modificado son los másticos o mastics bituminosos.

Agregado mineral: Los agregados minerales son materiales triturados de varios tamaños, los cuales están encargados de proporcionar resistencia y rigidez a la mezcla. El agregado constituye entre el 90% y el 96% en peso y entre el 75 % y 85 % en volumen de la totalidad de la mezcla.

Aire: El aire corresponde a los vacíos de las mezclas asfáltica.

Filler o llenante mineral: Es el material fino (pasa N ° 200) que mezclado con el asfalto conforman el mastico encargado de proporcionar cohesión, a través de este se mantiene unida la mezcla mineral y es el principal y responsable de la impermeabilidad y durabilidad de mezcla asfáltica.

2.2.2. Funcionalidad de la mezcla asfáltica en un pavimento flexible

El pavimento es la estructura compuesta por varias capas de distintos materiales que se caracterizan por su utilidad estructural para transmitir y soportar cargas en las vías. Las mezclas asfálticas sirven característicamente para soportar directamente las cargas dinámicas producidas por las acciones de neumáticos y transmitir estas a las capas inferiores de la estructura del pavimento, induciendo de esta manera condiciones. Adecuadas de rodadura. Es por eso que se la conoce como capa de rodadura; mientras que el resto de capas están destinadas a ser la capacidad de soporte (capacidad estructural) del pavimento.

Con el fin de determinar el posible comportamiento de la mezcla asfáltica en la estructura del pavimento, se prepara una mezcla en laboratorio en la que se analiza principalmente las propiedades.

2.2.2.1. Densidad

Es el peso de un volumen específico de mezcla. La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón y la densidad obtenida se expresa como un porcentaje de la misma.

2.2.2.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna

compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional.

2.2.3. Contenido de asfalto

El contenido total de asfalto, es la cantidad necesaria que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla, manejo y durabilidad. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es decir, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados, para que estos tengan una manejabilidad aceptable.

2.4. Diseño de mezclas asfálticas

En el estudio de mezclas asfálticas no resulta importante tan solo entender a los agregados y al asfalto por separado, sino su funcionamiento en conjunto a través de su mezcla en porciones adecuadas que puedan tener un buen desempeño apegado a las especificaciones técnicas.

El método Marshall de diseño de mezcla HMA fue desarrollado originalmente por Bruce Marshall en la década de 1940, mientras trabajaba para el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El procedimiento fue posteriormente adoptado y refinado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Una amplia gama de ingenieros y organizaciones han propuesto mejoras y variaciones a este procedimiento de diseño, las publicaciones del Instituto de Asfalto son consideradas por muchos como las mejores referencias para este y muchos otros métodos de diseño mixto (NCRHP, 2011).

2.4.1. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste, de un modo muy general, en seleccionar el tipo y la granulometría de los áridos a utilizar, más el tipo y el contenido de ligante, de manera tal que se cumplan los requerimientos específicos del proyecto para obtener las propiedades pretendidas en una mezcla. Por tanto, se entiende por diseño al proceso de selección de los componentes que intervienen en una mezcla de tal modo de lograr un balance deseado en estas propiedades. También debe considerarse que esta selección estará influenciada por la sección estructural del firme, es decir que la función de la capa

bituminosa puede variar, por lo que siempre deberá tenerse en cuenta que el diseño de mezcla. Moni Smith, Finn y Vallerga han resumido una lista de las propiedades de la mezcla que deben considerarse en el diseño, con los factores que pueden influir en ellas y que se describen a continuación.

Las mezclas asfálticas tienen propiedades que se dividen en dos grupos, en las propiedades físicas y las propiedades mecánicas.

2.4.1.1. Diferencia entre las propiedades físicas y mecánicas

El método Marshall define las propiedades de la mezcla asfáltica, como físicas y mecánicas, donde las propiedades físicas son aquellas que se determinan de a través de pruebas de masa y volumen, y las propiedades mecánicas son aquellas que se determinan a través de pruebas sometidas a resistencia, como se detalla en las siguientes tablas:

2.4.1.2. Propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas

Las propiedades Marshall de las mezclas asfálticas son: densidad, vacíos de la mezcla, relación betún vacíos, vacíos del agregado mineral, estabilidad y fluencia; las mismas que se especifican en los siguientes cuadros:

Tabla 2.1. Propiedades físicas de la mezcla asfáltica

Propiedad física	Definición
Densidad	Es el peso de un volumen específico de mezcla. La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón y la densidad obtenida in situ se expresa como un porcentaje de la misma.
Porcentajes de vacíos	Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional.
Vacíos en el agregado mineral	Los vacíos en el agregado mineral (VAM) 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.
Relación betún de vacíos	El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Propiedad mecánica	Definición
Estabilidad	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos períodos de aplicación de carga) Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
Fluencia	Deformación total expresada en mm que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen diferentes tipos de mezclas asfálticas o bituminosas, dependiendo de los parámetros que estén dispuestos para el análisis de las investigaciones, entre ellas se tiene a las siguientes:

2.4.2.1. Por fracciones de agregado pétreo empleado

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

2.4.2.2. Por el tamaño máximo del agregado pétreo

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

2.4.2.3. Por la granulometría

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

2.4.2.4. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Según la proporción de huecos luego de la compactación, las mezclas se clasifican según la normativa española en las siguientes:

- Mezclas densas y semidensas: De acuerdo a la normalización española tienen un porcentaje de huecos que varía entre el 3 y el 9%, dependiendo de la categoría de tráfico pesado que soporte la capa y de la ubicación de la misma en el firme. Son las más empleadas en capas de rodadura, puesto que su bajo porcentaje de huecos es de un 3 a un 6% en este caso - las vuelve casi impermeables.
- Mezclas gruesas: se diferencian de las anteriores en la granulometría un poco más abierta, en el menor contenido de filler y de ligante. No son tan impermeables como las cerradas y por lo tanto no se aplican en capas de rodadura sino en las intermedias y de base. Mezclas abiertas: su porcentaje de huecos supera el 12%, la estructura formada adquiere resistencia por rozamiento interno.
- Mezclas porosas o drenantes: su porcentaje de huecos es mayor del 20%, tienen de este modo una gran permeabilidad, permiten evacuar el agua de lluvia rápidamente al utilizarlas como capa de rodadura. Difieren de las mezclas cerradas en que su granulometría está formada por un bajo contenido de árido fino para alcanzar tanta porosidad y suelen utilizarse betunes modificados para proporcionar mayor durabilidad.

2.4.2.5. Por la temperatura de puesta

Según sea el proceso utilizado para lograr el cubrimiento de los áridos por el ligante asfáltico. Las mezclas asfálticas se dividen en:

- Mezclas asfálticas en caliente: Son mezclas entre agregado – asfalto que utilizan como material ligante al cemento asfáltico que no es fluido a temperatura ambiente, por tanto, requiere ser calentado a altas temperaturas hasta lograr disminuir su viscosidad a un valor requerido. En el proceso de elaboración es necesario calentar el agregado a temperaturas similares a la del ligante a fin de mantener la viscosidad y en ningún caso, la diferencia de temperatura entre el asfalto y los áridos debe ser mayor a 10 °C.

Figura 2.1. Aplicación de una mezcla en caliente



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

- Mezclas asfálticas en frío: Las mezclas asfálticas en frío se subdividen en dos grupos según el proceso utilizado para fluidificar el asfalto base:
- Mezclas en frío con asfalto rebajado, que son la combinación árida–asfalto que utilizan como ligante un cemento asfáltico rebajado, también conocido como asfalto líquido.

Figura 2.2. Aplicación de una mezcla en frío



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

Tabla 2.3. Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetros de clasificación	Tipo de mezcla
	Masilla
Fracciones de árido empleado	Mortero Hormigón
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En caliente En frío
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$) Semicerradas ($6\% < h < 12\%$) Abiertas ($h > 12\%$) Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t_{max})	Gruesas ($t_{max} > 10\text{mm}$) Finas ($t_{max} < 10\text{mm}$)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas Discontinuas

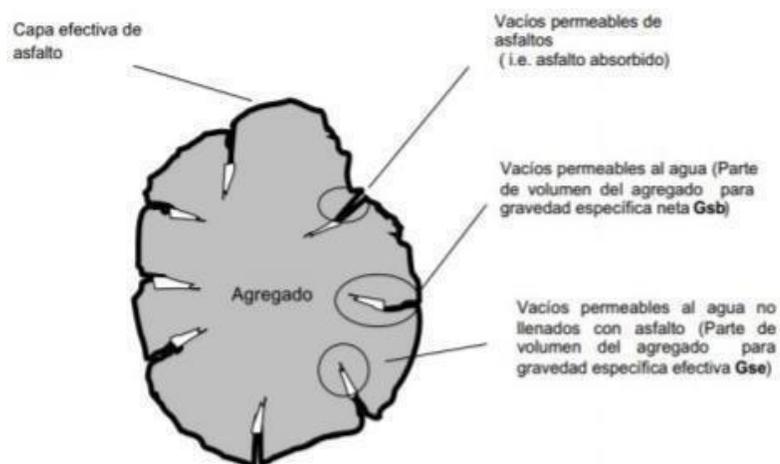
Fuente: Elaboración propia.

De los diversos tipos de mezclas bituminosas existentes en la actualidad, tal como se muestra en la tabla 2.2, en la presente tesis se limitará a estudios: temperatura de puesta en obra (mezcla en caliente), para la elaboración de la mezcla en caliente se utilizará cemento asfáltico convencional 85/100 BETUNEL.

2.4.3. Características volumétricas de las mezclas asfálticas

Para evaluar el comportamiento y desempeño de una MAC preparada en laboratorio y cuando sea puesta en servicio, es necesario definir algunas características principales dentro de sus propiedades volumétricas que se determinan usando medidas de masa y/o volumen de la mezcla y/o sus componentes individuales, tanto del asfalto como del agregado.

Figura 2.3. Parámetros de diseño volumétrico



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

2.4.3.1. Gravedad específica bruta “Bulk” (G_{mb})

La misma se la puede definir como la relación entre el peso de una unidad de volumen de mezcla asfáltica caliente compactada y el peso de un volumen igual de agua (incluyendo vacíos permeables como parte de dicho volumen). (Haddock, 2011)

Es importante conseguir un elevado G_{mb} en las mezclas compactadas en un pavimento terminado, puesto que se pretende alcanzar un desempeño óptimo que perdure. El G_{mb} de una mezcla se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 ó ASTM D2726.

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

El resultado obtenido en el laboratorio se lo considera como una densidad de referencia, y es empleada como guía para verificar si la densidad de las capas asfálticas compactadas es óptima. (Asphalt Institute, 1992)

Donde:

A = Masa de la muestra en el aire (gr)

B = Masa de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr)

C = Masa de la muestra en agua (gr)

2.4.3.2. Densidad máxima teórica (Gmm)

La densidad máxima teórica es la relación entre la masa de una unidad de volumen de mezcla asfáltica sin compactar, y la masa de un volumen de agua (incluyendo vacíos permeables como parte del volumen). Este valor es comúnmente conocido como gravedad “RICE”. (Haddock, 2011).

El ensayo RICE es utilizado para encontrar la densidad o gravedad específica máxima teórica, empleando las normas ASTM D 2041, y AASHTO T 209. Dichas normas establecen el procedimiento necesario para obtener la gravedad o densidad teórica máxima de mezclas asfálticas que no hayan sido compactadas, y que se encuentren a 25°C de temperatura.

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

Donde:

A = Peso picnómetro + agua (gr)

B = Peso picnómetro + agua + material (gr)

C = Peso de la mezcla suelta (gr)

3.4.3.3. Porcentaje de vacíos con aire (Va)

Los vacíos con aire corresponden al volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado revestidos que conforman la mezcla de pavimentación. El “Va” es el porcentaje de vacíos respecto al volumen total de la muestra compactada. (Asphalt Institute, 1997).

En una mezcla es preciso que algún porcentaje de vacíos esté contenido dentro de las mezclas densamente graduadas, para que el asfalto pueda expandirse. Usualmente en los diseños Marshall los porcentajes de vacíos autorizados (en mezclas asfálticas de laboratorio) pueden variar entre 3 y 5 por ciento para capas superficiales (Asphalt Institute, 1992).

$$Va = 100 * \left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \right)$$

Donde:

Va = Vacíos de aire en la mezcla compactada, en porcentaje del volumen total.

Gmm = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

Gmb = Gravedad específica de una mezcla compactada.

2.4.3.4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios intergranulares de aire entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación que incluye los huecos de aire y el contenido efectivo de asfalto, expresado como un porcentaje del volumen total. (Asphalt Institute, 1997)

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bruta del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. Por lo tanto, el VMA se puede calcular restando el volumen del agregado determinado por su peso específico bruto, del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. (Asphalt Institute, 1997).

$$VMA = 100 * \left(\frac{Gmb * Ps}{Gsb} \right)$$

Donde:

Gsb = Gravedad específica bruta del agregado.

Gmb = Gravedad específica bruta de las briquetas compactadas.

Ps = Porcentaje o contenido de agregados.

2.4.3.5. Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Los vacíos rellenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de espacios intergranulares vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran ocupados por asfalto, es decir es el porcentaje de los VMA que están llenos de asfalto efectivo. (Asphalt Institute, 1997).

$$VFA = \frac{100 * (VMA - Va)}{VMA}$$

Donde:

VFA = Volumen llenos de asfalto, en %.

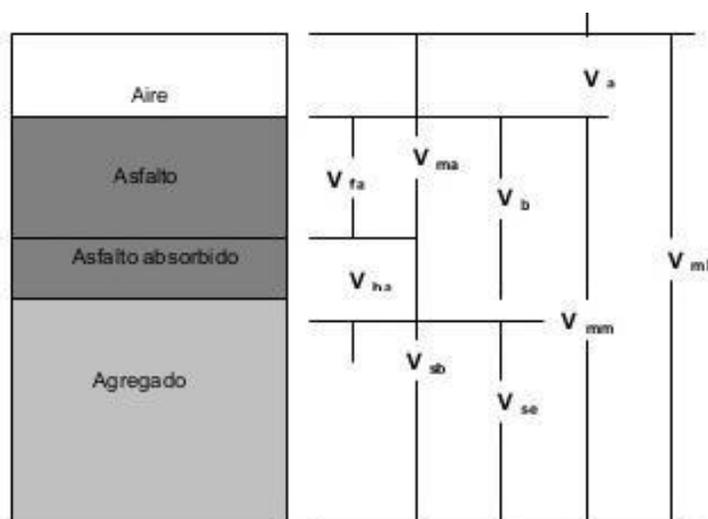
Va = Porcentaje de vacíos con aire.

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

2.4.3.6. Contenido de asfalto efectivo (Pbe)

Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

Figura 2.4. Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

Donde:

V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a = Volumen de vacíos de aire.

V_b = Volumen de asfalto.

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = Volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

V_{se} = Volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

2.4.4. Ensayos que se realizan a las mezclas

Dentro de los ensayos utilizados, muchos son empíricos y se aceptan a través de comparaciones entre los resultados con ellos obtenidos y la experiencia de obra. Presentan el inconveniente que el modo de sollicitación es muy diferente del existente en el firme y no permiten determinar una característica intrínseca del material.

Estos ensayos empíricos pueden proveer importante información siempre y cuando se respeten los límites y criterios utilizados al interpretar los resultados, es decir, es muy importante tener en cuenta en la aplicación de estos ensayos su campo de validez. Sólo pueden aplicarse a la caracterización de mezclas cuando experimentalmente se haya comprobado una buena correlación entre los resultados obtenidos en laboratorio y su comportamiento real en el firme.

También existen los ensayos de simulación, que intentan reproducir en laboratorio las sollicitaciones que producen el fallo en el firme, del modo más aproximado posible.

En todos los ensayos es fundamental que las condiciones de los mismos estén referidas al rango de temperaturas y sollicitaciones que experimentará la mezcla en el pavimento durante su vida de servicio.

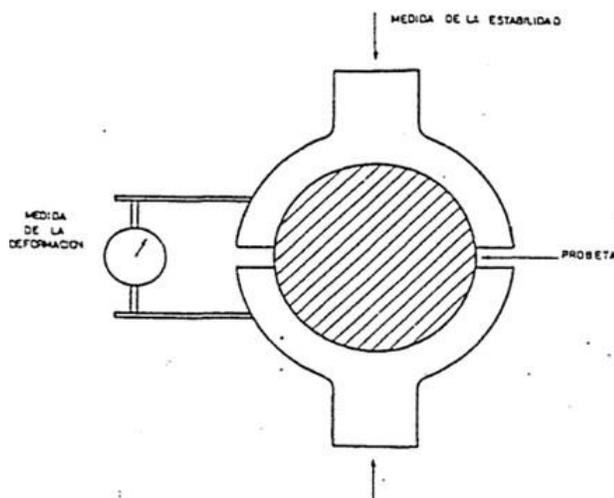
2.5. Método Marshall

Para realizar el ensayo Marshall descrita que el tema central de la presente investigación, se basa en la Norma NLT-159/00 cumple con los parámetros

El propósito del Método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos, y se basa en un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura, compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados, y precalentadas a 60s C, mediante la aplicación de una carga vertical a través de una mordaza perimetral y a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min. El método establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

En la figura 2.4 se observa un simple esquema de la probeta rodeada por las mordazas a través de las cuales se aplica la carga hasta la rotura.

Figura 2.5. Ensayo Marshall



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

2.5.1. Estabilidad

Es un índice de la resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada y está definido como el número total de Newton requeridos para que falle un espécimen de mezcla asfáltica compactada a una temperatura de 60°C

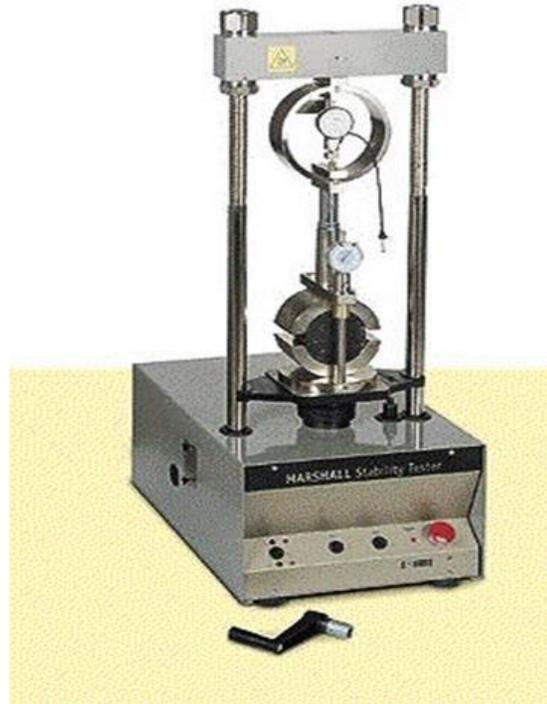
2.5.2. Fluencia

Es un indicador de su flexibilidad y pérdida de resistencia a la deformación, el flujo Marshall el valor en 1/100mm que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la falla de la probeta.

2.5.3. Equipo requerido para la rotura por el ensayo Marshall

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

Figura 2.6. Equipo prensa Marshall



Fuente: www.cuevadelcivil.com.

Prensa: Para ensayar las briquetas se empleará cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de $0,85 \pm 0,02$ mm/s y una carga de 100 kN (10 kgf) como mínimo.

La prensa utilizada para el ensayo Marshall que se describe en la norma NLT-159 cumple con las características requeridas para este ensayo, lo cual lo hace adecuada para satisfacer el objeto de la presente norma (NLT-346/96).

A continuación, se muestra las especificaciones de la prensa Marshall.

Tabla 2.4. Especificaciones de la prensa Marshall

Capacidad	Dial marca 44,5 KN (10000 lbf) máxima.
Anillo de carga	30 KN (6744 lbf) de capacidad.
Controles	Interruptor de funcionamiento arriba/abajo/parada con pilotos indicadores del límite de funcionamiento.
Motor	3/4 CV., reversible.
Velocidad	50,8 mm (2 pulg.) por minuto.
Carrero	64 mm (2,5 pulg.) máximo.
Apertura	254 mm (10 pulg.) entre montantes; 191 mm (7-1/2 pulg.) entre el platino y el pistón de carga.
Dimensiones generales	356 mm o. x 584 mm p. a 1016 mm a. (14 pulg. a 23 pulg. a 40 pulg.).
Pesa	Neto 84 kg (185 libras); embalado 91 kg (200 libras).

Fuente: NLT-159/00.

2.6. Componentes de la mezcla asfáltica

2.6.1. Cemento asfáltico

Es un material oscuro de origen natural, que actúa como ligante en las mezclas asfálticas. Es resistente a una gran cantidad de ácidos y es impermeable, lo que lo hace idóneo para la construcción de superficies de rodadura en los pavimentos flexibles.

El cemento asfáltico es un ligante denso que a la temperatura ambiente es semisólido, usualmente pegajoso y de color variable entre café muy oscuro y negro.

Una de sus principales características es su viscosidad, la cual cambia dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre sometido. Otra característica importante es su durabilidad, la cual hace referencia a la resistencia al envejecimiento, es decir su capacidad de conservar sus características iniciales con el pasar de los tiempos.

El cemento asfáltico se prepara comercialmente en 5 grados o rangos de consistencia definidos a partir del ensayo de penetración. La designación corriente de los cinco grados de cemento asfáltico utilizados en pavimentación y su significado será como se muestra a continuación:

PEN 40 – 50 Cemento asfáltico con penetración entre 40 a 50 décimas de milímetro
PEN 60 – 70 Cemento asfáltico con penetración entre 60 a 70 décimas de milímetro
PEN 85 – 100 Cemento asfáltico con penetración entre 85 a 100 décimas de milímetro
PEN 120–150 Cemento asfáltico con penetración entre 120 a 150 décimas de milímetro
PEN 200–300 Cemento asfáltico con penetración entre 200 a 300 décimas de milímetro

Figura 2.7. Ligante cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

2.6.2. Agregados pétreos

La denominación técnica de “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas y finos. En términos generales, en un ensayo de granulometría por cribado o tamizado, las partículas con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm son reconocidas como gravas. Aquellas con diámetro entre 0.075 mm y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0.075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla.

Los agregados pétreos en un pavimento flexible, se encuentran en diferentes granulometrías, desde la base, hasta la carpeta asfáltica, teniendo en cuenta que en la capa donde se exigen más es donde se ubica la mezcla asfáltica. “En estos últimos materiales los agregados conforman entre el 88% y el 96% de la masa y más del 75% del volumen”. Los agregados deben cumplir con ciertas características para que así nuestras mezclas se desempeñen de mejor manera, ya que de ellos depende una gran parte del comportamiento de las mezclas.

La idoneidad de estos agregados recae sobre sus características tales como la granulometría, durabilidad, textura, porosidad, forma, afinidad con el asfalto, etc.

2.6.3. Llenante mineral

El llenante mineral o filler son partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75 μm , cuya mayor dimensión no supera el doble de la menor, que se incorporan en una mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento.

En la presente investigación se usaron como filler el polvo de roca, el cemento Portland IP-30 y la cal hidratada, sus especificaciones técnicas son:

2.6.3.1. Especificaciones técnicas del polvo de roca

Material fino generado por las chancadoras de eje vertical especialmente apto para ser utilizado como filler en los procesos de pavimentos asfálticos y para las preparaciones de bases chancadas inertes bajo 1 ½ “.

Características técnicas

- Material inerte.
- Material fino resistente y limpio.
- Utilizado en bases estabilizadas y como filler para pavimentos asfálticos.
- Material especialmente apto para trabajarlo en zonas con alto índice de humedad.

Formato e distribución: Metros cúbicos (m^3)

Recomendaciones para la utilización:

En general el polvo de roca deberá cumplir con los requisitos establecidos, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de otras sustancias perjudiciales. Lo que permitirá, tanto su utilización para mejoramiento de bases chancadas en terrenos saturados de humedad como su utilización como filler en la dosificación de pavimentos asfálticos, para los cuales constituye un excelente producto.

Figura 2.8. Llenante mineral polvo de roca

Fuente: Elaboración propia.

2.6.3.2. Especificaciones técnicas de la cal hidratada

Concepto de cal hidratada

La cal hidratada (hidróxido de calcio) es un polvo seco, incoloro y cristalino fabricado mediante el tratamiento de óxido de calcio (cal viva) con agua, en un proceso llamado "apagado".

Propiedades físicas

Tabla 2.5. Propiedades físicas de la cal hidratada

Propiedades físicas	Resultado
Aspecto	Polvo
color	blanco
olor	inoloro
Ignición	incombustible
inflamable	No explosivo
Explosividad	No inflamable
contacto	Reacción exotérica

Fuente: Elaboración propia.

Composición química

- Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Total). 85%* Mín.
- Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Disponibile). 83% Mín.
- Óxido de Magnesio MgO . 0,7% Máx.

- Sílice Si O₂ 1% Máx.
- Insolubles en HCl 1,5% Máx.
- Humedad H₂O 1% Máx.

Los porcentajes de composición pueden cambiar de acuerdo a los lotes de producción.

Aplicaciones

La cal es un material aglomerante igual que el cemento, proviene de la piedra caliza carbonato de calcio. Esta se calcina en hornos a temperaturas aproximadas a los 1.200 °C, formando cal viva (óxido de calcio) y se hidrata para obtener finalmente la cal hidratada Ca (OH)₂, esta se somete a un proceso de molienda, dando como resultado un polvo fino. Se usa en la industria de la construcción ya que es ideal para aumentar la retención de agua y la adherencia en los morteros de mampostería, en el agro para aumentar pH de suelos y en general en industria petroquímica, pinturas basadas en agua, en química como un agente neutralizador de ácido.

Usos

- Desinfectante.
- Pesticida.
- Materiales de construcción.
- Aumento de pH en suelos
- Pinturas.
- Agente para la neutralización de ácidos

Modo de uso

Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que se realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente. Reducir al mínimo la generación y acumulación de polvo. Evitar el contacto con la ropa y otros materiales combustibles.

Precauciones

El producto no se considera una sustancia o mezcla peligrosa.

- **Contacto con los ojos:** Corrosivo. Puede producir severa irritación y dolor. Puede conducir a ulceraciones del epitelio de la córnea. Puede causar ceguera.
- **Contacto con la piel:** Corrosivo. Puede causar severas quemaduras y ampollas, dependiendo de la duración del contacto.
- **Inhalación:** Causa irritación del tracto respiratorio con síntomas como tos, falta de respiración. Puede causar bronquitis química.
- **Ingestión:** Gástrico. La ingestión puede estar seguida de dolor severo, vómitos, diarrea y colapso. Si no ocurre la muerte en 24 horas, puede ocurrir perforación esofágica, manifestada por caída de la presión sanguínea y dolor severo. Puede ocurrir estrechez del esófago semanas, meses o años después de la ingestión, haciendo difícil la deglución.

Controles de exposición y protección personal

- **Protección para los ojos:** Utilizar gafas de seguridad.
- **Protección para los ojos:** Usar máscara cuando exposición de polvo es superior a los límites de exposición.
- **Protección de la piel:** Use guantes. Ropa de mangas largas. Después de la manipulación del producto lavar las manos con agua y jabón.
- **Medidas de higiene:** No comer, tomar o fumar durante su manipulación. Seguir las normas básicas de manipulación de sustancias no peligrosas.

Figura 2.9. Llenante mineral cal hidratada



Fuente: Elaboración propia.

2.6.3.3. Especificaciones técnicas del cemento Portland IP-30

El cemento IP-30 es el producto ideal para cualquier tipo de construcción, estructuras de hormigón armado, pisos, revoques y morteros. Su composición permite acelerar la puesta en servicio y la optimización de los procesos de los sistemas industrializados. Es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. A este proceso se le conoce como hidratación.

Propiedades físicas y químicas del cemento

Los cementos pertenecen a la clase de materiales denominados aglomerantes en construcción, como la cal aérea y el yeso (no hidráulico), el cemento aguante rápidamente y alcanza altas resistencia esto gracias a reacciones complicadas de la combinación cal – sílice.

Las especificaciones de cemento presentan límites para las propiedades físicas y para la composición química.

La comprensión de la importancia de las propiedades físicas es útil para la interpretación de los resultados de los ensayos de los cementos. Los ensayos de las propiedades físicas de los cementos se deben utilizar para la evaluación de las propiedades del cemento y no del concreto. Las especificaciones del cemento limitan las propiedades de acuerdo con el tipo de cemento. Durante la Fabricación, se monitorea continuamente la química y las siguientes propiedades del cemento.

Propiedades físicas

- Superficie específica de finura
- Tiempo de fraguado
- Estabilidad de Volumen
- Resistencia mecánica
- Cintonso de aire
- Calor de hidratación

Propiedades químicas

- Módulo Fundente
- Compuestos secundarios
- Perdida por calcina
- Residuo Insoluble

Análisis químico del cemento

- Alcalis perdidos por calcinación 2%
- CaO 63%
- Cal SiO₂ 20%
- Sílice Al₂O₃ 6%
- Alúmina Fe₂O₃ 3%
- Óxido de fierro MgO 1,5 %
- Oxido de Magnesio K₂O+ Na₂O 1%
- Residuo insoluble 0.5 % SO₃ 2 %
- Anhídrido sulfúrico Ca O Residuo 1%

Propiedades mecánicas del cemento

Los cementos pertenecen a la clase de materiales denominados aglomerantes en construcción, como la cal aérea y el yeso (no hidráulico), el cemento aguante rápidamente y alcanza altas resistencia esto gracias a reacciones complicadas de la combinación cal-sílice.

Características

Sus características físico-mecánicas le permiten brindar el mejor rendimiento en dosificaciones de cualquier tipo de hormigón y mortero para diferentes aplicaciones.

Aplicaciones

- Hormigones.
- Morteros.

- Estabilizaciones en suelos.
- Aumento de resistencia en mezclas asfálticas.

Composición química del cemento

El cemento está compuesto por Clinker y yeso donde la composición química y las fases del Clinker proporcionan diferentes propiedades al cemento, propiedades como altas resistencias tempranas o resistencia a los sulfatos son explicadas directamente por el porcentaje de las fases que contiene el cemento, por esta razón es importante entender cuáles son las dichas fases y cuáles son sus propiedades.

Las materias primas empleadas para la producción de Clinker deben contener: Calcio (Ca), Sílice (Si), Aluminio (Al) y Hierro (Fe). Estos se encuentran en forma de óxidos en las materias primas y estos óxidos son los siguientes: óxido de calcio o cal (CaO), dióxido de sílice o silicato (SiO₂), óxido de aluminio o aluminato (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃).

Cuando se habla de la química del cemento se emplea una abreviatura basada en los óxidos ya mencionados que son transformados en productos más proceso de clinkerización, los principales compuestos del cemento y su abreviatura se encuentran en la tabla.

Tabla 2.6. Principales compuestos del cemento Portland

Nombre	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO*SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO*SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricalcico	3CaO*Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO*Al ₂ O ₃ *Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fuente: elaboración propia.

Cada fase aporta diferentes propiedades al cemento las cuales se describen a continuación.

- Alita: Compuesta por silicato tricálcico y la fase principal ya que constituye del 50% al 70% del clinker, genera alto calor de hidratación y es responsable, en gran parte, por el inicio de fraguado y las resistencias tempranas.
- Belita: Compuesta de silicato dicálcico constituyendo entre el 15% y el 30% del clinker, a comparación de la alita la belita tiene un bajo calor de hidratación y se

hidrata y endurece de manera más lenta así que contribuye a las resistencias a partir de los 7 días.

- Celita o compuestos de aluminato: La fase compuesta principalmente por el aluminato tricálcico genera un alto calor de hidratación. La cual constituye del 5% al 10% del clinker.

Uso y aplicación del cemento

En cualquier tipo de obra es sumamente importante utilizar los materiales y producto adecuados para garantizar su eficiencia, y en la construcción de infraestructuras es vital usar un buen cemento, y con el Portland se consiguen muy buenos resultados; además de ser indispensable y de los mejores para gran variedad de estructuras de concreto.

El cemento Portland es uno de los más conocidos por estar compuesto por clinker pulverizado y sulfato de calcio, es un polvo que por sus propiedades toma una consistencia homogénea rápidamente al estar en contacto con el agua, con la particularidad de que este es mucho más manejable y logra resultados de alta resistencia.

Cuidados que debemos tener con el cemento Portland

El cemento debe estar cubierto si hay riesgo de lluvia y sobre una base lejos de la humedad. Se debe verificar que el bulto no contenga piedras o grumos, originados por fraguados parciales, debido a la antigüedad o a una elevada humedad en el ambiente.

Que peligros tiene el cemento Portland

El cemento puede causar dos tipos de dermatitis—irritante y alérgica. La dermatitis irritante es causada por las propiedades físicas del cemento que irritan la piel. Las partículas finas del cemento, frecuentemente mezcladas con arena u otros agregados para hacer argamasa o concreto, pueden irritar la piel.

Que enfermedades produce el cemento

Cualquiera que inhale el polvo que se genera al cortar las tejas de cemento o al limpiar sus residuos estará expuesto a la sílice respirable, lo cual expone a tal persona al riesgo de contraer silicosis.

Los síntomas de la silicosis pueden ser:

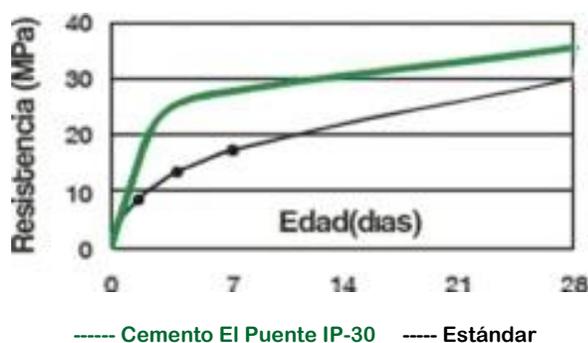
- Dificultad para respirar.
- Fatiga.
- Tos fuerte.
- Dolor en el pecho.

La consistencia normal:

Es aquella fluidez determinada por una cierta cantidad de agua. tiene relación con la calidad del cemento y el tiempo de fraguado. El requerimiento de agua varía entre distintos cementos y puede llegar a suponer una variación de un 20 -30%.

Características resistentes en Cemento Tipo IP-30

Gráfico 2.1. Resistencia del cemento en diferentes edades



Fuente: <https://soboce.com/cemento>.

Servicios de asesoría técnica y laboratorio

La empresa cuenta con un departamento de asesoría técnica para resolver consultas y dudas en la aplicación de los productos y los servicios adicionales que la empresa ofrece, como ser ensayos de control de calidad.

Medidas de prevención al polvo de cemento.

Use guantes resistentes al álcali, mangas largas y pantalones largos para reducir la exposición de la piel al polvo de hormigón o cemento, y botas impermeables más largas que la profundidad del cemento.

Riesgos que tiene el cemento.

El cemento puede causar dos tipos de dermatitis irritante y alérgica. La dermatitis irritante es causada por las propiedades físicas del cemento que irritan la piel.

Figura 2.10. Llenante mineral cemento Portland IP-30



Fuente: Elaboración propia.

❖ Marco normativo**2.7. Normas aplicadas el diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall**

Para realizar el ensayo Marshall descrita que el tema central de la presente investigación, descrita en la Norma NLT-159/00 cumple con los parámetros.

A continuación, se muestra un resumen de los ensayos requeridos para la elaboración y evaluación de mezclas asfálticas como capa de rodadura.

Tabla 2.7. Descripción de ensayos para el método Marshall norma NLT-159/00

Material	Ensayo		Norma		Descripción	Cantidad mínima de material para el ensayo	Especificación y/o Disposición
			ASTM	AASHTO			
Agregados	Granulometría por tamizado (Diseño de Mezcla asfáltica)		C 136 C 117	T 27 T 11	Cumplimiento de requisitos de calidad y la verificación de las características de resistencia y durabilidad	60 kg	CR-2010. Sección: 703.7
	Caracterización de los agregados (Diseño de mezcla asfáltica)	Abrasión de los Ángeles	---	T 96		150 kg	CR-2010. Subsecciones 418.04.02.02, 418.04.02.03 y 418.04.02.04
		Disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio (5 ciclos)	---	T 104			
		Índice de durabilidad agregado grueso y agregado fino	---	T 210			
		Caras fracturadas	D 5821	---			
Asfalto	Clasificación por viscosidad a 60°C		Norma RTCA		Caracterización del asfalto para cumplimiento de calidad y propiedades de diseño de la mezcla asfáltica	2 galones	CR-2010. Sección 702.01
	Clasificación por penetración a 25°C		Norma RTCA			2 galones	
Mezcla asfáltica Diseño en planta o antes de colocación	Graduación de agregados		---	T 30 T 308	Análisis granulométrico según el tipo de mezcla asfáltica	3 kg	CR-2010. Subsección 418.04.02.01
	Contenido de asfalto		---	T 308	Evaluación del contenido de asfalto, comparándolo con el diseño y fórmula de trabajo	3 kg	CR-2010. Subsección 418.06.02
	Contenido de agua		D 95	---	Determinación del contenido de agua en la mezcla	1 kg	---
	Densidad de la mezcla		D 2726 D2041	T 245 T209	Determinación de las densidades para obtener los porcentajes de vacíos en la mezcla	10 kg	CR.2010 Sección: 402.17 y Subsección 418.06.02
	Porcentaje de vacíos de aire		---	---	Verificación del cumplimiento del porcentaje de vacíos de diseño	12 kg	CR-2010 Sección: 402.03 y Subsección 418.06.02
	Estabilidad y flujo		D 6977	T 245	Comprobación del contenido óptimo de asfalto para el porcentaje vacíos especificado, mediante el cumplimiento de la resistencia y deformación máxima permitida	10 kg	
	VMA		....	....	Cantidad de espacios llenos de aire y asfalto dentro de la mezcla	....
	VFA		....	....	Espacios llenos efectivamente de finos en la mezcla	....
	Relación polvo – asfalto		....	....	Verificación de contenido de finos en la mezcla	....
Resistencia retenida a la tensión diametral		D 4123	T 283	Evaluación de la adherencia agregado - asfalto	20 kg		

Fuente: www.cuevadelcivil.com.

❖ Marco Referencial

2.8. Otros estudios relacionados con la presente investigación

En la actualidad existen varios estudios internacionales importantes relacionados al tema que se presenta en la presente tesis, y con el fin de ampliar los conocimientos se presenta a continuación los conocimientos extraídos de las experiencias y estudios que se realizaron.

Así mismo han desarrollado un proyecto de investigación basado en la aplicación del Ensayo de rotura Marsahl extraídos del pavimento, con el fin de obtener un parámetro de resistencia a tracción de la capa asfáltica y que resulte útil para comparar la calidad obtenida con la pretendida. En un principio se verifico la sensibilidad del ensayo, que fue aplicado en mezclas de tipo densas, semidensas y grueso, elaboradas con un asfalto convencional, y de acuerdo a las pautas del pliego de Prescripciones Técnicas Generales de España, y se estudió la variación de resistencia con respecto a variables de composición y elaboración de la mezcla.

De los estudios realizados se han puesto de manifiesto una serie de resultados que confirman la posibilidad de aplicación del ensayo de estabilidad y fluencia en el control de ejecución de las mezclas bituminosas, donde se han propuesto unas resistencias mínimas a exigir a las mezclas, de acuerdo con su tipo de granulometría.

A partir de esta experiencia, en las Universidades Nacionales del Comahue y de La Plata se ha iniciado un proyecto de investigación tendiente a evaluar la posible implementación en Argentina de esta metodología de control adicional. El objetivo principal es conocer los valores de resistencia de las propiedades Marshall de las mezclas elaboradas en este país, teniendo en cuenta tanto el efecto de los diferentes materiales como el de las técnicas constructivas locales.

Así mismo en una investigación realizada en Chile por Carlos W. D., Erika M. P., y Mario D. O. sobre el Control de Calidad de Mezclas Bituminosas Mediante el Ensayo de Resistencia, con base en la experiencia de la Universidad Politécnica de Cataluña, realizan el análisis de los resultados obtenidos aplicando el ensayo de densidad sobre testigos extraídos de vías urbanas de regiones de ese país, comparándolas con probetas que reproducen las características de obra en cuanto a agregados de planta, cemento asfáltico,

etc. En la cual con los resultados que obtienen, llegan a la conclusión de la posibilidad de emplear este ensayo en el control de ejecución de mezcla asfálticas, y que los resultados obtenidos se traducen en características mecánicas del pavimento, dando una idea mejor respecto al comportamiento de esperar para cualquier pavimento.

2.9. Análisis del aporte teórico

En la construcción de una carretera, las mezclas asfálticas constituyen las capas con mayores exigencias dentro de la estructura del pavimento. Hay muchas fases involucradas y actividades diferentes que entran en el proceso de construcción de un pavimento de mezcla asfáltica. Su elaboración, colocación y terminación son procesos complicados, donde intervienen muchos factores que definirán la calidad

El control de calidad del producto suele establecerse sobre la adhesividad y sobre la resistencia a las deformaciones plásticas (estabilidad Marshall), ignorando otras propiedades que pueden resultar igualmente significativas en el comportamiento del material: módulo, abrasión, resistencia a la fatiga, etc. Para ello debe de seleccionarse un tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla que resulte en un balance entre la precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible, pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, de recurso económicos y de equipamiento.

CAPÍTULO III

**RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DIFERENTES
TIPOS DE FILLER**

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DIFERENTES TIPOS DE FILLER

3.1. Criterios del diseño metodológico

3.1.1. Unidad de estudio

- Mezclas asfálticas.

3.1.2. Población

- Mezclas asfálticas con diferentes filler.

3.1.3. Muestra

- Mezclas asfálticas con tres tipos de filler: cal hidratada, cemento Portland IP-30 y polvo de roca.

3.1.4 Muestreo

Se realizó la evaluación del comportamiento de la resistencia en el Ensayo de Marshall, observando los cambios producidos en las mezclas asfálticas elaboradas con materiales de la región.

Tabla 3.1. Cantidad de ensayos de caracterización de los agregados pétreos

Ensayos	N° de ensayos
Granulometría de la grava	3
Granulometría de la gravilla	3
Granulometría de arena	3
Peso específico y absorción de la grava	3
Peso específico y absorción de la gravilla	3
Peso específico y absorción de la arena	3
Peso unitario de la grava	3
Peso unitario de la gravilla	3
Peso unitario de la arena	3
Desgaste de los de los ángeles	3
Equivalente de arena	3
Total	33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2. Cantidad de ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Ensayos	Nº de ensayos
Penetración	3
Ductilidad	3
Punto de inflamación	3
Peso específico	3
Punto de ablandamiento	3
Viscosidad Saybolt Furol	3
Película delgada	3
Total	21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3. Cantidad de briquetas realizados según el estudio

Ensayos de mezclas asfálticas	Porcentajes de filler	Tipo de filler	Nº de ensayos
Briquetas para determinar el óptimo de cemento asfáltico para diferentes porcentajes de filler	0%	Polvo de roca	15
	2%	Polvo de roca	15
	4%	Polvo de roca	15
	6%	Polvo de roca	15
	8%	Polvo de roca	15
Briquetas con los óptimos de cemento asfáltico para diferentes porcentajes de filler variando el tipo de filler	0%	Cemento Portland	3
		Cal hidratada	3
		Polvo de roca	3
	2%	Cemento Portland	3
		Cal hidratada	3
		Polvo de roca	3
	4%	Cemento Portland	3
		Cal hidratada	3
		Polvo de roca	3
	6%	Cemento Portland	3
		Cal hidratada	3
		Polvo de roca	3
8%	Cemento Portland	3	
	Cal hidratada	3	
	Polvo de roca	3	
Briquetas el óptimo de filler y de cemento asfáltico para diferentes tipos de filler	Óptimo	Cemento Portland	3
	Óptimo	Cal hidratada	3
	Óptimo	Polvo de roca	3
Total Nº de briquetas			129

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Procesamiento de datos

El objetivo de los ensayos Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para un determinado tipo de mezcla asfáltica, en este caso, se consideraron las especificaciones técnicas de la Normativa Española, en donde se indican los intervalos permisibles de las propiedades fundamentales para cada tipo de mezcla considerando que se quiere analizar las propiedades mecánicas de resistencia de las mezclas asfálticas la muestra estará dada a partir del Ensayo Marshall de las distintas muestras de mezclas asfálticas elaboradas en caliente (C.A. 85/100).

Los datos o resultados que se obtengan de los ensayos que se realizarán estarán regidas por las normativas correspondientes para cada ensayo (ASTM, AASHTO) para el caso del Así mismo se realizarán comparaciones entre los resultados de obtenidos en las mezclas asfálticas y analizar las variaciones de sus resultados de las mismas, lo cual nos servirá para establecer la confiabilidad del método, la cual significará una alternativa de control de calidad para mezclas asfálticas.

Mediante la realización de los ensayos de laboratorio se obtendrán resultados tanto de agregados, cemento asfáltico, valores de comportamiento de las mezclas asfálticas y el ensayo de resistencias a las mezclas asfálticas, los cuales se harán una comparación para comprobar que estén dentro de los parámetros establecidos por las diferentes normas.

De los datos obtenidos en los diferentes ensayos se realizará una evaluación de los mismos mediante la regresión estadística con la finalidad de desechar o eliminar los valores que se encuentren muy dispersos. De igual forma se utilizarán las mediciones estadísticas (media, moda, mediana, desviación estándar), que ayudaran a establecer si los resultados se encuentran dentro de un rango aceptable.

3.2.1 Descripción de los ensayos de laboratorio

3.2.1.1 Ensayos de laboratorio a realizarse para agregados

Los ensayos de control y verificación de las características de los agregados pétreos para hormigón asfáltico son de gran importancia porque tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material.

- Granulometría
- Peso Unitario del agregado grueso y fino.

- Desgaste de los ángeles
- Equivalente de la arena
- Peso específico del agregado fino (arena)
- Peso específico y adsorción del agregado grueso.

3.2.1.2. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico 85/10

Para caracterizar y evaluar la calidad del ligante asfáltico existen diversos ensayos tradicionales que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material, la importancia del conocimiento de los requisitos y exigencias de calidad del ligante asfáltico.

- Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol
- Ensayo de penetración
- Ensayo de ductilidad
- Ensayo de punto de inflamación
- Ensayo de peso específico
- Ensayo de punto de ablandamiento
- Ensayo de película delgada.

3.2.1.3. Ensayo sobre la mezcla asfáltica (caliente)

- Ensayo método Marshall

3.3. Selección de los materiales

3.3.1. Criterios a utilizar

Los materiales a ser usados en esta investigación deberán cumplir con las especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para la misma se utilizarán materiales existentes en el departamento de Tarija, los cuales se ajustan dentro de las normativas vigentes, además de tenerlas a disponibilidad para su obtención.

3.3.2. Materiales de aporte

3.3.2.1. Agregados pétreos empleados en la mezcla asfáltica

Procedencia

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales (agregados pétreos) de los cuales se extrae material para la ejecución de las mezclas asfálticas para la conformación de la carpeta asfáltica, tanto en la ciudad (bacheos) como los caminos asfaltados, vecinales.

Para el presente proyecto se obtuvo el material pétreo utilizado se obtuvo de la planta de asfalto y áridos (chancadora) que está ubicado en la comunidad de San José de Charajas, la cual provee de material a la Institución SEDECA de la ciudad de Tarija.

Después de analizar sus propiedades se observa que cumple con lo que indica Especificaciones Técnicas para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales y fabricadas en caliente.

Descripción

Cuando se habla de agregados se debe enfocar el problema en los siguientes puntos: calidad del agregado, granulometría de la combinación de agregados y selección de la gradación que garantice el contacto piedra-piedra.

Los agregados son componentes importantes que se utiliza en las mezclas asfálticas para formar el pavimento flexible, y de esa manera construir la infraestructura carretera.

Por lo regular, estos agregados se obtienen de canteras a cielo abierto, lechos de río y sedimentos naturales. No obstante, también es posible encontrarlos en fosas y canteras.

Luego estos agregados son pasados por un proceso de trituración mediante el uso de máquinas especializadas.

Justamente el proceso de trituración al que sea sometida la grava permitirá a los especialistas obtener la granulometría deseada para el proyecto en desarrollo. Vale la pena enfatizar que, a partir de la clasificación de la grava será su aplicación, es decir del tamaño del agregado depende la parte de la obra en la que se usará.

El aspecto de la granulometría en la grava y gravilla es trascendental, debido a que las dimensiones y sus características particulares (tamaños máximos y mínimos) son indispensables para el cálculo del proporcionamiento en la obra.

La grava y gravilla poseen una mayor consistencia si se compara con otros materiales, por ello, se dice que previenen los vacíos en las obras. Dichas propiedades son resultado de su naturaleza, pues provienen de materiales duraderos, con gran capacidad de resistencia y sólidos.

Previo a su uso en las obras carreteras la grava y la gravilla pasan por distintos procesos mecánicos, destacan los de limpieza, triturado y clasificación. De esta manera se elimina el polvo, partículas planas, material ligero, grumos de arcilla y otras sustancias dañinas, las cuales pueden afectar la calidad de la mezcla asfáltica.

Por otra parte, el material fino como ser arena y filler cumplen la función de relleno de los vacíos entre los agregados gruesos, disminuyendo el índice de vacíos, contribuyendo a la consistencia de la mezcla, modificando la trabajabilidad, resistencia al agua y envejecimiento. Su incorporación incrementa la viscosidad del medio cohesivo (resistencia a la deformación).

Las características de los agregados son:

Tabla 3.4. Características del agregado

Agregado	Procedencia	Características
Grava	Piedra chancada de canteras o lechos de ríos	Tamaño entre 1" (25 mm) y N°4 (4,75 mm)
Gravilla	Piedra chancada de canteras o lechos de ríos	Tamaño entre 3/8" (9,5 mm) y N°8 (2,35 mm)
Arena	Desechos de piedra chancada, canteras, sedimentos	Tamaño entre N°4 (4,75 mm) y N°200 (0,075 mm)
Filler	Polvo de piedra chancada, canteras, sedimentos	Tamaño pasa el tamiz N° 200 (< 0,075 mm)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1. Ubicación de la planta de áridos



Fuente: Google Earth.

Figura 3.2. Planta de áridos



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2. Cemento asfáltico empleado en la mezcla asfáltica

El cemento asfáltico BETUNEL 85-100 cuya fabricación y procedencia es en el país de Brasil, debido a que es el único cemento asfáltico que se pudo encontrar en la ciudad además de que cumple con las Especificaciones técnicas avaladas por la ABC, para una mezcla asfáltica convencional densa. Siendo estos analizados en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla 3.5. Especificaciones técnicas del cemento asfáltico

Especificaciones técnicas	Limites	Método	Reproductibilidad
Penetración a 25 °C, 100gr. 0,1 mm	85 a 100	NBR-6578/ASTM D5/AASHTO T201	± 4dmm
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C seg	85 min	NBR-14950/ASTM D86/AASHTO T72	± 2%
Ensayo de la Mancha 20% Xilol	Negativo	/ASTM D2170/AASHTO T102	ND
Punto de Ablandamiento °C	43 a 46	NBR-6560/ASTM D36/AASHTO T53	± 3°C
Ductilidad a 25 °C 5cm/min, cm	100 min	NBR-6293/ASTM D113/AASHTO T51	Consult NBR
Viscosidad de Brookfield a 135°C, cP	214 min	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	ND
Viscosidad de Brookfield a 150°C, cP	97 min	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	ND
Viscosidad de Brookfield a 177°C, cP	28 a 114	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	ND
Temperatura de Mistura, °C (**)(***)	Indicativo	Cálculo	ND
Temperatura de Compactación, °C (**)(***)	Indicativo	Cálculo	ND
Índice de Penetración de Pleiffer	-1,5 a 0,5	Calculo/calculo	ND
Punto de Inflamación C.O.C °C	230 min	NBR-11341/ASTM D92/AASHTO T46	± 18°C
Solubilidad en Tricloroetileno	99 min	NBR-14855/ASTM D2042/AASHTO T44	±0,26%
Densidad a 25 °C c/25 °C	0,99 min	NBR-6296/AASHTO T228	±0,005
Ensayos sobre el residuo película delgada (TFOT) 32mm, 163°C (AASHTO T240)			
(R) TFOT- Pérdida de Masa	1 max	NBR-6578/ASTM D5/AASHTO T201	Consult. NBR
(R) TFOT- Penetración del Residuo, % de la penetración original	50 min	Cálculo	ND
(R) TFOT- Pérdida por calentamiento	1 max	Cálculo / AASHTO T-179	± 4dmm
Densidad a 25 °C c/25 °C	1 a 1,05	NBR-6298/AASHTO T-228	±0,005

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Cemento asfáltico 85/100

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Ensayos de caracterización

3.4.1. Caracterización del agregado pétreo

Los ensayos de caracterización de los agregados se los realizan para el respectivo control y verificación de los materiales pétreos a utilizar, además de mostrarnos el comportamiento del material en obra.

Nota. El procedimiento y cálculos de los ensayos se detallarán en Anexo A.

3.4.1.1 Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO 27, ASTM C-136)

Se denomina granulometría, a la distribución en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

Objetivo

Obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar y graficar la curva granulométrica para establecer la distribución de los materiales de los granos presentes en una masa de suelo, que debe estar dentro de las especificaciones establecidas.

Ensayo de granulometría de agregados

Figura 3.4. Peso del agregado y vaciado a los tamices



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Tamizado de los agregados en el equipo ROP-TAP

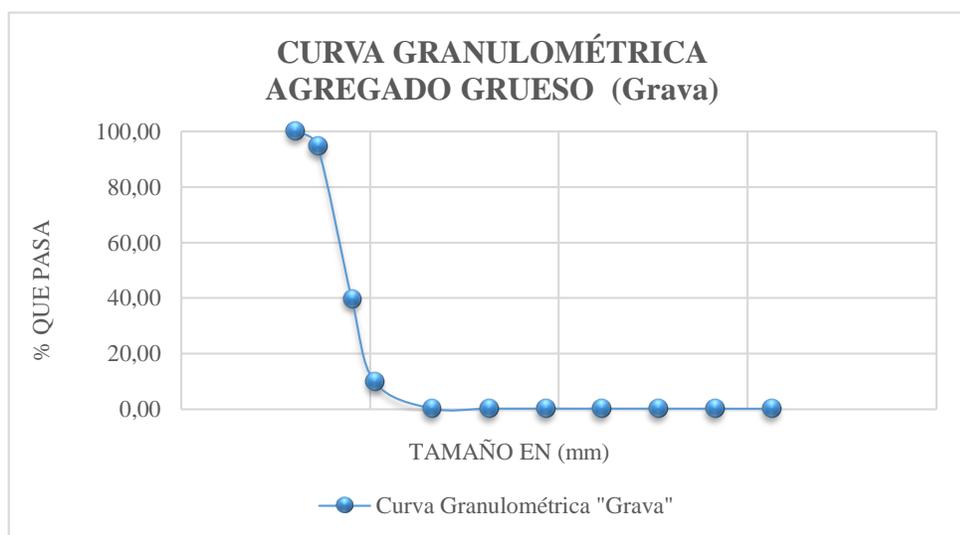


Fuente Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.6.** Resultados de granulometría de la grava

Peso Total de la Muestra tomada (gr).		5000,00			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	259,20	259,20	5,18	94,82
1/2"	12,5	2756,00	3010,20	60,20	39,80
3/8"	9,50	1485,50	4495,70	89,91	10,09
N°4	4,75	487,90	4983,60	99,67	0,33
N°8	2,36	2,90	4986,50	99,73	0,27
N°16	1,18	0,20	4986,70	99,73	0,27
N°30	0,60	0,30	4987,00	99,74	0,26
N°50	0,30	0,30	4987,30	99,75	0,25
N°100	0,15	0,50	4987,80	99,76	0,24
N°200	0,075	0,90	4988,70	99,77	0,23
BASE		5,80	4994,50	99,89	0,11
Suma		5000,0			
Pérdidas		0,0			
MF =		7,89			

Fuente: Elaboración propia.

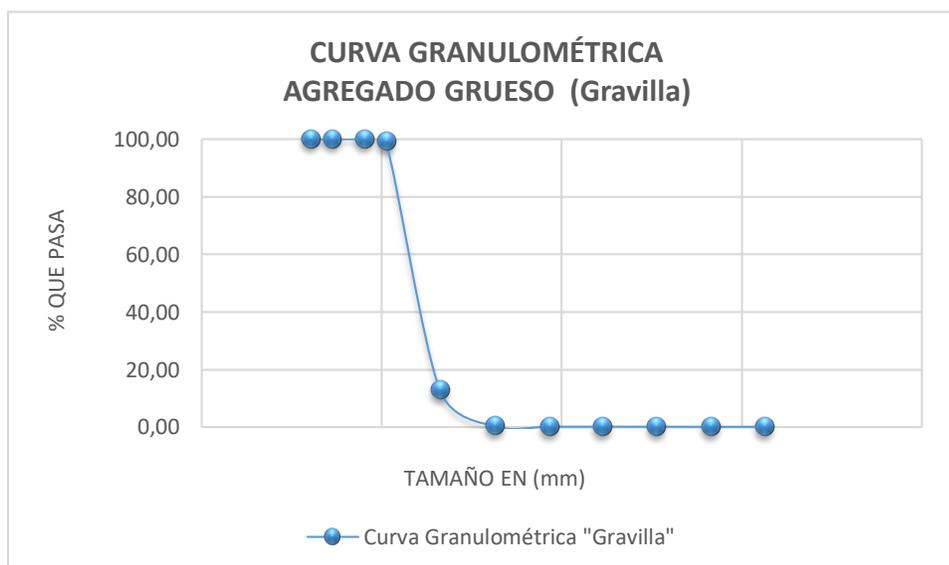
Gráfico 3.1. Curva granulométrica de la grava

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. Resultados de granulometría de la gravilla

Peso Total de la Muestra tomada (gr.)		5000,00			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	30,40	30,40	0,61	99,39
N°4	4,75	4325,10	4355,50	87,11	12,89
N°8	2,36	630,00	4985,50	99,71	0,29
N°16	1,18	6,50	4992,00	99,84	0,16
N°30	0,60	0,30	4992,30	99,85	0,15
N°50	0,30	0,50	4992,80	99,86	0,14
N°100	0,150	1,00	4993,80	99,88	0,12
N°200	0,075	1,00	4994,80	99,90	0,10
BASE		5,20	5000,00	100,00	0,00
	Suma	5000,0			
	Pérdidas	0,0			
	MF =	6,87			

Fuente: Elaboración propia.

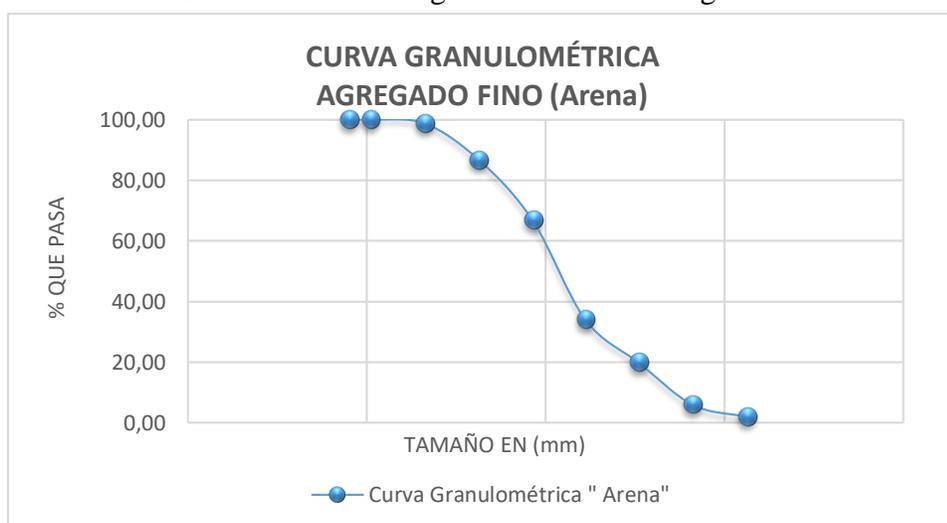
Gráfico 3.2. Curva granulométrica de la gravilla

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Resultados de granulometría de la arena

Peso total de la muestra tomada (gr).		3000,00			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	37,80	37,80	1,26	98,74
Nº8	2,36	360,00	397,80	13,26	86,74
Nº16	1,18	600,00	997,80	33,26	66,74
Nº30	0,60	980,00	1977,80	65,93	34,07
Nº50	0,30	430,00	2407,80	80,26	19,74
Nº100	0,150	415,00	2822,80	94,09	5,91
Nº200	0,075	30,00	2852,80	95,09	4,91
BASE		60,00	2912,80	97,09	2,91
	Suma	3000,0			
	Pérdidas	0,0			
	MF =	3,86			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3. Curva granulométrica de la gravilla

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Método para determinar el equivalente de arena (ASTMD-2419)

Definición

El equivalente de arena está definido como el porcentaje de arena propiamente con respecto al total de arena y de impurezas coloidales flocculantes, partículas arcillosas. Este método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena.

Establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4,75 m (Nº4).

Objetivo

Tiene como objetivo determinar la calidad que tiene un suelo que se va a emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

Figura 3.6. Materiales para realizar el ensayo equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7. Defloculante para el ensayo equivalente de arena



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.8. Defloculante actuando en la separación del filler de la arena



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.9. Medición de la altura de la arena



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

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

Tabla 3.9. Resultados del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,80	13,30	73,68
2	10,70	14,6	73,29
3	10,80	14,70	73,47
Promedio			73,48

Equivalente de Arena (%)	NORMA
73,48	> 50%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.3. Desgaste de los Ángeles (ASTM C 131, AASHTO T-96)**Definición**

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los ángeles.

Procedimiento

La muestra y la carga abrasiva correspondiente, se colocan en la máquina de Los Ángeles, La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad, luego se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el de 1,70 mm (No.12).

Figura 3.10. Lavado y secado en el horno antes del desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11. Introduciendo la muestra y las cargas abrasivas



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.12. Agregado después del desgaste



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13. Tamizado del agregado triturado en el tamiz N°12



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.14. Guardado del polvo de roca que pasa tamiz N°200, para filler



Fuente Elaboración propia.

Resultados:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{INICIAL}} * 100$$

Tabla 3.10. Pesos de agregado y número de esferas según la gradación

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de Esferas		12	11	8	6
N° de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de Rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles (grava 3/4")

Gradación	Peso Inicial (Gr)	Peso Final (Gr)	% de Desgaste	Especificación ASTM
A				35 % Max
B	5000	3605	27,9	35 % Max
C				35 % Max
D				35 % Max

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla 3/8")

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste	Especificación ASTM
A				35 % Max
B				35 % Max
C	5000	3706	25,88	35 % Max
D				35 % Max

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4. Peso específico del agregado grueso (ASTM D127, AASHTO T85)

Este método tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas. Para agregados con tamaño igual o mayor a 4,75 mm (tamiz N° 4). Se comienza por mezclar completamente el agregado de 3/4 una cantidad de 2069 gramos, y el agregado de 3/8 una cantidad de 1740 gramos.

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C.

Después se lo sumerge en agua, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado saturada con superficie seca (S.S.S.).

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25°C.

Figura 3.15. Ensayo de peso específico del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.16. Material saturado y superficialmente seco



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.17. Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.13.** Resultados del ensayo de peso específico de la grava

Peso específico a granel (gr/cm³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm³)	Peso específico aparente (gr/cm³)	% de absorción
2,60	2,64	2,70	1,26

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla

Peso específico a granel (gr/cm³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm³)	Peso específico aparente (gr/cm³)	% de absorción
2,62	2,65	2,72	1,43

Fuente: Elaboración propia.

*Volumen de agua desplazado o sea el volumen de la muestra.

3.4.1.5. Peso específico del agregado fino (ASTM C 128, AASHTO T84)**Objetivo**

Este método tiene como objetivo determinar el peso específico aparente y peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Resumen del método

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

Figura 3.18. Muestra de arena saturada en agua por 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.19. Determinación del peso superficialmente seco



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.20. Calibración del matraz



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.21. Peso superficialmente seco de cada muestra en un matraz



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.22. Pesaje del matraz + agua + muestra y secado por 24h



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.23. Secado de la muestra en el horno y peso seco



Fuente Elaboración propia.

Resultados:

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de peso específico de la arena

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,72	2,71	2,76	0,51

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.6. Peso unitario de los agregados (ASTM C29, AASHTO T19)

El peso unitario de los agregados fino y grueso tiene como objetivo describir el peso unitario de la medida de agregados a la temperatura ambiente.

El peso unitario es el peso de la unidad de volumen de material a granel en las condiciones de compactación y humedad en que se efectúa el ensayo.

Figura 3.24. Compactado del agregado grueso en el molde de peso unitario



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.25. Enrasado de la muestra



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.26. Pesaje de la muestra + molde



Fuente Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.16.** Resultados del peso unitario suelto y compactado de la grava

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,41	1,48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17. Resultados del peso unitario suelto y compactado de la gravilla

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,39	1,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18. Resultados del peso unitario suelto y compactado de la arena

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,53	1,70

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Caracterización del cemento asfáltico

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del ligante asfáltico, es necesario realizar los diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real, en este capítulo realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el ligante asfáltico, que ejecutamos para evaluar nuestra mezcla asfáltica. Estos ensayos se los realizó en el laboratorio de asfaltos de la universidad Juan Misael Saracho.

3.4.2.1. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM 102)

Definición

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar 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.

Procedimiento

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro.

Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso. Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida, de manera que quede introducido más de 6,3 mm y menos de 9,5 mm.

Se vierte la muestra en el tubo hasta que deje de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante.

Se coloca el frasco calibrado de 60 cm³ en una posición tal que quede centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco

El ensayo se empieza sacando rápidamente el tapón del corcho del tubo, poniendo en marcha al mismo tiempo el cronómetro. Se para el cronómetro cuando la parte inferior del menisco alcanza la graduación del cuello del frasco calibrado.

Figura 3.27. Control de la temperatura a 135°C



Fuente Elaboración propia.

Figura 3.28. Determinación del tiempo que tarda en llenar 60 ml



Fuente Elaboración propia.

Se pone en marcha el ductilímetro, el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada, hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que se haya separado ambas pinzas hasta ese instante.

Resultados:**Tabla 3.19.** Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt-Furol

Promedio (seg)	Especificaciones	
	Mín.	Máx.
364,5	85	400ssf

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Ensayo de ductilidad (ASTM D113 AASHTO T51)

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos.

Procedimiento

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes. Se vierte el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire.

Se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de 25°C durante otros 30 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

Figura 3.29. Moldes de ductilidad llenos con el cemento asfáltico

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.30. Moldes en baño María a 25°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.31. Momento del ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Tabla 3.20. Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio (cm)	Especificaciones	
	Mín.	Máx.
118	100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Ensayo de punto de inflamación (ASTM D 92, AASHTO T 48)

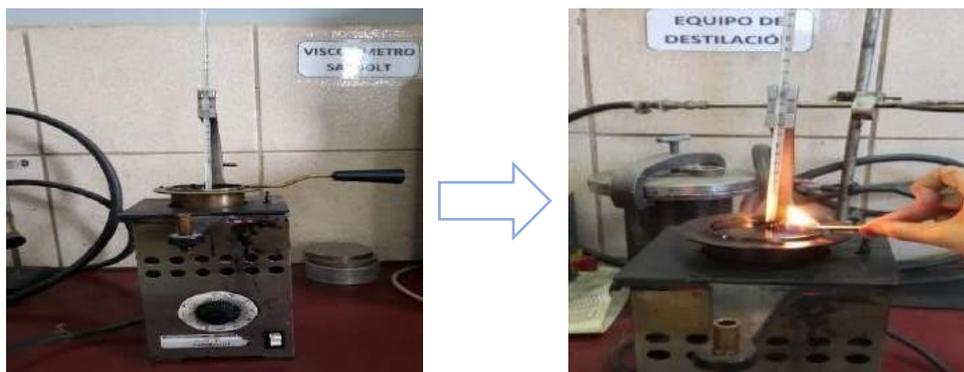
Este método describe el procedimiento para determinar la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, creando un destello en presencia de una llama abierta.

Procedimiento

Llenar la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Cuando la temperatura de la muestra este por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación.

Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Figura 3.32. Ensayo punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Tabla 3.21. Resultados del ensayo de punto de inflamación

Promedio(°c)	Especificaciones	
	Mín.	Máy.
285	232	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Ensayo de peso específico (ASTM D-70)

Se entiende como peso específico de un 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°. Se limpia el picnómetro para su calibración, esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración. Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A.

El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Posteriormente verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

Figura 3.33. Pesaje de cada frasco para peso específico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.34. Calibración de los frascos con agua destilada en baño María a 25°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.35. Calibración del frasco más cemento asfáltico a 25°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.36. Peso del frasco + cemento asfáltico + agua



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.22.** Resultados del ensayo de peso específico del asfalto

Promedio (gr/cm ³)	Especificaciones	
	Mín.	Máx.
1,008	1	1,05

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Ensayo de penetración (ASTM D-5, AASHTO T201)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

Procedimiento

Se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 gramos de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente hasta que este fluido se lo coloca en 3 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en el baño María por una hora a de 25°C.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Figura 3.37. Cemento asfáltico en los moldes de penetración a 25°C en baño María



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.35. Realización del ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Tabla 3.23. Resultados del ensayo de penetración

Promedio (mm)	Especificaciones	
	Mín.	Máx.
94	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.6. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D 36-89, AASHTO T 53-92)

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos.

Procedimiento

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una temperatura determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Figura 3.39. Anillos con cemento en baño María invertido a 5°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.40. Ensayo puesto en calor con las esferas de acero



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.24.** Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Promedio(°c)	Especificaciones	
	Mín	Máx
47	41	53

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.7. Ensayo de la película delgada (ASTM D 1754)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar las pérdidas en peso de aceite y de compuestos asfálticos cuando se calientan.

Procedimiento.

Agitar y mezclar completamente la muestra calentándola, para asegurar una muestra homogénea antes de remover la porción para ensayo. Colocar $50 \pm 0,5$ g de la muestra en el recipiente y pesar con aproximación a 0,01 g. Si el material se ha calentado, enfriar a temperatura ambiente antes de hacer la pesada inicial.

Regular el horno a una temperatura de 163°C (325°F), y colocar el recipiente con la muestra en su interior sobre la placa circular, en uno de los huecos. Cerrar el horno y poner a girar la placa durante todo el ensayo, a una velocidad de 5 a 6 r.p.m. Mantener la temperatura a $163^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($325 \pm 1,8^{\circ}\text{F}$) durante 5 horas después de que la muestra se haya Introducido y el horno alcance la temperatura especificada. El tiempo de 5 horas empieza cuando la temperatura llegue a 162°C (324°F).

Al terminar el período de calentamiento se saca la muestra, se deja enfriar y se pesa calculando la pérdida en peso que se ha producido.

Figura 3.41. Pesaje de platillos para horno rotatorio de película delgada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.42. Peso del cemento asfáltico + planillo antes de llevar al horno



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.44. Pesado del platillo + muestra después de 5 hr en el horno



Fuente: Elaboración propia.

Resultados:**Tabla 3.25.** Resultados del ensayo de película delgada

Promedio (gr)	Especificaciones	
	Mín.	Máx.
0,8	0	1

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Resultados de los ensayos de caracterización de los materiales

Después de realizar los ensayos, se obtienen los siguientes cuadros resumen de resultados de los agregados pétreos y del cemento asfáltico.

Tabla 3.26. Resumen de resultados de los agregados pétreos

Ensayo		Resultado	Especificación		Norma
Desgaste de los ángeles (grava)		27,9	>35%		ASTM C 131
Desgaste de los ángeles (gravilla)		25,88	>35%		ASTM C 131
Equivalente de arena		92,90	>50%		ASTM D 2419
Peso específico granel(grava)		2,61	2,35	2,75	ASTM D 127
P.E. saturado sup. Seca		2,64			
P.E. aparente		2,70			
Absorción		1,26			
Peso específico granel(gravilla)		2,62			
P.E. saturado sup. Seca		2,65			
P.E. aparente		2,72			
Absorción		1,43			
Peso específico granel(arena)		2,71			ASTM C128
P.E. saturado sup. Seca		2,72			
P.E. aparente		2,75			
Absorción		0,51			
P.U. Grava	Suelto	1,41			ASTM C29
	Compactado	1,48			
P.U. Gravilla	Suelto	1,39			
	Compactado	1,43			
P.U. Arena	Suelto	1,53			
	Compactado	1,70			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.27. Resumen de resultados del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado	Especificación		Norma
Viscosidad Saybolt Furol	364	85	-	ASTM E102
Ductilidad	118	100	-	ASTM D113
Punto de inflamación	285	230	-	ASTM D92
Peso específico	1,04	1	1,05	ASTM D70
Penetración	94	85	100	ASTM D5
Punto de ablandamiento	47	42	53	ASTM D36
Película delgada	0,8		1	ASTM D1754

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ensayos aplicados en la investigación

La mezcla asfáltica que se utilizará será una mezcla asfáltica densa elaborada en caliente con cemento asfáltico convencional 85/100, siguiendo la metodología Marshall.

Para llevar a cabo la investigación se proceden a realizar dosificaciones de mezclas asfálticas con los tres filler: cal hidratada, cemento Portland IP-30 y polvo de roca.

3.5.1. Ensayos de elaboración de mezclas asfálticas

El objetivo del diseño de una mezcla es desarrollar una combinación económica de agregados y asfalto. La forma, procedimiento o método que se utilice para diseñar una mezcla debe cumplir con todos los requerimientos correspondientes a los pavimentos flexibles, tales como la estabilidad, cantidad mínima de vacíos, trabajabilidad, etc.

El diseño de una mezcla se regula a través de la elección de una franja granulométrica según las especificaciones técnicas y un porcentaje de asfalto, de modo que una vez elaborada y puesta en terreno, cumpla con las exigencias para la cual fue diseñada.

Los métodos de dosificación buscan determinar un porcentaje de asfalto óptimo a partir del análisis de las propiedades de la mezcla. Estos métodos de diseño se basan en el empleo de ensayos mecánicos.

Entre los métodos de diseño más conocidos para mezclas asfálticas, se puede mencionar el método Marshall y el método Superpave. Para esta investigación se utilizará el método de diseño Marshall.

3.5.1.1. Diseños de mezcla asfáltica por el método Marshall

El método de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

3.5.1.2. Franja granulométrica para mezclas asfálticas densas

Para la elaboración de una mezcla densa o cerrada, la granulometría de las distintas fracciones de áridos constituyentes de la mezcla (incluyendo el filler en diferentes porcentajes) deben estar comprendidas en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las franjas granulométricas de control. Estas franjas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica del agregado utilizado.

Tabla 3.28. Franjas granulométricas para mezclas densas

Tamaño de tamiz	Designación de la mezcla usando el tamaño máximo nominal de agregado				
	37,5 mm (1 ½ in)	25 mm (1 in)	19 mm (¾ in)	12,5 mm (½ in)	9,5 mm (¾ in)
	Porcentaje total que pasa (en peso)				
50 mm (2 in)	100	-	-	-	-
37,5 mm (1 ½ in)	90 a 100	100	-	-	-
25,0 mm (1 in)	-	90 a 100	100	-	-
19,0 mm (¾ in)	56 a 80	-	90 a 100	100	-
12,5 mm (½ in)	-	56 a 80	-	90 a 100	100
9,5 mm (¾ in)	-	-	56 a 80	-	90 a 100
4,75 mm (N° 4)	23 a 53	29 a 59	35 a 65	44 a 74	55 a 87
2,36 mm (N° 8)	15 a 41	19 a 45	23 a 49	28 a 56	-
1,18 mm (N° 16)	-	-	-	-	-
0,60 mm (N° 30)	-	-	-	-	7 a 23
0,30 mm (N° 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	-
0,15 mm (N° 100)	-	-	-	-	2 a 10
0,075 mm (N° 200)	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	5 a 12
Cemento asfáltico Porcentaje en peso del total de la mezcla	3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a

Fuente: Construcción de pavimentos. Serie de materiales No. 22 (MS-22).

3.5.1.3. Justificación de los porcentajes de filler aplicados a la investigación

Según bibliografía de la distribución granulométrica por el método Marshall para mezclas asfálticas con tamaño máximo de 1”se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 3.29. Distribución granulométrica para tamaño máximo 1”

Tamices	tamaño	Especificaciones	
		ASTM D3515	
	(mm)	Mínimo	Máximo
1"	25,4	100	100
¾"	19,0	90	100
¾"	9,50	56	80
N°4	4,75	35	65
N°8	2,36	23	49
N°50	0,30	5	19
N°200	0,075	2	8

Fuente: Norma (ASTM D 3515).

Bajo el concepto de filler, que es todo material que pasa el tamiz N° 200 y observando la tabla 3.40. según norma ASTM D 3515, se definen que los porcentajes de filler de: 2% mínimo y 8% máximo, por lo tanto, en la presente investigación los porcentajes varían cada 2%, quedando así los siguientes porcentajes: 0%, 2%, 4 %, 6% y 8%.

Donde el 0% no contiene ningún tipo de filler porque es el punto inicial de arranque comparativo.

3.5.1.4. Curva granulométrica aplicada en la investigación por el método Marshall

En base a los parámetros de granulometría exigidos para la elaboración de mezclas asfálticas densas, expuestas en la tabla 3.26, con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de los agregados (grava, gravilla, arena, filler) con la finalidad de cumplir con los requisitos planteados, ya que casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con lo requerido en las franjas granulométricas.

Para la presente investigación se realizará la mezcla o combinación de los agregados provenientes de la planta de asfalto y áridos de la comunidad de San José de Charaja, para ello la combinación se dispondrá de la siguiente manera:

Agregado grueso (Grava de 3/4) 25%

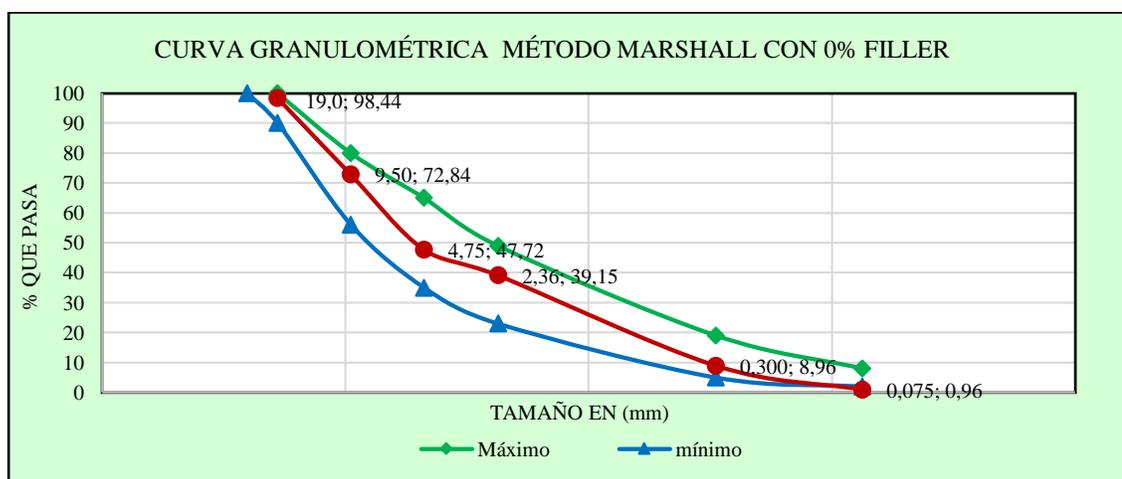
Agregado grueso (Gravilla de 3/8) 31%

Agregado fino (Arena) 44%

Tabla 3.30. Distribución granulométrica para 0% filler

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
		(%)	(%)	(%)	(%)	100,00					
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	77,76	0,00	0,00	0,00	77,76	77,76	1,56	98,44	90	100
1/2"	12,5	826,95	0,00	0,00	0,00	826,95	904,71	18,09	81,91	-	-
3/8"	9,50	445,65	7,60	0,00	0,00	453,25	1357,96	27,16	72,84	56	80
Nº4	4,75	146,37	1081,28	28,35	0,00	1256,00	2613,96	52,28	47,72	35	65
Nº8	2,36	0,87	157,50	270,00	0,00	428,37	3042,33	60,85	39,15	23	49
Nº16	1,18	0,06	1,63	450,00	0,00	451,69	3494,01	69,88	30,12	-	-
Nº30	0,60	0,09	0,08	735,00	0,00	735,17	4229,18	84,58	15,42	-	-
Nº50	0,30	0,09	0,13	322,50	0,00	322,72	4551,89	91,04	8,96	5	19
Nº100	0,15	0,15	0,25	311,25	0,00	311,65	4863,54	97,27	2,73	-	-
Nº200	0,075	0,27	0,25	87,90	0,00	88,42	4951,96	99,04	0,96	2	8
BASE	-	1,74	1,30	45,00	0,00	48,04	5000,00	100,00	0,00	-	-
PESO TOTAL		1500,00	1250,00	2250,00	0,00	5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

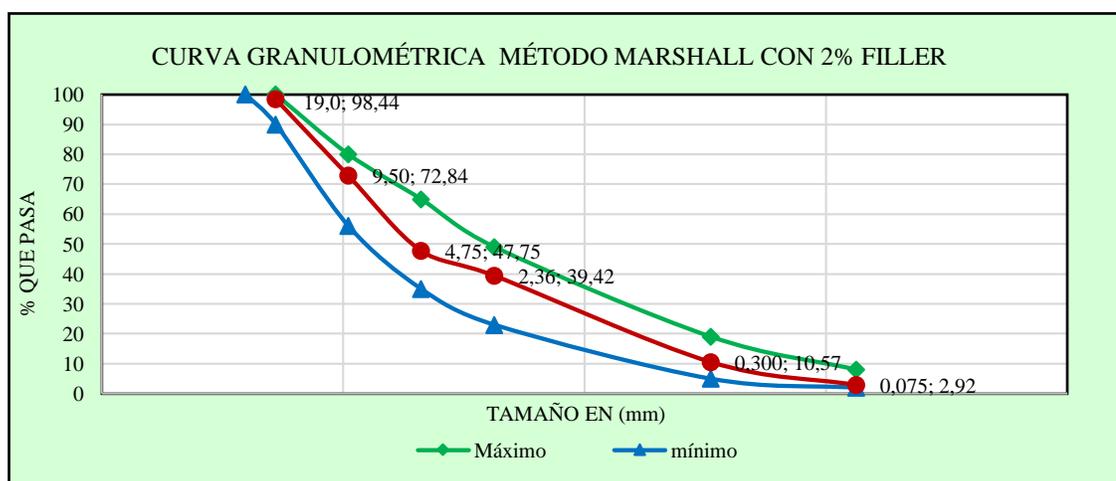
Gráfico 3.4. Curva granulométrica para 0% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31. Distribución granulométrica para 2% filler

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
		(%)	(%)	(%)	(%)					Mínimo	Máximo
		30,00	25,00	43,00	2,00	100,00					
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	77,76	0,00	0,00	0,00	77,76	77,76	1,56	98,44	90	100
1/2"	12,5	826,95	0,00	0,00	0,00	826,95	904,71	18,09	81,91	-	-
3/8"	9,50	445,65	7,60	0,00	0,00	453,25	1357,96	27,16	72,84	56	80
Nº4	4,75	146,37	1081,28	27,09	0,00	1254,74	2612,70	52,25	47,75	35	65
Nº8	2,36	0,87	157,50	258,00	0,00	416,37	3029,07	60,58	39,42	23	49
Nº16	1,18	0,06	1,63	430,00	0,00	431,69	3460,75	69,22	30,79	-	-
Nº30	0,60	0,09	0,08	702,33	0,00	702,50	4163,25	83,26	16,74	-	-
Nº50	0,30	0,09	0,13	308,17	0,00	308,38	4471,63	89,43	10,57	5	19
Nº100	0,15	0,15	0,25	297,42	0,00	297,82	4769,45	95,39	4,61	-	-
Nº200	0,075	0,27	0,25	83,99	0,00	84,51	4853,96	97,08	2,92	2	8
BASE	-	1,74	1,30	43,00	100,00	146,04	5000,00	100,00	0,00	-	-
PESO TOTAL		1500,00	1250,00	2250,00	100,00	5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

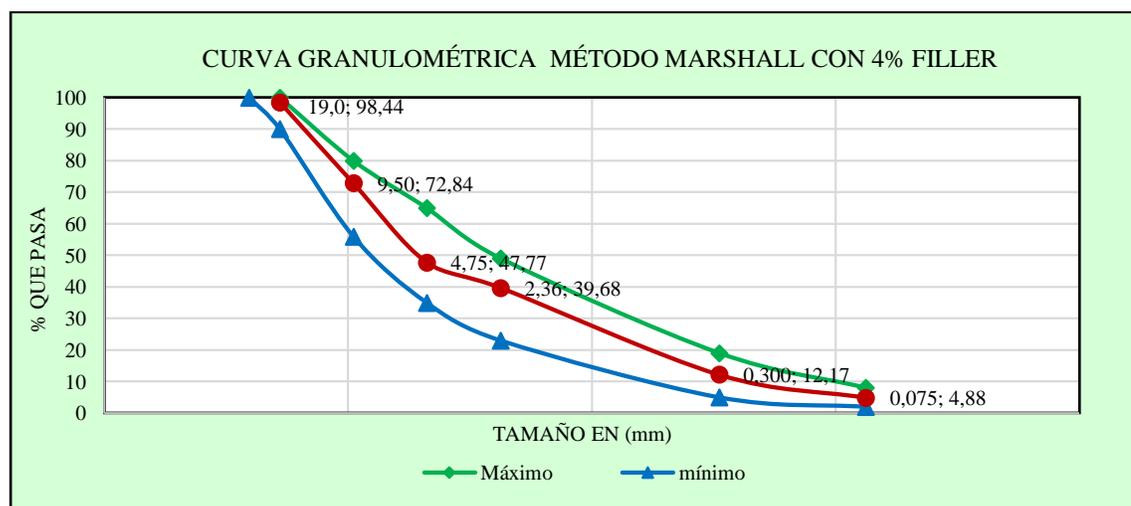
Gráfico 3.5. Curva granulométrica para 2% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32. Distribución granulométrica para 4% filler

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
		(%)	(%)	(%)	(%)					Mínimo	Máximo
		30,00	25,00	41,00	4,00	100,00					
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	77,76	0,00	0,00	0,00	77,76	77,76	1,56	98,44	90	100
1/2"	12,5	826,95	0,00	0,00	0,00	826,95	904,71	18,09	81,91	-	-
3/8"	9,50	445,65	7,60	0,00	0,00	453,25	1357,96	27,16	72,84	56	80
Nº4	4,75	146,37	1081,28	25,83	0,00	1253,48	2611,44	52,23	47,77	35	65
Nº8	2,36	0,87	157,50	246,00	0,00	404,37	3015,81	60,32	39,68	23	49
Nº16	1,18	0,06	1,63	410,00	0,00	411,69	3427,49	68,55	31,45	-	-
Nº30	0,60	0,09	0,08	669,67	0,00	669,83	4097,32	81,95	18,05	-	-
Nº50	0,30	0,09	0,13	293,83	0,00	294,05	4391,37	87,83	12,17	5	19
Nº100	0,15	0,15	0,25	283,58	0,00	283,98	4675,35	93,51	6,49	-	-
Nº200	0,075	0,27	0,25	80,09	0,00	80,61	4755,96	95,12	4,88	2	8
BASE	-	1,74	1,30	41,00	200,00	244,04	5000,00	100,00	0,00	-	-
PESO TOTAL		1500,00	1250,00	2250,00	200,00	5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

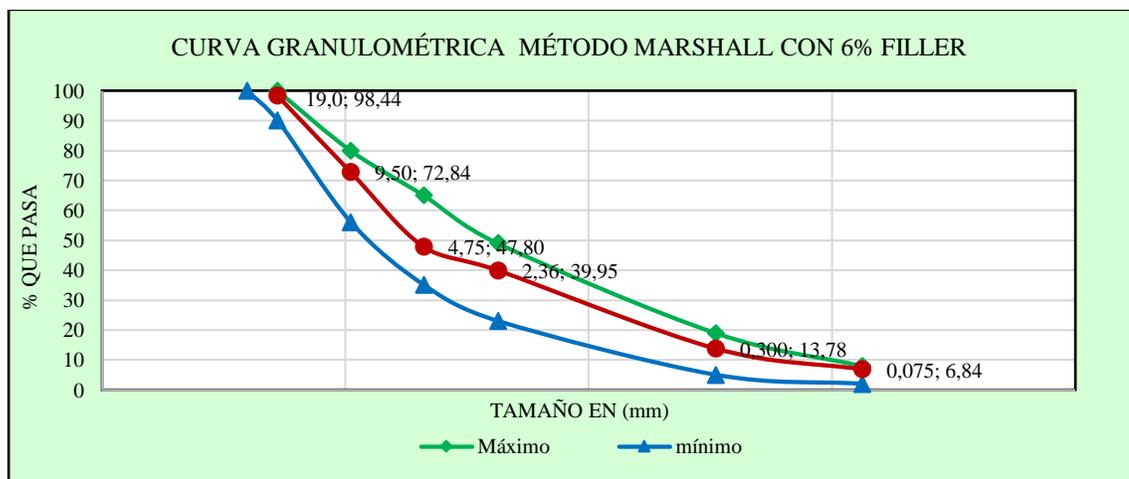
Gráfico 3.6. Curva granulométrica para 4% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.33. Distribución granulométrica para 6% filler

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
		(%)	(%)	(%)	(%)					Mínimo	Máximo
		30,00	25,00	39,00	6,00	100,00					
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	77,76	0,00	0,00	0,00	77,76	77,76	1,56	98,44	90	100
1/2"	12,5	826,95	0,00	0,00	0,00	826,95	904,71	18,09	81,91	-	-
3/8"	9,50	445,65	7,60	0,00	0,00	453,25	1357,96	27,16	72,84	56	80
Nº4	4,75	146,37	1081,28	24,57	0,00	1252,22	2610,18	52,20	47,80	35	65
Nº8	2,36	0,87	157,50	234,00	0,00	392,37	3002,55	60,05	39,95	23	49
Nº16	1,18	0,06	1,63	390,00	0,00	391,69	3394,23	67,88	32,12	-	-
Nº30	0,60	0,09	0,08	637,00	0,00	637,17	4031,40	80,63	19,37	-	-
Nº50	0,30	0,09	0,13	279,50	0,00	279,72	4311,11	86,22	13,78	5	19
Nº100	0,15	0,15	0,25	269,75	0,00	270,15	4581,26	91,63	8,37	-	-
Nº200	0,075	0,27	0,25	76,18	0,00	76,70	4657,96	93,16	6,84	2	8
BASE	-	1,74	1,30	39,00	300,00	342,04	5000,00	100,00	0,00	-	-
PESO TOTAL		1500,00	1250,00	2250,00	300,00	5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

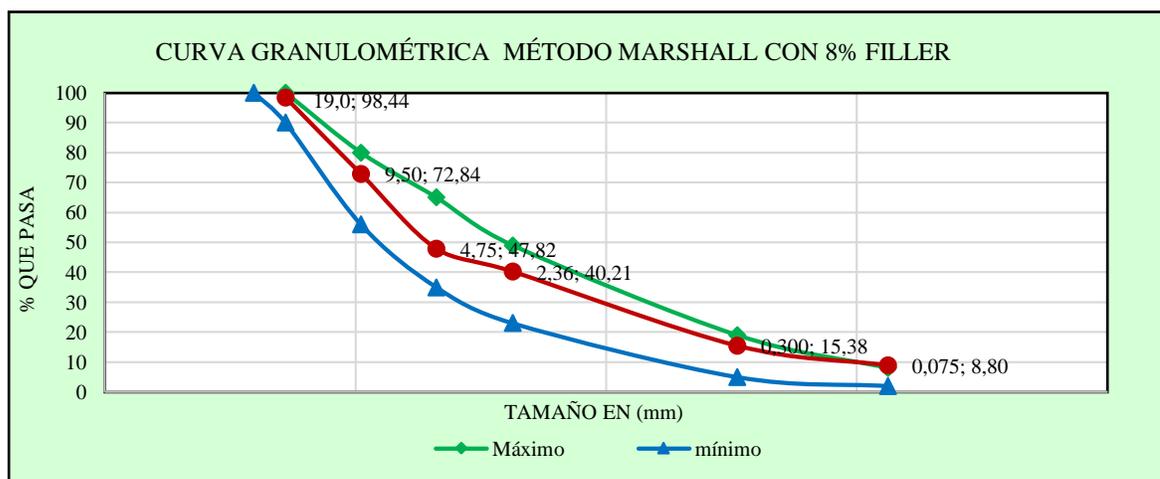
Gráfico 3.7. Curva granulométrica para 6% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.34. Distribución granulométrica para 8% filler

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación				Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
		(%)	(%)	(%)	(%)	100,00				Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
3/4"	19,0	77,76	0,00	0,00	0,00	77,76	1,56	98,44	90	100	
1/2"	12,5	826,95	0,00	0,00	0,00	826,95	18,09	81,91	-	-	
3/8"	9,50	445,65	7,60	0,00	0,00	453,25	27,16	72,84	56	80	
Nº4	4,75	146,37	1081,28	23,31	0,00	1250,96	52,18	47,82	35	65	
Nº8	2,36	0,87	157,50	222,00	0,00	380,37	59,79	40,21	23	49	
Nº16	1,18	0,06	1,63	370,00	0,00	371,69	67,22	32,78	-	-	
Nº30	0,60	0,09	0,08	604,33	0,00	604,50	79,31	20,69	-	-	
Nº50	0,30	0,09	0,13	265,17	0,00	265,38	84,62	15,38	5	19	
Nº100	0,15	0,15	0,25	255,92	0,00	256,32	89,74	10,26	-	-	
Nº200	0,075	0,27	0,25	72,27	0,00	72,79	91,20	8,80	2	8	
BASE	-	1,74	1,30	37,00	400,00	440,04	100,00	0,00	-	-	
PESO TOTAL		1500,00	1250,00	2250,00	400,00	5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9. Curva granulométrica para 8% filler

Fuente: Elaboración propia.

Esta dosificación de agregados será utilizada para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional 85/100.

3.5.1.5. Procedimiento y materiales para la realización de mezclas asfálticas

El siguiente procedimiento será aplicado para calcular en contenido óptimo de cemento asfáltico, preparadas con cemento asfáltico, emulsión asfáltica y agregados no mayores de 2,54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101,6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2,5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152,4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

- Molde de Compactación. Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101,6 mm (4”) y altura aproximada de 76,2 mm (3”); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.
- Martillo de compactación con base plana circular de apisonado de 98,4 mm (3 7/8”) de diámetro, equipado con un pisón de 4,54 kg (10 lb) de peso total, cuya altura de caída es de 457,2 mm (18”).
- Extractor de Muestras. Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95”) y 12,7 mm (1/2”) de espesor.
- Mordaza. Consiste de dos semicilindros, con un radio de curvatura interior de 50,8 mm (2”) de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.
- Medidor de deformación. Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,001 mm.
- Prensa. Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50,8 mm/min.
- Medidor de Estabilidad. La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,001 mm.

- Horno. Horno capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5 °F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.
- Baño. El baño de agua con 150 mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ ($140^{\circ} \pm 1,8^{\circ} \text{F}$), deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50,8 mm (2") sobre el fondo del tanque.
- Recipientes de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.
- Tamices: 25 mm (1"), 19,0 mm (3/4"), 12,5 mm (1/2"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (N° 4), 2,36 mm (N° 8), 300 μm (N° 50) y 75 μm (N° 200).
- Termómetros blindados. De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0,2°C (68°F a 158°F + 0.4°F).
- Balanza. Para pesar agregado y asfalto de 5 kg de capacidad, y sensibilidad de un 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg de capacidad y sensibilidad de 0,1 gr.

3.5.1.6. Dosificación con diferentes porcentajes de filler

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico, para cada porcentaje de filler, se realizará el análisis de 6 porcentajes de asfalto con incrementos de 0,5 %, para la mezcla con los agregados.

Donde el tipo de mezcla elaborada será en caliente con una temperatura de mezclado de 150 °C, se realizará la cantidad de 3 briquetas por cada porcentaje de estudio.

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

Con los diseños granulométricos se procede a realizar las dosificaciones:

Tabla 3.35. Dosificación para 0% filler

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de Gravilla (gr) *	252,12	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	550,08	547,20	544,32	541,44	538,56	535,68
Peso de Filler (gr) *	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.36. Dosificación para 2% filler

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de Gravilla (gr) *	252,12	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	527,16	524,40	521,64	518,88	516,12	513,36
Peso de Filler (gr) *	22,92	22,80	22,68	22,56	22,44	22,32
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.37. Dosificación para 4% filler

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de Gravilla (gr) *	252,12	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	504,24	501,60	498,96	496,32	493,68	491,04
Peso de Filler (gr) *	45,84	45,60	45,36	45,12	44,88	44,64
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.38. Dosificación para 6% filler

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de Gravilla (gr) *	252,12	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	481,32	478,80	476,28	473,76	471,24	468,72
Peso de Filler (gr) *	68,76	68,40	68,04	67,68	67,32	66,96
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.39. Dosificación para 8% filler

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de Gravilla (gr) *	252,12	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	458,40	456,00	453,60	451,20	448,80	446,40
Peso de Filler (gr) *	91,68	91,20	90,72	90,24	89,76	89,28
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Determinada las cantidades necesarias de agregado para cada porcentaje de cemento asfáltico se procede a realizar la mezcla en caliente como se indica a continuación.

3.5.1.7. Procedimiento para la fabricación de briquetas

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C. Así mismo se pesan en bandejas separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 110 a 120 °C. de igual forma se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C.

Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Figura 3.44. Pesaje de los agregados para la elaboración de briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.45. Pesaje de los llenantes minerales



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.46. Preparación de las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia.

Se pesan luego sobre un plato las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Se mezcla el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento.

Figura 3.47. Mezclado de materiales y control de temperatura



Fuente: Elaboración propia.

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de un disco circular de $3\frac{7}{8}$ " de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".

Figura 3.48. Preparación del molde con la mezcla para su compactación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.49. Compactado de la mezcla



Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 135 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura 3.50. Extracción de las briquetas de los moldes



Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Ensayos de control de resultados de las mezclas asfálticas

Una vez obtenidas las briquetas, luego de 24 horas, se procede a realizar la toma de datos volumétricos y la rotura de las mismas en la prensa Marshall.

3.5.2.1. Determinación de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall

El equipo Marshall, está diseñado para aplicar cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipado con un calibrador provisto de un anillo para determinar la carga de ensayos, de un marco de carga para ensayo de estabilidad y un medidor de flujo para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo.

Primero se debe realizar la limpieza de las briquetas evitando que tenga aristas o material desprendido, luego con un vernier se debe proceder a obtener las medidas de las alturas o espesor de la briqueta midiendo en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección por altura.

Figura 3.51. Determinación de las dimensiones de la briqueta



Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la densidad

Para ello se determinará el peso seco de los especímenes (W_s), posteriormente se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 10 minutos a una temperatura de 25°C determinando así el peso sumergido (W_h), se saca del agua, se seca con un paño, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seca (W_{ss}), y se determina su peso.

Figura 3.52. Determinación del peso seco de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.53. Determinación del peso saturado con superficie seca



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.54. Determinación del peso sumergido de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la estabilidad y fluencia

Se realizará el ensayo de estabilidad y flujo, llevando las muestras a un baño maría a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos

Figura 3.55. Baño María a 60 °C, previo a la rotura de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21 °C y 38 °C (70 a 100 °F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Figura 3.56. Briquetas con distintos porcentajes de asfalto para ser ensayadas



Fuente: Elaboración propia.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto (2" / minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de Estabilidad Marshall.

Figura 3.57. Rotura de briquetas en la prensa Marshall



Fuente: Elaboración propia.

Mientras se realiza el ensayo de Estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (Flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Figura 3.58. Briquetas después de la rotura



Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Una vez realizada la dosificación se procede a pesar las muestras 3 para cada porcentaje de tal manera que se pueda promediar sus resultados y sean más confiables. Esta cantidad se realiza primero con el polvo de roca.

Los datos reportados después de realizar el ensayo Marshall son las siguientes:

Resultados:

Tabla 3.40. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 0% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1			6,68	1175,6	1198,5	693	505,5	2,33						
2	4,50	4,71	6,57	1180,7	1194,2	673	521,2	2,27	2,27	2,45	7,19	17,33	58,51	
3			6,67	1206,8	1220,9	678	542,9	2,22						
4			6,38	1177,6	1190,8	681	509,8	2,31						
5	5,00	5,26	6,63	1193,5	1207,2	679	528,2	2,26	2,29	2,43	5,52	16,90	67,31	
6			6,49	1169,0	1182,1	676	506,1	2,31						
7			5,98	1101,1	1115,2	639	476,2	2,31						
8	5,50	5,82	6,30	1177,1	1192,8	676	516,8	2,28	2,30	2,41	4,57	17,10	73,30	
9			6,45	1177,5	1188,5	677	511,5	2,30						
10			6,74	1192,8	1206,1	682	524,1	2,28						
11	6,00	6,38	6,46	1182,6	1199,6	689	510,6	2,32	2,28	2,39	4,35	17,94	75,76	
12			6,89	1194,0	1211,6	683	528,6	2,26						
13			6,57	1214,5	1235,6	695	540,6	2,25						
14	6,50	6,95	6,42	1275,5	1290,8	706	584,8	2,18	2,24	2,37	5,48	19,91	72,48	
15			6,71	1177,5	1208,0	693	515,0	2,29						
Especificaciones			Mínimo									3	13	75
			Máximo									5	-	82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.41. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 0% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1			6,68	1320	3536,3	0,93	3279,89		18	
2	4,50	4,71	6,57	1336	3579,4	0,95	3396,10	3355,8	12	14,67
3			6,67	1361	3646,7	0,93	3391,41		14	
4			6,38	1459	3910,6	0,99	3881,24		14	
5	5,00	5,26	6,63	1428	3827,1	0,94	3588,29	3688,8	11	12,33
6			6,49	1391	3727,5	0,97	3597,00		12	
7			5,98	1269	3398,9	1,11	3769,43		13	
8	5,50	5,82	6,30	1359	3641,3	1,01	3688,63	3753,5	12	12,33
9			6,45	1455	3899,8	0,98	3802,31		12	
10			6,74	1588	4257,9	0,91	3885,37		19	
11	6,00	6,38	6,46	1275	3415,1	0,97	3321,18	3415,2	11	14,00
12			6,89	1291	3458,2	0,88	3039,05		12	
13			6,57	1122	3003,1	0,95	2849,34		15	
14	6,50	6,95	6,42	1035	2768,8	0,98	2720,37	2780,8	17	16,00
15			6,71	1126	3013,9	0,92	2772,76		16	
Especificaciones			Máximo				1800			8
			Mínimo				-			16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 2% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1			6,47	1189,5	1194,0	677	517,0	2,30					
2	4,50	4,71	6,53	1197,7	1200,1	678	522,1	2,29	2,29	2,45	6,56	16,77	60,90
3			6,52	1209,4	1213,6	680	533,6	2,27					
4			6,50	1213,2	1218,5	689	529,5	2,29					
5	5,00	5,26	6,48	1201,8	1208,3	682	526,3	2,28	2,31	2,43	4,92	16,37	69,96
6			6,52	1205,2	1211,9	699	512,9	2,35					
7			6,46	1211,6	1217,8	689	528,8	2,29					
8	5,50	5,82	6,39	1213,9	1218,5	694	524,5	2,31	2,31	2,41	3,91	16,54	76,33
9			6,45	1210,4	1213,5	695	518,5	2,33					
10			6,44	1199,1	1204,7	683	521,7	2,30					
11	6,00	6,38	6,35	1198,5	1203,0	690	513,0	2,34	2,30	2,39	3,49	17,21	79,73
12			6,50	1210,7	1216,3	685	531,3	2,28					
13			6,58	1209,5	1213,9	682	531,9	2,27					
14	6,50	6,95	6,62	1215,3	1223,1	686	537,1	2,26	2,28	2,37	3,90	18,57	79,02
15			6,59	1211,8	1216,0	687	529,0	2,29					
Especificaciones			Mínimo							3	13	75	
			Máximo							5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.43. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 2% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,47	3603,6	0,97	3495,49	1345	3379	12	13,33
2			6,53	3183,5	0,96	3044,40	1189		13	
3			6,52	3754,4	0,96	3597,08	1401		15	
4	5,00	5,26	6,50	3910,6	0,96	3763,93	1459	3765,4	13	13,00
5			6,48	3854	0,97	3728,77	1438		12	
6			6,52	3969,8	0,96	3803,48	1481		14	
7	5,50	5,82	6,46	3832,5	0,97	3727,09	1430	3933,3	14	13,67
8			6,39	4088,3	0,99	4047,42	1525		12	
9			6,45	4128,7	0,98	4025,47	1540		15	
10	6,00	6,38	6,44	3886,3	0,98	3798,90	1450	3819,7	15	15,67
11			6,35	4015,6	1,00	4015,59	1498		14	
12			6,50	3786,7	0,96	3644,70	1413		18	
13	6,50	6,95	6,58	3953,7	0,95	3743,72	1475	3473,4	20	18,33
14			6,62	3552,4	0,94	3337,15	1326		18	
15			6,59	3533,6	0,95	3339,23	1319		17	
Especificaciones			Máximo					1800		8
			Mínimo					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.44. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 4% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1	4,50	4,71	6,53	1198,0	1184,5	667	517,5	2,31	2,27	2,45	7,31	17,44	58,10
2			6,60	1224,0	1217,5	666	551,5	2,22					
3			6,50	1235,5	1208,6	665	543,6	2,27					
4	5,00	5,26	6,48	1214,6	1228,3	695	533,3	2,28	2,31	2,43	4,97	16,41	69,73
5			6,45	1227,7	1248,1	718	530,1	2,32					
6			6,59	1224,2	1224,8	699	525,8	2,33					
7	5,50	5,82	6,53	1235,2	1198,0	678	520,0	2,38	2,32	2,41	3,51	16,19	78,29
8			6,37	1198,3	1196,0	684	512,0	2,34					
9			6,55	1235,2	1203,0	655	548,0	2,25					
10	6,00	6,38	6,26	1177,6	1247,2	723	524,2	2,25	2,31	2,39	3,22	16,97	81,05
11			6,46	1186,6	1196,3	690	506,3	2,34					
12			6,53	1237,0	1162,8	635	527,8	2,34					
13	6,50	6,95	6,72	1227,6	1183,7	642	541,7	2,27	2,27	2,37	3,98	18,65	78,64
14			6,78	1217,8	1188,3	655	533,3	2,28					
15			6,72	1181,2	1176,8	657	519,8	2,27					
Especificaciones			Mínimo							3	13	75	
			Máximo							5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 4% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,53	1102	2949,2	0,96	2820,36	2814,4	13	12,67
2			6,60	1103	2951,9	0,94	2784,27		14	
3			6,50	1102	2949,2	0,96	2838,65		11	
4	5,00	5,26	6,48	1412	3784	0,97	3661,03	3674,6	11	13,00
5			6,45	1360	3644	0,98	3552,89		15	
6			6,59	1504	4031,7	0,95	3810,00		13	
7	5,50	5,82	6,53	1630	4371	0,96	4180,03	4062,2	12	13,67
8			6,37	1512	4053,3	1,00	4033,03		13	
9			6,55	1556	4171,8	0,95	3973,62		16	
10	6,00	6,38	6,26	1495	4007,5	1,02	4103,70	3981,3	15	14,67
11			6,46	1550	4155,6	0,97	4041,34		14	
12			6,53	1482	3972,5	0,96	3798,91		15	
13	6,50	6,95	6,72	1460	3913,3	0,92	3590,42	3305,2	19	17,33
14			6,78	1254	3358,5	0,90	3031,09		17	
15			6,72	1340	3590,1	0,92	3293,94		16	
Especificaciones			Máximo				1800		8	
			Mínimo				-			16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.46. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 6% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta		% de Vacíos			
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1	4,50	4,71	6,54	1195,7	1199,3	678	521,3	2,29	2,29	2,45	6,66	16,86	60,51
2			6,51	1208,5	1213,8	683	530,8	2,28					
3			6,57	1211,7	1217,2	687	530,2	2,29					
4	5,00	5,26	6,55	1210,5	1216,9	696	520,9	2,32	2,32	2,43	4,43	15,94	72,21
5			6,48	1209,3	1215,3	695	520,3	2,32					
6			6,39	1214,7	1219,0	694	525,0	2,31					
7	5,50	5,82	6,44	1217,1	1223,4	699	524,4	2,32	2,33	2,41	3,26	15,97	79,59
8			6,53	1198,2	1205,5	694	511,5	2,34					
9			6,50	1197,5	1201,9	687	514,9	2,33					
10	6,00	6,38	6,58	1207,0	1212,8	695	517,8	2,33	2,32	2,39	2,86	16,67	82,82
11			6,61	1204,7	1210,1	690	520,1	2,32					
12			6,49	1212,8	1218,4	694	524,4	2,31					
13	6,50	6,95	6,60	1219,1	1224,5	686	538,5	2,26	2,29	2,37	3,14	17,94	82,49
14			6,55	1210,3	1216,9	690	526,9	2,30					
15			6,51	1208,6	1213,5	693	520,5	2,32					
Especificaciones			Mínimo							3	13	75	
			Máximo							5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.47. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 6% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,54	1284	3439,3	0,95	3282,50	3348,6	14	13,00
2			6,51	1251	3350,5	0,96	3216,45		13	
3			6,57	1395	3738,2	0,95	3546,84		12	
4	5,00	5,26	6,55	1540	4128,7	0,95	3932,58	3860,2	14	13,33
5			6,48	1483	3975,2	0,97	3846,01		13	
6			6,39	1433	3840,6	0,99	3802,16		13	
7	5,50	5,82	6,44	1430	3832,5	0,98	3746,25	4052	14	14,67
8			6,53	1674	4489,5	0,96	4293,33		15	
9			6,50	1595	4276,8	0,96	4116,41		15	
10	6,00	6,38	6,58	1615	4330,7	0,95	4100,69	3950,4	16	16,33
11			6,61	1589	4260,6	0,94	4010,54		17	
12			6,49	1446	3875,6	0,97	3739,92		16	
13	6,50	6,95	6,60	1675	4492,2	0,94	4237,06	3757,2	18	19,67
14			6,55	1326	3552,4	0,95	3383,69		22	
15			6,51	1419	3802,9	0,96	3650,75		19	
Especificaciones			Máximo				1800		8	
			Mínimo				-		16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.48. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 8% filler

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1	4,50	4,71	6,72	1098,7	1105,3	622	483,3	2,27	2,28	2,45	6,91	17,09	59,55
2			6,74	1098,8	1109,8	635	474,8	2,31					
3			6,72	1101,2	1116,3	627	489,3	2,25					
4	5,00	5,26	6,80	1105,3	1114,9	634	480,9	2,30	2,32	2,43	4,49	16,00	71,91
5			6,71	1101,3	1102,8	632	470,8	2,34					
6			6,75	1098,3	1108,3	635	473,3	2,32					
7	5,50	5,82	6,74	1101,5	1103,4	637	466,4	2,36	2,34	2,41	2,82	15,59	81,93
8			6,68	1118,1	1118,1	660	458,1	2,44					
9			6,83	1268,1	1270,3	699	571,3	2,22					
10	6,00	6,38	6,80	1155,7	1160,2	668	492,2	2,35	2,33	2,39	2,41	16,29	85,19
11			6,85	1240,3	1210,6	675	535,6	2,32					
12			6,86	1228,4	1196,3	669	527,3	2,33					
13	6,50	6,95	6,81	1228,1	1141,2	613	528,2	2,33	2,30	2,37	2,79	17,64	84,20
14			6,88	1234,8	1223,3	682	541,3	2,28					
15			6,89	1253,6	1216,4	672	544,4	2,30					
Especificaciones			Mínimo							3	13	75	
			Máximo							5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.49. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 8% filler

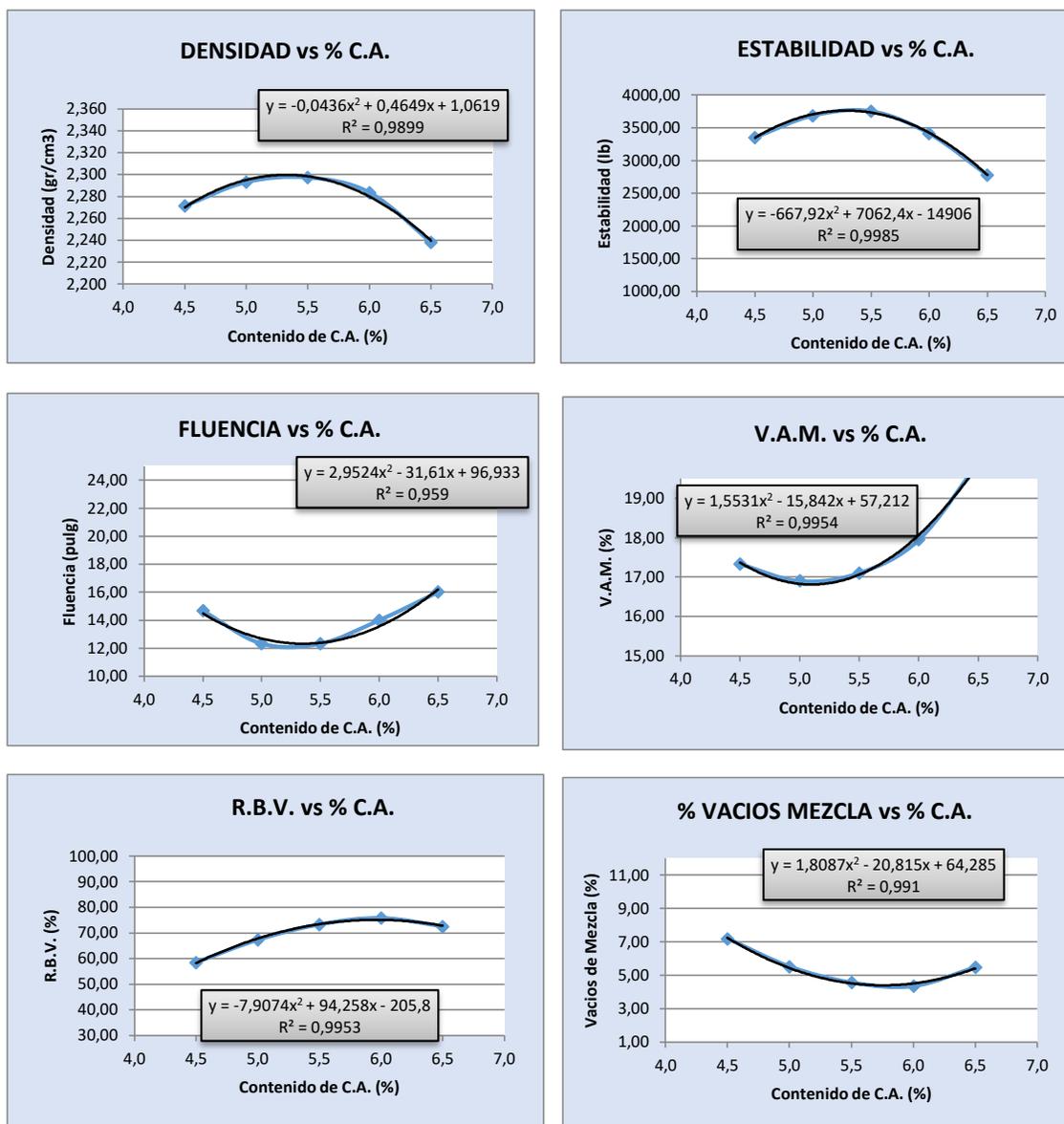
N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,72	1050	2809,2	0,92	2577,46	2567,8	17	15,67
2			6,74	1054	2820	0,91	2573,24		14	
3			6,72	1040	2782,3	0,92	2552,75		16	
4	5,00	5,26	6,80	1225	3280,5	0,90	2944,21	3315	13	13,67
5			6,71	1410	3778,6	0,92	3476,34		16	
6			6,75	1445	3872,9	0,91	3524,32		12	
7	5,50	5,82	6,74	1546	4144,8	0,91	3782,17	3972,9	12	13,00
8			6,68	1563	4190,6	0,93	3886,80		13	
9			6,83	1780	4775	0,89	4249,72		14	
10	6,00	6,38	6,80	1870	5017,3	0,90	4503,04	3990,2	14	14,33
11			6,85	1935	5192,3	0,89	4601,98		15	
12			6,86	1210	3240,1	0,88	2865,52		14	
13	6,50	6,95	6,81	1112	2976,2	0,90	2663,67	3667,6	14	18,33
14			6,88	1616	4333,3	0,88	3816,38		19	
15			6,89	1918	5146,6	0,88	4522,80		22	
Especificaciones			Máximo					1800		8
			Mínimo					-		16

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.2. Determinación del % óptimo de C.A. para cada contenido de filler

El contenido óptimo de cemento asfáltico en una mezcla depende en gran medida de las características del agregado como la graduación y absorción.

Es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con espesor suficiente para resistir los elementos de intemperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad. En las mezclas asfálticas es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo; ya que en una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tan que sea suficiente de resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa ya que además de resultar antieconómica puede provocar una pérdida de estabilidad en la carpeta, además este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie. Los resultados de los contenidos óptimos de asfalto que se determinaron con el polvo mineral, son los siguientes:

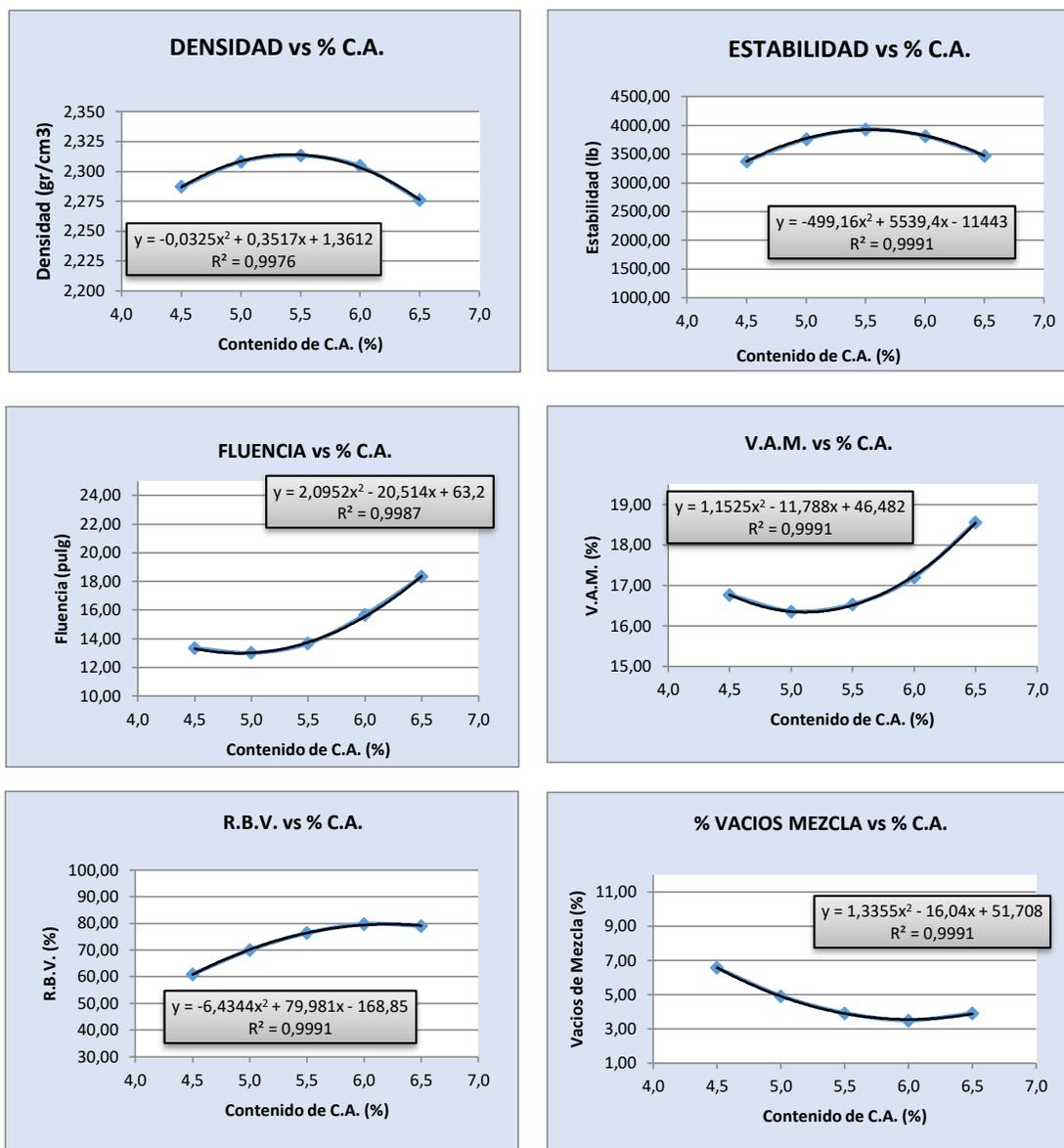
Gráfico 3.9. Curvas de diseño Marshall para 0% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.50. Contenido óptimo de asfalto para 0% filler

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	3762,96	5,29
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,30	5,33
Vacíos de la mezcla (%)	4,37	5,58
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,40

Fuente: Elaboración propia.

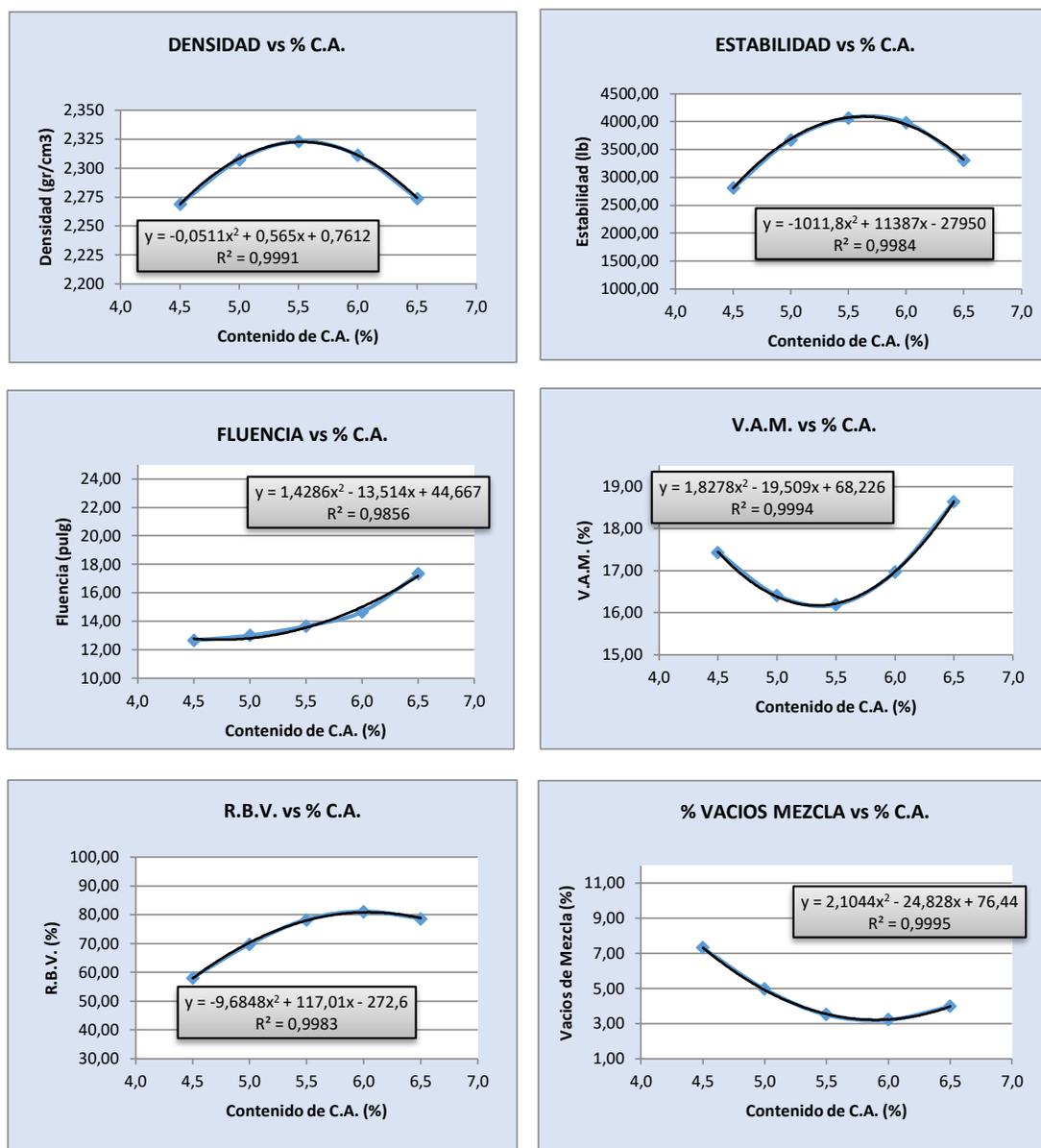
Gráfico 3.10. Curvas de diseño Marshall para 2% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.51. Contenido óptimo de asfalto para 2% filler

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	3925,29	5,55
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,31	5,41
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,40
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,45

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.11. Curvas de diseño Marshall para 4% filler

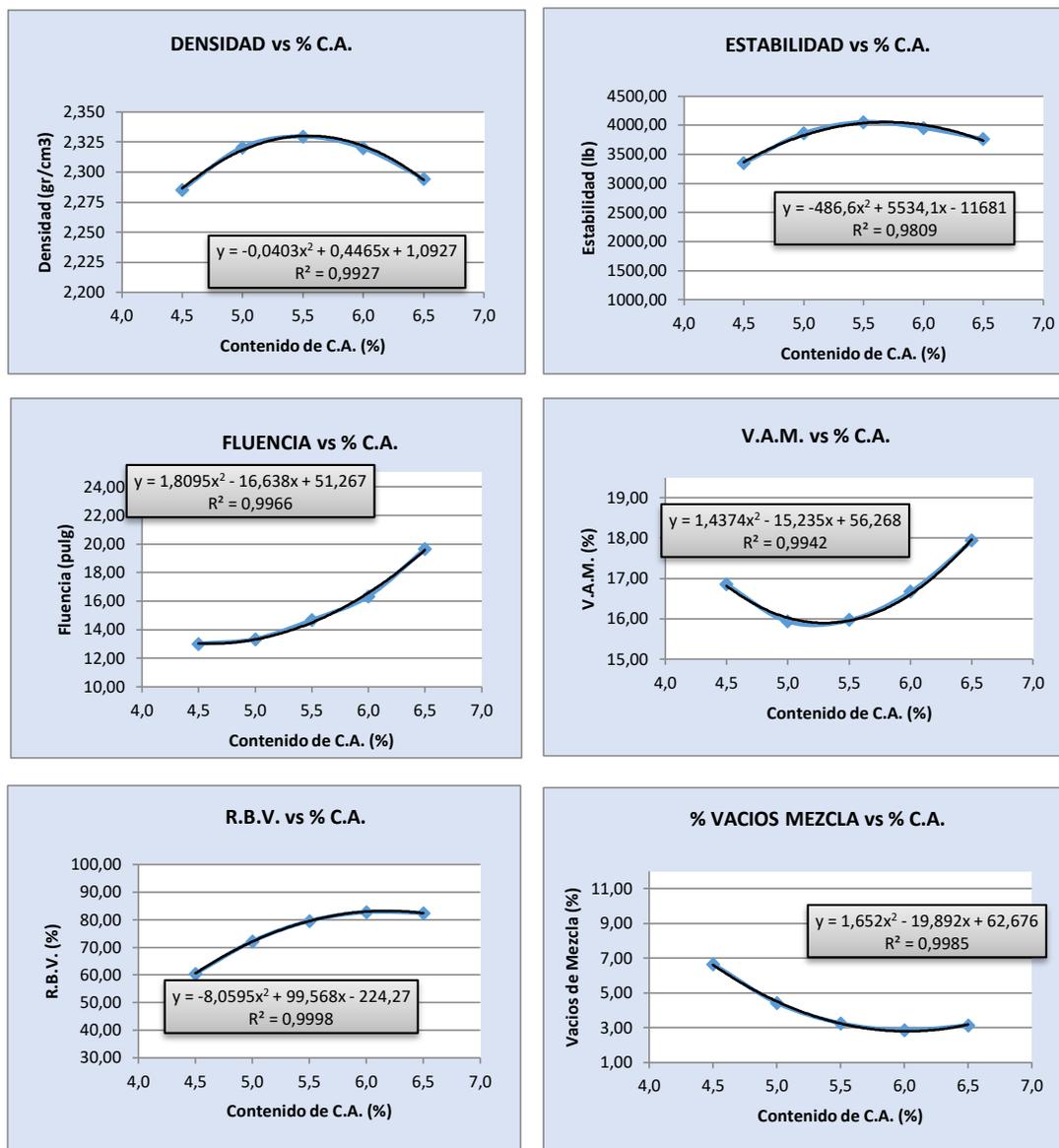
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.52. Contenido óptimo de asfalto para 4% filler

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	4087,90	5,63
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,32	5,53
Vacios de la mezcla (%)	4,00	5,26
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,47

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.12. Curvas de diseño Marshall para 6% filler



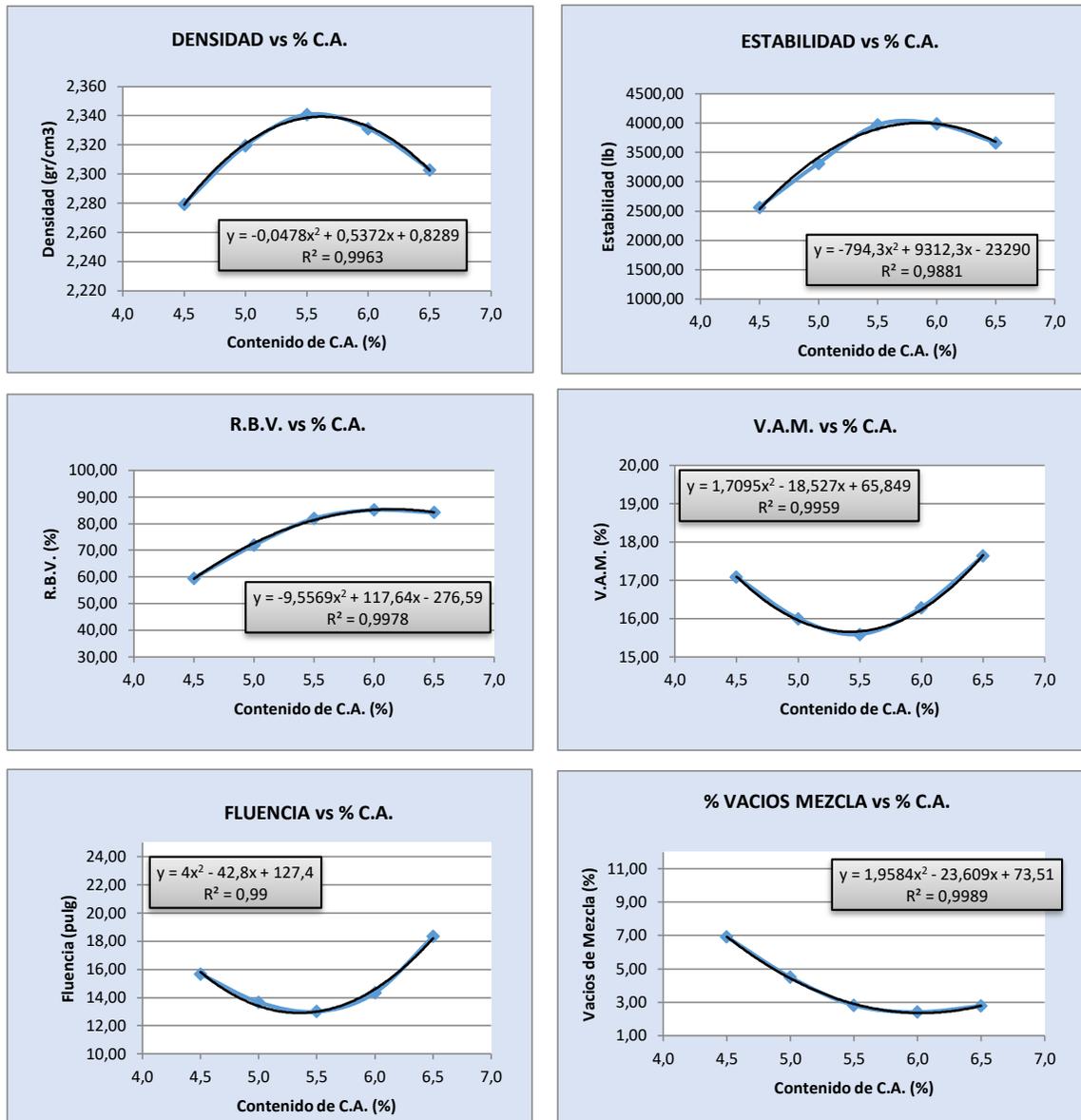
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53. Contenido óptimo de asfalto para 6% filler

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	4053,82	5,69
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,33	5,54
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,34
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,52

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.13. Curvas de diseño Marshall para 8% filler



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.54. Contenido óptimo de asfalto para 8% filler

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall (Lb)	4004,14	5,86
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	5,62
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,31
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,60

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Ensayos de control del llenante mineral para comparación

Para verificar si los resultados obtenidos de los óptimos de cemento asfáltico para cada porcentaje de filler, cumplen con las especificaciones de la norma, se procede a dosificar con estos óptimos y ver el comportamiento final de la mezcla asfáltica con los diferentes tipos de filler: cal hidratada, cemento Portland y polvo de roca.

3.6.1. Dosificación con óptimos de cemento asfáltico para cada % de filler

Con los contenidos óptimos de asfalto para cada porcentaje de agregado se procede a realizar la dosificación final para realizar briquetas con los diferentes porcentajes de filler. Esta dosificación se aplica para los tres tipos de filler: polvo de roca, cal hidratada y cemento Portland, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.55. Dosificaciones para cada % de filler con su contenido óptimo de C.A.

Peso total de briketa (gr)	1200	1200	1200	1200	1200
Porcentaje de la mezcla (%)	100%	100%	100%	100%	100%
Porcentaje de grava (%)	30%	30%	30%	30%	30%
Porcentaje de gravilla (%)	25%	25%	25%	25%	25%
Porcentaje de arena (%)	45%	43%	41%	39%	37%
Porcentaje de filler (%)	0%	2%	4%	6%	8%
Contenido óptimo de cemento asfáltico (%)	5,40%	5,45%	5,47%	5,52%	5,60%
Porcentaje de agregado (%)	94,60%	94,55%	94,53%	94,48%	94,40%
Peso del cemento asfáltico (gr) *	64,80	65,40	65,64	66,24	67,20
Peso de grava (gr) *	340,56	340,38	340,31	340,13	339,84
Peso de gravilla (gr) *	283,80	283,65	283,59	283,44	283,20
Peso de arena (gr) *	510,84	487,88	465,09	442,17	419,14
Peso de filler (gr) *	0,00	22,69	45,37	68,03	90,62
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Resultados Marshall para diferentes tipos de filler

Una vez obtenida la dosificación final para cada 0% de filler con su respectivo contenido óptimo de asfalto, se proceden a realizar briquetas con diferentes filler, entre ellos el polvo de roca, cal hidratada y cemento Portland, y por consiguiente se determinan las propiedades Marshall.

Tabla 3.56. Densidad y vacíos para el 0% de filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta cm ³	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
			base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregados)	R.B.V. (relación)
			%	%		grs.	grs.	grs.		grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1	Ninguno	0%	5,40	5,71	6,52	1198,9	1208,3	681	527,3	2,27	2,294	2,41	4,85	17,14	71,69
2					6,42	1161,1	1172,0	670	502,0	2,31					
3					6,51	1183,4	1194,2	682	512,2	2,31					
4					6,58	1123,0	1133,5	666	467,5	2,40					
5					6,58	1202,5	1213,1	679	534,1	2,25					
6					6,53	1241,3	1250,1	694	556,1	2,23					
7					6,64	1172,6	1181,9	665	516,9	2,27					
8					6,68	1184,2	1197,7	683	514,7	2,30					
9					6,80	1180,1	1191,0	677	514,0	2,30					
Especificaciones					Mínimo							3	13	75	
					Máximo							5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.57. Estabilidad y fluencia para el 0% de filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia				
			base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio			
			%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg			
1	Ninguno	0%	5,40	5,71	6,52	1380	3697,8	0,96	3542,90	3504,44	1800	-	16	15,00	
2					6,42	1260	3374,7	0,98	3315,65						13
3					6,51	1420	3805,6	0,96	3653,33						15
4					6,58	1410	3778,6	0,95	3577,98						13
5					6,58	1450	3886,3	0,95	3679,97						15
6					6,53	1310	3509,3	0,96	3355,99						17
7					6,64	1215	3253,5	0,94	3044,33						14
8					6,68	1561	4185,2	0,93	3881,81						14
9					6,80	1450	3886,3	0,90	3487,99						18
Especificaciones					Mínimo					1800		8			
					Máximo					-		16			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.58. Densidad y Vacíos para 2% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
			base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado)	R.B.V. (relación)
			%	%		grs.	grs.	grs.	cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1	Polvo de roca	2%	5,45	5,76	6,27	1184,2	1193,7	683	510,7	2,32	2,305	2,41	4,34	16,80	74,18
2					6,25	1197,8	1207,3	679	528,3	2,27					
3					6,36	1185,3	1188,9	680	508,9	2,33					
4	Cal	2%	5,45	5,76	6,41	1169,2	1186,3	682	504,3	2,32	2,308	2,41	4,23	16,71	74,68
5					6,38	1179,9	1199,4	691	508,4	2,32					
6					6,26	1188,4	1213,4	693	520,4	2,28					
7	Cemento	2%	5,45	5,76	6,39	1192,1	1198,2	686	512,2	2,33	2,302	2,41	4,48	16,92	73,53
8					6,45	1195,3	1202,0	675	527,0	2,27					
9					6,37	1199,7	1203,5	684	519,5	2,31					
Especificaciones						Mínimo						3	13	75	
						Máximo						5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.59. Estabilidad y fluencia para 2% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
			base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	Polvo de roca	2%	5,45	5,76	6,27	1555	4169,1	1,02	4256,63	4013,4	14	13,67
2					6,25	1469	3937,5	1,03	4043,81		16	
3					6,36	1399	3749	1,00	3739,63		11	
4	Cal	2%	5,45	5,76	6,41	1523	4082,9	0,99	4021,67	4481,1	15	13,67
5					6,38	1782	4780,3	0,99	4744,50		12	
6					6,26	1703	4567,6	1,02	4677,24		14	
7	Cemento	2%	5,45	5,76	6,39	1481	3969,8	0,99	3930,12	3814,2	16	14,00
8					6,45	1379	3695,1	0,98	3602,77		11	
9					6,37	1466	3929,4	1,00	3909,78		15	
Especificaciones						Mínimo				1800		8
						Máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.560. Densidad y Vacíos para 4% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
			base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Secca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación)
			%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1	Polvo de roca	4%	5,47	5,79	6,28	1180,6	1188,7	685	503,7	2,34	2,309	2,41	4,17	16,70	75,02
2					6,23	1201,6	1219,8	689	530,8	2,26					
3					6,36	1175,1	1194,9	688	506,9	2,32					
4	Cal	4%	5,47	5,79	6,40	1148,7	1178,3	686	492,3	2,33	2,310	2,41	4,11	16,65	75,31
5					6,34	1147,8	1156,4	645	511,4	2,24					
6					6,22	1187,8	1195,9	691	504,9	2,35					
7	Cemento	4%	5,47	5,79	6,43	1173,9	1193,1	689	504,1	2,33	2,307	2,41	4,23	16,75	74,75
8					6,42	1185,7	1202,0	670	532,0	2,23					
9					6,41	1185,6	1193,5	692	501,5	2,36					
Especificaciones						Mínimo						3	13	75	
						Máximo						5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.61. Estabilidad y fluencia para 4% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
			base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	Polvo de roca	4%	5,47	5,79	6,28	2220	5959,8	1,02	6073,03	5707,24	13	13,00
2					6,23	1940	5205,8	1,03	5372,40		12	
3					6,36	2120	5690,5	1,00	5676,29		14	
4	Cal	4%	5,47	5,79	6,40	2160	5798,2	0,99	5725,75	6101,03	13	12,33
5					6,34	2390	6417,6	1,00	6436,82		12	
6					6,22	2210	5932,9	1,04	6140,52		12	
7	Cemento	4%	5,47	5,79	6,43	1980	5313,5	0,98	5207,25	4540,67	11	12,67
8					6,42	1570	4209,5	0,98	4135,81		13	
9					6,41	1620	4344,1	0,99	4278,95		14	
Especificaciones						Mínimo				1800	8	
						Máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.62. Densidad y Vacíos para 6% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
			base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado)	R.B.V. (relación)
			%	%		grs.	grs.	grs.		cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1	Polvo de roca	6%	5,52	5,84	6,77	1188,4	1193,9	681	512,9	2,32	2,312	2,41	3,94	16,61	76,25
2					6,69	1189,5	1196,3	679	517,3	2,30					
3					6,65	1188,1	1191,9	680	511,9	2,32					
4	Cal	6%	5,52	5,84	6,68	1199,8	1202,5	682	520,5	2,31	2,316	2,41	3,78	16,47	77,02
5					6,62	1200,4	1204,4	685	519,4	2,31					
6					6,66	1197,9	1203,5	690	513,5	2,33					
7	Cemento	6%	5,52	5,84	6,53	1196,7	1202,3	682	520,3	2,30	2,313	2,41	3,91	16,58	76,39
8					6,52	1198,7	1204,5	688	516,5	2,32					
9					6,49	1198,1	1206,7	690	516,7	2,32					
Especificaciones						Mínimo						3	13	75	
						Máximo						5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.63. Estabilidad y fluencia para 6% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
			base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	Polvo de roca	6%	5,52	5,84	6,77	2164	5809	0,91	5257,14	5259,12	15	14,00
2					6,69	2098	5631,3	0,93	5208,93			
3					6,65	2119	5687,8	0,93	5311,29			
4	Cal	6%	5,52	5,84	6,68	2359	6334,1	0,93	5874,87	5825,59	14	13,33
5					6,62	2228	5981,3	0,94	5618,87			
6					6,66	2391	6420,3	0,93	5983,04			
7	Cemento	6%	5,52	5,84	6,53	1624	4354,9	0,96	4164,58	3987,50	12	13,67
8					6,52	1489	3991,4	0,96	3824,12			
9					6,49	1536	4117,9	0,97	3973,79			
Especificaciones						Mínimo				1800	8	
						Máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.64. Densidad y Vacíos para 8% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
			base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregados)	R.B.V. (relación)
			%	%		grs.	grs.	grs.	cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
1	Polvo de roca	8%	5,60	5,93	6,74	1189,5	1198,3	681	517,3	2,30	2,315	2,40	3,75	16,60	77,44
2					6,67	1187,8	1189,6	677	512,6	2,32					
3					6,68	1187,9	1194,5	684	510,5	2,33					
4	Cal	8%	5,60	5,93	6,66	1196,6	1202,5	687	515,5	2,32	2,321	2,40	3,46	16,36	78,85
5					6,65	1199,9	1206,8	685	521,8	2,30					
6					6,65	1198,7	1203,5	692	511,5	2,34					
7	Cemento	8%	5,60	5,93	6,49	1196,2	1205,5	691	514,5	2,32	2,317	2,40	3,65	16,53	77,88
8					6,54	1199,2	1207,7	688	519,7	2,31					
9					6,47	1197,3	1210,6	694	516,6	2,32					
Especificaciones						Mínimo						3	13	75	
						Máximo						5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.65. Estabilidad y fluencia para 8% de diferentes filler y su óptimo de C.A.

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
			base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	Polvo de roca	8%	5,60	5,93	6,74	1960	5259,7	0,91	4799,45	4860,58	12	14,67
2					6,67	1955	5246,2	0,93	4878,97		15	
3					6,68	1970	5286,6	0,93	4903,32		17	
4	Cal	8%	5,60	5,93	6,66	2220	5959,8	0,93	5553,93	5473,47	14	14,00
5					6,65	2120	5690,5	0,93	5313,80		13	
6					6,65	2215	5946,3	0,93	5552,68		15	
7	Cemento	8%	5,60	5,93	6,49	1210	3240,1	0,97	3126,66	3172,30	14	14,33
8					6,54	1250	3347,8	0,95	3195,12		17	
9					6,47	1230	3293,9	0,97	3195,11		12	
Especificaciones						Mínimo				1800		8
						Máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente a través de los ensayos volumétricos y físico-mecánicos Marshall, en este capítulo se realiza un estudio del comportamiento de los diferentes fillers según sus porcentajes de participación.

Partiendo con el 0% de llenante mineral, cuyo resultado es el patrón de comportamiento con el resto de los fillers, se procedieron a realizar briquetas con otros porcentajes que aumenta cada 2%, hasta llegar al 8%, cuyo valor es máximo según norma.

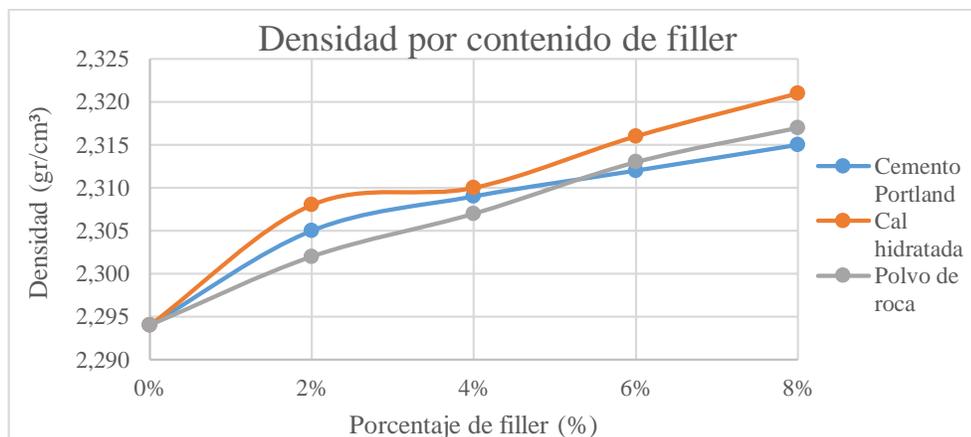
Los resultados de las propiedades Marshall para cada porcentaje y tipo de filler, se muestran en las siguientes tablas y gráficos:

Tabla 4.1. Densidad de diferentes tipos y porcentajes de filler

Densidad (gr/cm ³)					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	2,294	2,305	2,309	2,312	2,315
Cal hidratada		2,308	2,310	2,316	2,321
Polvo de roca		2,302	2,307	2,313	2,317

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1. Densidad de diferentes tipos y porcentajes de filler



Fuente: Elaboración propia.

Se observa en el gráfico 4.1, que la densidad varía de menor a mayor, es decir que a partir del 0% de filler, aumenta a medida que aumenta el porcentaje de filler. Así mismo, los resultados de densidad de la cal son mucho más satisfactorios porque proporciona mayor densidad, en especial al 8 % de filler. Y la menor densidad la proporciona el 0% de filler para los tres tipos de llenante mineral.

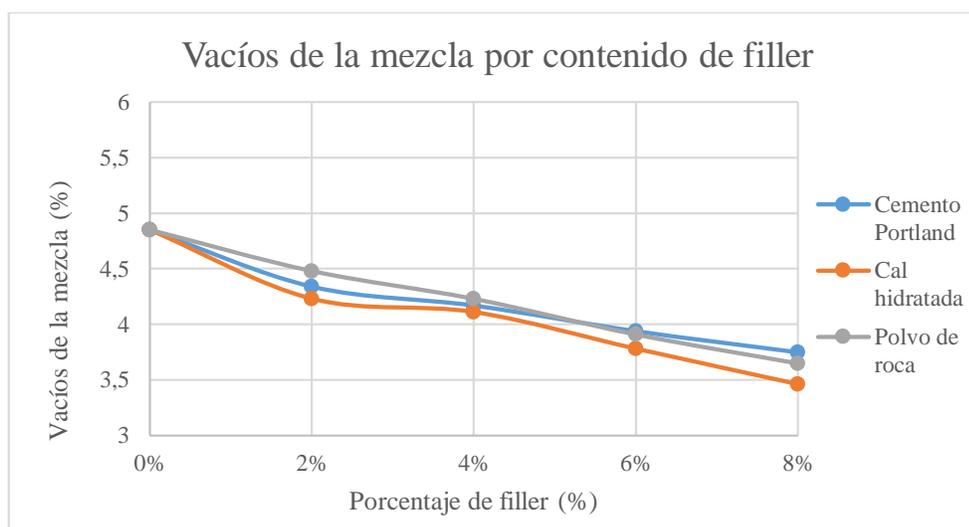
Sin embargo, se observan mejores resultados con el filler cal hidratada, porque en todos los porcentajes de filler supera al cemento y polvo de roca.

Tabla 4.2. Vacíos de la mezcla de diferentes tipos y porcentajes de filler

Vacíos de la mezcla (%)					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	4,85	4,34	4,17	3,94	3,75
Cal hidratada		4,23	4,11	3,78	3,46
Polvo de roca		4,48	4,23	3,91	3,65

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2. Vacíos de la mezcla de diferentes tipos y porcentajes de filler



Fuente: Elaboración propia.

Se observa en el gráfico 4.2, que el porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el porcentaje de filler, esto tiene lógica porque a mayor filler, menores serán los vacíos.

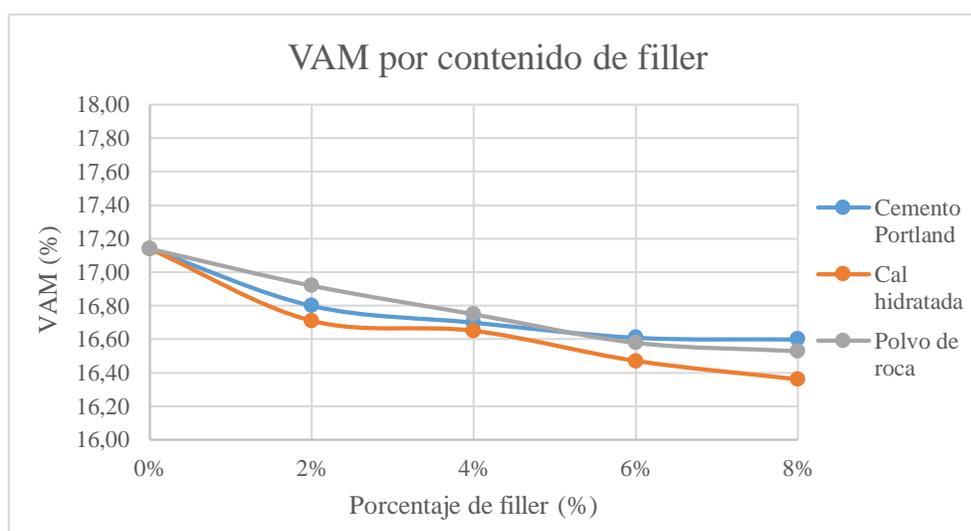
A su vez la cal tiene menores vacíos respecto al polvo de roca y cemento Portland. Así mismo, los resultados de porcentaje de vacíos del cemento Portland visualmente son más elevados, sin embargo, la cal proporciona menor cantidad de vacíos en 2%, 4%, 6% y 8% de llenante mineral.

Tabla 4.3. VAM de diferentes tipos y porcentajes de filler

Vacíos del Agregado Mineral (VAM) (%)					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	17,14	16,80	16,70	16,61	16,60
Cal hidratada		16,71	16,65	16,47	16,36
Polvo de roca		16,92	16,75	16,58	16,53

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3. VAM de diferentes tipos y porcentajes de filler



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.3., se observa que el VAM tiene el mismo comportamiento que los vacíos de la mezcla, esto se debe a que estos valores, dependen de la densidad, es decir de los factores físico-volumétricos, por lo tanto, también reduce el valor de VAM a medida que aumenta el contenido de filler, porque el filler cubre esos vacíos.

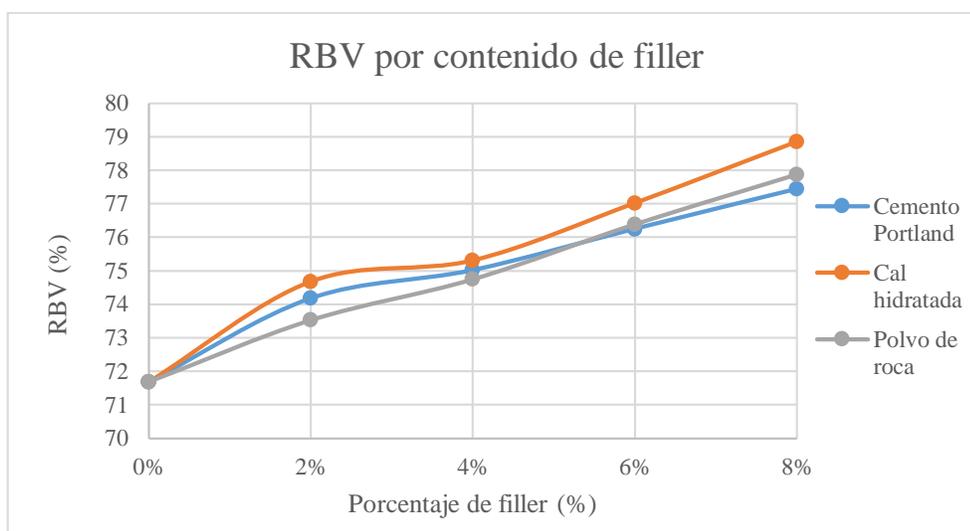
Así mismo se observa que, la cal produce menos VAM que los demás tipos de filler, los resultados de VAM de la cal hidratada son menores en 2%, 4%, 6% y 8% de filler.

Tabla 4.4. RBV de diferentes tipos y porcentajes de filler

Relación Betún Vacíos (RBV) (%)					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	71,69	74,18	75,02	76,25	77,44
Cal hidratada		74,68	75,31	77,02	78,85
Polvo de roca		73,53	74,75	76,39	77,88

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.4. RBV de diferentes tipos y porcentajes de filler



Fuente: Elaboración propia.

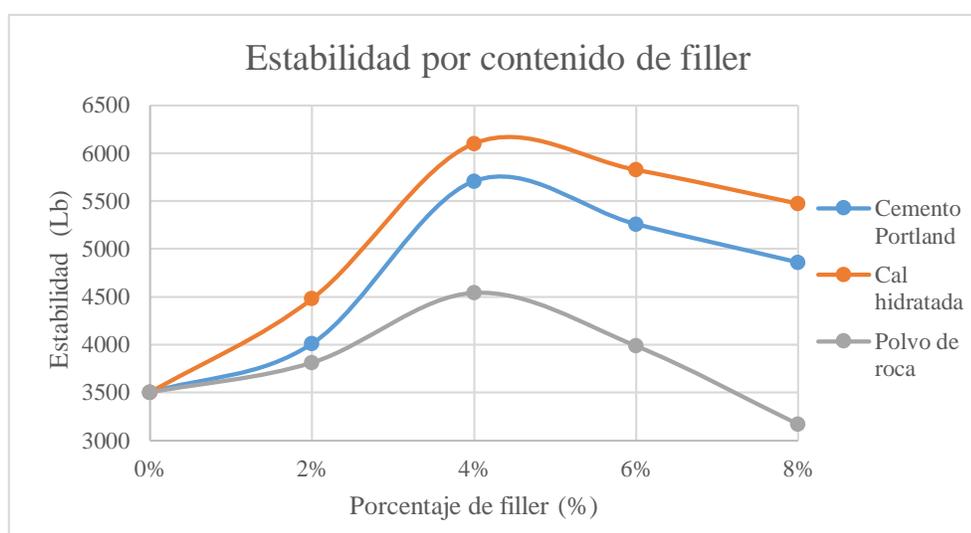
En el gráfico 4.4., se observa que la relación de betún vacíos aumenta según aumentan los porcentajes de filler en la mezcla, esto se debe al contenido de filler, porque a mayor filler mayor es el requerimiento de asfalto o betún en la mezcla.

Así mismo, los resultados de RBV de la cal hidratada son mayores en 2%, 4%, 6% y 8% de filler. Por lo tanto, la cal hidratada, requiere de mayor asfalto en la mezcla.

Tabla 4.5. Estabilidad de diferentes tipos y porcentajes de filler

Estabilidad (Lb)					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	3504,44	4013,36	5707,24	5259,12	4860,58
Cal hidratada		4481,14	6101,03	5825,59	5473,47
Polvo de roca		3814,22	4540,67	3987,50	3172,30

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.5. Estabilidad de diferentes tipos y porcentajes de filler

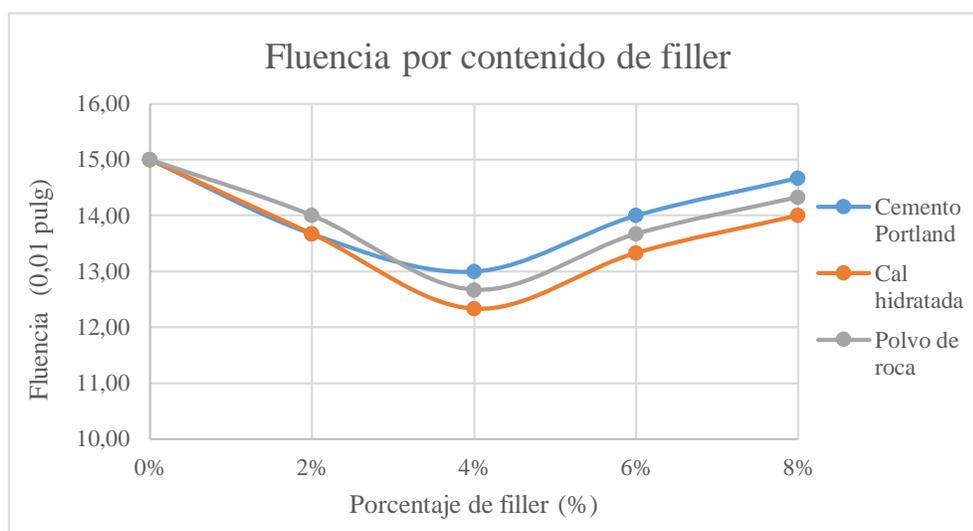
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.5., se observa el comportamiento de la estabilidad para cada porcentaje y tipo de filler. Desde el punto de vista del porcentaje de filler, al 4 % se generan las estabilidades más altas y al 0% tiene una tendencia de estabilidad más baja, es así que la estabilidad ascendente hasta el 4% de filler y después desciende al 6% y desciende más al 8%. Por otra parte, observando las curvas para cada tipo de filler, se determina que las mezclas con la cal hidratada superan a las estabilidades del cemento Portland y polvo de roca, porque proporcionan mejores estabilidades superiores a 6000 lb, después le sigue las mezclas con cemento Portland, y con resultados más bajos están las mezclas con polvo de roca. Cabe resaltar que los tres tipos de filler, superan la norma de requerimiento mínimo de estabilidad para una mezcla densa es de 1800 lb.

Tabla 4.6. Fluencia de diferentes tipos y porcentajes de filler

Fluencia (0,01")					
Tipo de filler	Porcentaje de filler				
	0%	2%	4%	6%	8%
Cemento Portland	15,00	13,67	13,00	14,00	14,67
Cal hidratada		13,67	12,33	13,33	14,00
Polvo de roca		14,00	12,67	13,67	14,33

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.6 Fluencia de diferentes tipos y porcentajes de filler

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la fluencia, se observa en el gráfico 4.6, que la fluencia descendente hasta el 4% de filler y después asciende al 6% y al 8%. Al 4% de filler los resultados se aproximan a 12 de 0,01 pulgadas, lo cual representa el promedio entre 8 y 16 que establece la norma, Sin embargo, los resultados del cemento Portland supera a las fluencias del polvo de roca y cal. A su vez la cal nuevamente presenta mejores resultados por encontrarse en el rango medio de la norma. En todos los casos los resultados de fluencia se encuentran dentro de las especificaciones de la norma de 8 a 16 (0,01 pulg.).

4.2. Determinación del contenido óptimo de filler

Finalmente, para determinar el contenido óptimo de filler se procede a aplicar 4 criterios más influyentes de las propiedades Marshall:

- % de filler con la densidad máxima
- % de filler con la estabilidad máxima
- % de filler con la fluencia más próxima a 12 (promedio entre 8 y 16 según norma)
- % de filler con los vacíos más próximos a 4 (promedio entre 3 y 5 según norma)

Aplicando estos 4 criterios a los tres tipos de filler: cemento Portland, cal hidratada y polvo de roca, se obtienen los siguientes cuadros:

Tabla 4.7. Determinación del contenido óptimo de filler para el cemento Portland

Cemento Portland						Criterios para determinar el % óptimo de Polvo de roca	Porcentaje de filler elegido
Tipo de filler	Porcentaje de filler						
	0%	2%	4%	6%	8%		
Densidad (gr/cm³)	2,294	2,305	2,309	2,312	2,315	Máxima	8
Estabilidad (lb)	3504,44	4013,36	5707,24	5259,12	4860,58	Máxima	4
Fluencia (0,01")	100	13,67	13,00	14,00	14,67	Más proxi. a 12 (prom. 8 -16)	4
Vacíos (%)	4,85	4,34	4,17	3,94	3,75	Más proxi. a 4 (prom. 3 -5)	6
						Promedio	5,50

Fuente: Elaboración propia.

Con los criterios aplicados, se determina que para el cemento Portland, el porcentaje óptimo de filler es 5,50 %.

Tabla 4.8. Determinación del contenido óptimo de filler para la cal hidratada

Cal hidratada						Criterios para determinar el % óptimo de Polvo de roca	Porcentaje de filler elegido
Tipo de filler	Porcentaje de filler						
	0%	2%	4%	6%	8%		
Densidad (gr/cm ³)	2,294	2,308	2,310	2,316	2,321	Máxima	8
Estabilidad (lb)	3504,44	4481,14	6101,03	5825,59	5473,47	Máxima	4
Fluencia (0,01")	15,00	13,67	12,33	13,33	14,00	Más prox. a 12 (prom. 8 -16)	4
Vacíos (%)	4,85	4,23	4,11	3,78	3,46	Más prox. a 4 (prom. 3 -5)	4
Promedio							5,00

Fuente: Elaboración propia.

Con los criterios aplicados, se determina que, para la cal hidratada, el porcentaje óptimo de filler es 5,00 %.

Tabla 4.9. Determinación del contenido óptimo de filler para el polvo de roca

Polvo de roca						Criterios para determinar el % óptimo de Polvo de roca	Porcentaje de filler elegido
Tipo de filler	Porcentaje de filler						
	0%	2%	4%	6%	8%		
Densidad (gr/cm ³)	2,294	2,302	2,307	2,313	2,317	Máxima	8
Estabilidad (lb)	3504,44	3814,22	4540,67	3987,50	3172,30	Máxima	4
Fluencia (0,01")	15,00	14,00	12,67	13,67	14,33	Más prox. a 12 (prom. 8 -16)	4
Vacíos (%)	4,85	4,48	4,23	3,91	3,65	Más prox. a 4 (prom. 3 -5)	6
Promedio							5,50

Fuente: Elaboración propia.

Con los criterios aplicados, se determina que, para el polvo de roca, el porcentaje óptimo de filler es 5,50 %.

4.3. Determinación del contenido óptimo de C.A. para cada tipo de filler

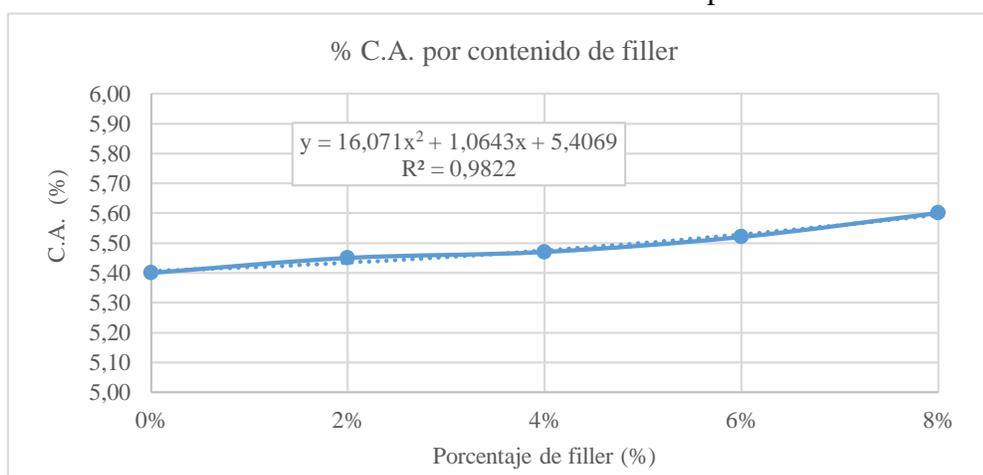
A partir de los resultados de contenidos óptimos de cemento asfáltico para cada variación de filler, se obtiene la siguiente tabla y gráfica, que, a través de su ecuación, permite determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para el contenido óptimo de filler, de cada tipo de filler (cemento Portland, cal hidratada y polvo de roca).

Tabla 4.10. Contenidos óptimos de asfalto para diferentes contenidos de filler

Porcentajes de filler	0%	2%	4%	6%	8%
Porcentaje óptimo de cemento asfáltico (%)	5,40	5,45	5,47	5,52	5,60

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.7. Contenidos de filler vs. contenidos óptimos de asfaltos



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, introduciendo en la ecuación los valores óptimos de filler, determinamos los contenidos óptimos de cemento asfáltico, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.11. Resumen de % óptimos de filler y C.A. para diferentes tipos de filler

Tipo de filler	Cemento Portland	Cal hidratada	Polvo de roca
Porcentaje de filler (%)	5,5%	5,0%	5,5%
Contenido óptimo de cemento asfáltico (%)	5,51%	5,50%	5,51%

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se procede a realizar briquetas para un análisis técnico económico.

4.4. Análisis técnico y económico de las mezclas asfálticas

En el presente documento se realiza un análisis técnico, un análisis económico y un análisis técnico-económico.

4.4.1. Análisis técnico

Para realizar el análisis técnico de las mezclas asfálticas, se procede a realizar briquetas con los contenidos óptimos de filler y cemento asfáltico de cada tipo de filler, para ello se realizan las siguientes dosificaciones:

Tabla 4.12. Dosificaciones finales de mezclas asfálticas con diferentes filler

	Cemento Portland	Cal hidratada	Polvo de roca
Peso Total de Briqueta (gr)	1200	1200	1200
Porcentaje de la mezcla (%)	100%	100%	100%
Porcentaje de Grava (%)	30%	30%	30%
Porcentaje de Gravilla (%)	25%	25%	25%
Porcentaje de Arena (%)	39,5%	40%	39,5%
Porcentaje de filler (%)	5,5%	5,0%	5,5%
Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico (%)	5,51%	5,50%	5,51%
Porcentaje de Agregado (%)	94,49%	94,50%	94,49%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	66,17	66,00	66,17
Peso de Grava (gr) *	340,15	340,20	340,15
Peso de Gravilla (gr) *	283,46	283,50	283,46
Peso de Arena (gr) *	447,86	453,60	447,86
Peso de Filler (gr) *	62,36	56,70	62,36
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizadas las briquetas se determinan las propiedades Marshall y se comparan los resultados con las especificaciones de la norma.

Tabla 4.13. Resultados finales de propiedades físicas Marshall

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
			Óptimo	bases agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
1	Cemento Portland	5,5%	5,51	5,83	6,73	1190,2	1199,5	680	519,5	2,29	2,311	2,41	4,02	16,66	75,84	
2					6,69	1186,5	1188,6	678	510,6	2,32						
3					6,65	1188,4	1192,7	680	512,7	2,32						
4	Cal hidratada	5,0%	5,50	5,82	6,68	1197,3	1201,5	684	517,5	2,31	2,313	2,41	3,94	16,56	76,22	
5					6,69	1196,9	1204,1	688	516,1	2,32						
6					6,63	1195,2	1201,0	683	518,0	2,31						
7	Polvo de roca	5,5%	5,51	5,83	6,59	1195,9	1205,4	687	518,4	2,31	2,310	2,41	4,06	16,69	75,67	
8					6,62	1197,4	1206,8	685	521,8	2,29						
9					6,64	1195,2	1207,3	694	513,3	2,33						
Especificaciones					mínimo								3	13	75	
					máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14. Resultados finales de propiedades mecánicas Marshall

N° de probeta	Tipo de filler	% de filler	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
			Óptimo	bases agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	Cemento Portland	5,5%	5,51	5,83	6,73	2075	5569,3	0,92	5095,94	5349,72	11	13,33
2					6,69	2183	5860,2	0,93	5420,65			
3					6,65	2207	5924,8	0,93	5532,57			
4	Cal hidratada	5,0%	5,50	5,82	6,68	2268	6089	0,93	5647,59	6073,10	13	13,00
5					6,69	2546	6837,6	0,93	6324,82			
6					6,63	2481	6662,6	0,94	6246,87			
7	Polvo de roca	5,5%	5,51	5,83	6,59	1734	4651,1	0,95	4395,28	4061,56	15	13,33
8					6,62	1521	4077,5	0,94	3830,43			
9					6,64	1578	4231	0,94	3958,96			
Especificaciones					1800					-	8	
											16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15. Resumen de resultados finales de propiedades Marshall

Tipo de filler	Cemento Portland	Cal hidratada	Polvo de roca	Valores de la norma	
				Mín.	Máx.
Densidad (gr/cm ³)	2,311	2,313	2,310	2,30	-
Estabilidad (lb)	5349,72	6073,10	4061,56	1800	-
Fluencia (0,01")	13,33	13,00	13,33	8	16
Vacíos (%)	4,02	3,94	4,06	3	5
V.A.M. (%)	16,66	16,56	16,69	13	-
R.B.V. (%)	75,84	76,22	75,67	75	82

Fuente: Elaboración propia.

Técnicamente el cemento portland IP- 30 cumple con las especificaciones y las normas que establece el ensayo Marshall tiene una Densidad de 2, 311 (gr/cm³), Estabilidad de 5349,72 (lb), una Fluencia de 13,33 (0,01"), Vacíos de 4,02 (%), vacíos de agregado mineral V.A.M. de 16,66 (%) y una Relación de betún de vacíos R.B.V. de 75,84 (%). en las briquetas elaboradas con cemento portland IP30 la relación de vacíos es más alta que con cal hidratada y polvo de roca.

Técnicamente la cal hidratada cumple con las especificaciones y las normas que establece el ensayo Marshall tiene una mayor Densidad de 2.313 (gr/cm³), Estabilidad de 6073,10 (lb), siendo mayor estabilidad a comparación del cementó portland IP-30, una Fluencia mayor de 13,00 (0,01"), Vacíos de 3,94 (%), vacíos de agregado mineral V.A.M. de 16,56 (%) y una Relación de betún de vacíos R.B.V. de 76,22 (%).

Técnicamente el llenante mineral polvo de roca cumple con las especificaciones y las normas que establece el ensayo Marshall tiene una Densidad de 2,310 similar a la densidad del cemento portland IP-30 (gr/cm³), Estabilidad de 4061,56 (lb) que es la más menor entre los 3 llenantes, una Fluencia de 13,33 (0,01"), similar al cemento Portland y ala cal hidratada, Vacíos de 4,06 (%), vacíos de agregado mineral V.A.M. de 16,69 (%), que es mayor a la del cemento Portland y ala cal hidratada y una Relación de Betún de Vacíos R.B.V. de 75,22 (%), similar a la del cemento Portland IP-30.

4.4.2. Análisis económico

Con los contenidos óptimos de filler y cemento asfáltico se procede a calcular los rendimientos para cada tipo de filler: cemento Portland, cal hidratada y polvo de roca.

4.4.2.1. Rendimiento de los componentes de la mezcla con cemento Portland

1. Descripción

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Charajas

Densidad de la mezcla (kg/m³) = 2.326

2. Volumen de producción por m²

Unidad = m²

Largo (m) = 1

Ancho (m) = 1

Espesor (m) = 0,05

Volumen compactado (m³) = 0,05

Esponjamiento (%) = 35

Volumen suelto (m³) = 0,068

3. Dosificación

Cantidad total de mezcla por m²:

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Ligante Asfáltico	5,51	8,65
Agregado	94,49	148,35
Total	100	157,01

Cantidad de agregado por m²:

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	30,0	28,35	44,51	2.886	0,015
Gravilla	25,0	23,62	37,09	2.875	0,013
Arena	39,5	37,32	58,60	2.876	0,020
Filler (cemento portland IP- 30)	5,5	5,20	8,16	2.814	0,0029
Total	100	94,49	148,35	-	-

4. Rendimientos por m² de carpeta asfáltica:

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	8,65	Kg
Grava	0,015	m ³
Gravilla	0,013	m ³
Arena	0,020	m ³
Filler cemento portland	0,163	bolsa (50 kg)

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2. Rendimiento de los componentes de la mezcla con cal hidratada

1. Descripción:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Charajas

Densidad de la mezcla (kg/m³) = 2.326

2. Volumen de producción por m²:

Unidad = m²

Largo (m) = 1

Ancho (m) = 1

Espesor (m) = 0,05

Volumen compactado (m³) = 0,05

Esponjamiento (%) = 35

Volumen suelto (m³) = 0,068

3. Dosificación:

Cantidad total de mezcla por m²:

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Ligante Asfáltico	5,5	8,64
Agregado	94,50	148,37
Total	100	157,01

Cantidad de agregado por m²:

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	30,0	28,35	44,51	2.886	0,015
Gravilla	25,0	23,62	37,09	2.875	0,013
Arena	40,0	3,78	5,93	2.876	0,002
Filler (cal hidratada)	5,0	4,72	7,42	2.814	0,0026
Total	100	60,47	94,95	-	-

4. Rendimientos por m² de carpeta asfáltica:

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	8,64	Kg
Grava	0,015	m ³
Gravilla	0,013	m ³
Arena	0,002	m ³
Filler (cal hidratada)	0,927	bolsa (8kg)

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.3. Rendimiento de los componentes de la mezcla con polvo de roca

1. Descripción

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100
 Procedencia del agregado = Charajas
 Densidad de la mezcla (kg/m³) = 2.326

2. Volumen de producción por m²

Unidad = m²
 Largo (m) = 1
 Ancho (m) = 1
 Espesor (m) = 0,05
 Volumen compactado (m³) = 0,05
 Esponjamiento (%) = 35
 Volumen suelto (m³) = 0,068

3. Dosificación:

Cantidad total de mezcla por m²:

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Ligante Asfáltico	5,51	8,65
Agregado	94,49	148,35
Total	100	157,01

Cantidad de agregado por m²:

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	30,0	28,35	44,51	2.886	0,015
Gravilla	25,0	23,62	37,09	2.875	0,013
Arena	39,5	37,32	58,60	2.876	0,020
Filler (polvo de roca)	5,5	5,20	8,16	2.814	0,0029
Total	100	94,49	148,35	-	-

4. Rendimientos por m² de carpeta asfáltica:

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	8,65	Kg
Grava	0,015	m ³
Gravilla	0,013	m ³
Arena	0,020	m ³
Filler (Polvo de roca)	0,0029	m ³

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.4. Análisis de precios unitarios con cada tipo de filler

Tabla 4.16. Análisis de precios unitarios de la mezcla con polvo de roca

A	Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	8,65	7,31	63,22
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0,015	110,00	1,70
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,013	125,00	1,61
-	Arena N°4	m ³	0,020	130,00	2,65
-	Filler (polvo de roca)	m ³	0,0029	150,00	0,43
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	Total, materiales			(A)	72,79
B	Mano de obra				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	Subtotal mano de obra			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F) =	0,84
G	Total, mano de obra			(E+F+O) =	6,43
C	Equipo maquinaria y herramientas				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,32
I	Total, herramientas y equipos			(C+H)	30,99
J	Sub total			(D+G+I)	110,21
L	Gastos generales y administrativos		15,50%	(j)	17,08
M	Parcial			(J+L)	127,30
N	Utilidad		10,00%	(M)	12,73
Q	Total, precio unitario			(M+N)	140,03
	Precio final				140,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17. Análisis de precios unitarios de la mezcla con cal hidratada

A	Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	8,64	7,31	63,11
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0,015	110,00	1,70
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,013	125,00	1,61
-	Arena N°4	m ³	0,002	130,00	0,27
-	Filler (cal hidratada)	Bolsa(8kg)	0,927	25,00	23,18
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	Total, materiales			(A)	93,04
B	Mano de obra				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	Subtotal mano de obra			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F) =	0,84
G	Total, mano de obra			(E+F+O) =	6,43
C	Equipo maquinaria y herramientas				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,32
I	Total, herramientas y equipos			(C+H)	30,99
J	Sub total			(D+G+I)	130,46
L	Gastos generales y administrativos		15,50%	(J)	20,22
M	Parcial			(J+L)	150,69
N	Utilidad		10,00%	(M)	15,07
Q	Total, precio unitario			(M+N)	165,75
	Precio final				165,75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.18. Análisis de precios unitarios de la mezcla con cemento Portland IP-30

A	Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	8,65	7,31	63,22
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0,015	110,00	1,70
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,013	125,00	1,61
-	Arena N°4	m ³	0,020	130,00	2,65
-	Filler (cemento portland IP-30)	Bolsa (50kg)	0,163	40,00	6,53
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	Total, materiales			(A)	78,89
B	Mano de obra				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	Subtotal mano de obra			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F) =	0,84
G	Total, mano de obra			(E+F+O) =	6,43
C	Equipo maquinaria y herramientas				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,32
I	Total, herramientas y equipos			(C+H)	30,99
J	Sub total			(D+G+I)	116,31
L	Gastos generales y administrativos		15,50%	(J)	18,03
M	Parcial			(J+L)	134,33
N	Utilidad		10,00%	(M)	13,43
Q	Total, precio unitario			(M+N)	147,77
	Precio final				147,77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19. Balance final de costos

Descripción	Volumen de mezcla compactada para 1 m ² (m ³)	Precio unitario para 1 m ² (Bs.)	Volumen de mezcla compactada para 1 m ³ (m ³)	Precio Total para 1 m ³ (Bs.)	Incremento
Carpeta asfáltica con filler (convencional polvo de roca), espesor 5 cm.	0,05	140,03	1	2.800,52	0%
Carpeta asfáltica con filler (cal hidratada), espesor 5 cm.	0,05	165,75	1	3.315,08	18,37%
Carpeta asfáltica con filler (cemento portland IP -30) espesor 5cm.	0,05	147,77	1	2.955,34	5,53%

Fuente: Elaboración propia.

Económicamente una carpeta asfáltica con filler (convencional polvo de roca), espesor 5 cm es la más económica con un precio de 2.800 ,52 Bs. por lo tanto el incremento es 0%. Una carpeta asfáltica con filler (cemento portland IP -30), espesor 5 cm es un poco más costosa con un precio de 2.955,34 Bs. Y un incremento de 5,53%. Una carpeta asfáltica con filler (cal hidratada), espesor 5 cm es la más costosa con un precio de 3.315,08 Bs, por lo tanto, el incremento es de 18,37%.

4.4.3. Análisis técnico – económico

Técnicamente la mezcla con cal hidratada tiene mayor resistencia, es decir mayor estabilidad, mayor densidad, menor fluencia y genera menos vacíos a la mezcla densa, le sigue por muy poco la mezcla con cemento Portland IP-30 y por último con el polvo de roca.

Sin embargo, la mezcla con el polvo de roca es la más económica según el análisis de precios unitarios, le sigue la mezcla con el cemento Portland IP-30 y el más caro es la mezcla con cal hidratada.

Por lo tanto, al observar los costos y beneficios técnicos conviene usar el cemento portland en las mezclas asfálticas por que el incremento de costo es relativamente bajo pero que proporciona mejores beneficios técnicos y de resistencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de realizar el análisis de los resultados obtenidos del método Marshall se llegó a las siguientes conclusiones:

- Con el estudio de las propiedades Marshall se pudo determinar las resistencias de diferentes tipos de mezclas asfálticas, haciendo variar los porcentajes y tipos de llenante mineral, como ser cal hidratada, cemento Portland IP-30 y polvo de roca.
- Se determinó que la cal hidratada proporciona mejores resultados de densidad con 2,313 gr/cm³, de estabilidad con 6073,10 lb y vacíos de la mezcla con 3,94%, cumpliendo las especificaciones de una mezcla densa.
- Se determinó técnicamente que la mezcla con cal hidratada es más resistente pero la más cara con un incremento del 18,37%, pero la mezcla con el cemento Portland IP -30 es la segunda más resistente y económicamente es más barata con un 5,53% de incremento en el precio estándar.
- Se puede decir que añadiendo filler a la mezcla asfáltica se obtienen mejores resultados, en comparación a mezclas sin filler, porque reducen los vacíos y de esta manera aumenta la estabilidad y también la fluidez de la mezcla.
- Según el gráfico 4.5, el porcentaje de filler más óptimo es del 4% para los tres tipos de filler, cal hidratada, cemento Portland IP-30 y polvo de roca, porque proporciona mejor estabilidad, y verificando este porcentaje con el resto de las propiedades Marshall, cumple con todas las especificaciones de la norma.
- Finalmente si observamos los valores de los resultados de las propiedades de resistencia Marshall sin llenante mineral, y la comparamos con los resultados con

los diferentes porcentajes de llenante mineral, se aprecia notablemente que el llenante mineral proporciona hasta cierta cantidad, mejores resultados, pero cuando es menor o mayor al 4% , tiende a desfasarse de las especificaciones de la norma, por lo tanto, la ausencia de llenante mineral o su exceso, es perjudicial en las mezclas asfálticas.

- La mezcla más económica es el filler polvo de roca, pero la segunda más económica es con el cemento portland pero que proporciona mejores beneficios técnicos que garantizan carpetas asfálticas más resistentes y durables en el tiempo.
- Como conclusión general, en la actualidad con el uso de las nuevas tecnologías y la continua necesidad de mitigar las fallas que presentan los pavimentos una vez puestas en servicio obliga a la búsqueda de alternativas de control mediante el uso de llenantes minerales que ayuden a resistir esta problemática.

5.2. Recomendaciones

- Como recomendación particular, es necesario el uso de una ropa de trabajo adecuada para realizar la caracterización de los agregados pétreos, los materiales asfálticos y en la preparación de las mezclas asfálticas, con el fin de evitar cualquier accidente y promover la protección personal.
- Es indispensable contar con equipos de alta tecnología para el calentamiento y compactado de las mezclas asfálticas, para evitar los errores de fabricación de briquetas y demás ensayos sobre mezclas asfálticas.
- El ensayo de compactación de briquetas se recomienda realizarlo con una misma temperatura de 160°C, esto para mezclas convencionales en caliente, para ello se recomienda tomar rigurosamente la temperatura de ensayo, con el fin de evitar pérdida de propiedades y errores en los resultados

- Realizar un control más riguroso con respecto a la temperatura y tiempo de rotura de mezclas en caliente, con una temperatura constante de 60°C y un tiempo no mayor a 30 min., puesto que este es un factor determinante para la obtención de buenos resultados de estabilidad y fluencia.

- Se recomienda no excederse en la adición de filler en la mezcla asfáltica ya que podrían generar pavimentos rígidos y frágiles.