

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En el medio ingenieril hay necesidad de mejorar las metodologías de diseño de la estructura de pavimentos, los mismos que sean resistentes a las deformaciones permanentes, a las grietas por fatiga, grietas por temperatura y finalmente para alargar su vida útil.

Actualmente la construcción y mantención involucran altos costos económicos, lo que hace indispensable profundizar el conocimiento acerca del comportamiento de los pavimentos flexibles y en particular mezcla asfáltica caliente convencional y mezcla asfáltica modificada a través de estudios teóricos y experimentales.

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto, los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, así la granulometría es la principal característica física y fundamental de todo el conjunto de partículas que influye en el comportamiento de la mezcla.

El diseño de mezclas asfálticas de Marshall, fue desarrollado por Bruce Marshall para el Departamento de Transportes de Mississippi alrededor de 1939. Este método consiste en seleccionar agregados de calidad; seleccionar y ensayar el ligante asfáltico y determinar las temperaturas de mezcla y compactación, mezclar el cemento asfáltico, los agregados y compactar los especímenes.

Posteriormente el método de diseño de mezclas Hveem fue desarrollado por Francis Hveem (1938), Método de la Western Association of State Highway and Transportation Officials. WASHTO (1984). Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987), desarrollaron proyectos para el diseño de mezclas, que incluía nuevos métodos de compactación en laboratorio y la evaluación de las

propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.

El método Superior Performing Asphalt Pavement SUPERPAVE (1993), contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, y Sud América debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su funcionamiento. Nuestro País aún se encuentra en la etapa de inicio de implementación por cual en la presente investigación utilizaremos la gradación de áridos de esta metodología para elaborar mezcla asfáltica convencional y con polímero.

1.2 Problemática

Las mezclas asfálticas se conforman de la gradación de áridos y cemento asfáltico, que son debidamente calentados a una temperatura adecuada para poder mezclarse y luego colocarse.

Actualmente la colocación de mezclas asfálticas ocasiona problemas en cuanto a la obtención de las propiedades mecánicas para las cuales la mezcla fue diseñada, debido a que en primer lugar la temperatura de colocación de la mezcla es muy difícil de controlar por factores ambientales, ya que son muy aleatorios y en segundo lugar porque no se dispone de alternativas o complementariedad de especificaciones de granulometría de áridos que aseguren la durabilidad y estabilidad de la capa rodadura. Por eso en un afán de mejorar las propiedades mecánicas surge nuevos método de diseño SUPERPAVE para mezclas asfálticas, basados en complementar y mejorar la normativa tradicional que prescribe las bandas granulométricas a utilizar, así mismo para compatibilizar los aspectos constructivos con el comportamiento de

los pavimentos en servicio. Por otro lado, se sabe que la gradación de áridos tiene influencia directa en las principales propiedades de una mezcla asfáltica para niveles de compactación óptimos.

Es necesario adecuarse a las demandas actuales de tráfico, pero también se deben prever las futuras; esto se logra mediante una mejor selección de materiales, es decir, necesariamente se debe caracterizarlo para poder evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, a través de normas y ensayos.

1.3 Justificación

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas convencionales deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo, bajo la acción vehicular y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima.

Por otra parte el asfáltico modificado es una técnica nueva usada en varios países con el fin de aprovechar los asfaltos en la pavimentación de vías. Éste consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas; es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular); además, incrementan la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia del agua. Estas mezclas aumentan la resistencia a la deformación, a los esfuerzos de tensión repetida y, por lo tanto a la fatiga, reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Debido a la necesidad de crear nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas y así obtener un mejor desempeño del pavimento surgió el método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) que busca analizar y establecer predicciones

del desempeño del pavimento. Específicamente la investigación solo hará el uso de la granulometría de SUPERPAVE, para complementar la normativa estándar en la gradación de áridos en mezclas asfálticas convencionales y con polímeros. Pero el empleo en el país de esta nueva metodología de diseño de mezcla asfáltica se ve limitada por el alto costo de los equipos de laboratorio necesarios para la realización de los ensayos que comprende el método; razón por la cual en el medio no se cuentan con los mismos.

Por ello la propuesta será una mezcla asfáltica en caliente siempre con el método Marshall pero con granulometría SUPERPAVE que busca diseñar una mezcla asfáltica en caliente que brinde un mejor desempeño que los convencionales.

Además empresas dedicadas a la producción de mezcla asfáltica podrán conocer los resultados y beneficios del empleo de este tipo de mezclas diseñadas con el método Marshall pero con asfalto y granulometría SUPERPAVE, y así evaluar su implementación en el país.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la granulometría SUPERPAVE en el diseño y comportamiento de las mezclas asfálticas utilizando asfalto convencional y modificado de acuerdo al procedimiento Marshall, que compatibilicen los aspectos constructivos de desempeño en el servicio de pavimento.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Describir aspectos generales de mezclas asfálticas con asfaltos convencionales y modificados con polímeros.
- ✓ Analizar los fundamentos teóricos de la nueva metodología SUPERPAVE referentes a la gradación de áridos.

- ✓ Caracterizar los materiales pétreos, cemento asfáltico convencional y modificado con polímero por ensayos de laboratorio para el diseño de mezclas asfálticas.
- ✓ Ensayar las mezclas de prueba mediante el Método Marshall para mezclas asfálticas utilizando asfaltos convencionales y modificados con polímero, de acuerdo a las especificaciones que establece las normas AASTHO ASTM y el Manual de Carreteras de la Administración Boliviana de Caminos.
- ✓ Comparar la estructura granular SUPERPAVE con granulometría estándar en mezclas asfálticas con asfaltos convencionales y con polímeros, mediante análisis las propiedades volumétricas de mezclas.
- ✓ Establecer conclusiones y recomendaciones de los efectos de la granulometría de SUPERPAVE, en mezclas asfálticas convencionales y con polímeros.

1.5 Alcance

Con la presente investigación “Efecto de la Granulometría SUPERPAVE en mezclas asfálticas convencionales y con polímeros” se quiere lograr el estudio de comparación e influencia de la granulometría SUPERPAVE en las propiedades de mezclas asfálticas utilizando asfaltos convencionales y modificados con polímeros, a objeto de tener alternativas para mejorar el diseño de mezcla.

Se establece el problema fundamental de investigación que se persigue con la elaboración del proyecto, el efecto de la gradación de los materiales pétreos de granulométrica de SUPERPAVE para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales y con polímeros, por medio de la definición de los objetivos generales, específicos, alcance y sus limitaciones.

Consecutivamente se describirá los aspectos generales de las mezclas asfálticas, como el ligante asfáltico convencional, asfalto modificado con polímero y agregados

pétreos, las propiedades físicas mecánicas y especificaciones relevantes que se debe considerar para el diseño de mezcla asfáltica.

Posteriormente se conceptualizará todo lo referente a la investigación de la granulometría del sistema SUPERPAVE en las mezclas asfálticas. El sistema SUPERPAVE entrega: nuevas especificaciones para asfalto, nuevas especificaciones para agregados, nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas y nuevos modelos de predicción del comportamiento, enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente. Particularmente se describe el primer paso del análisis SUPERPAVE que involucra la selección cuidadosa de los materiales, bandas granulométricas y el proporcionamiento volumétrico de los mismos, puesto que en nuestro medio no se dispone los equipos de la metodología de SUPERPAVE.

Luego se procede a la aplicación de la investigación, con la caracterización de los materiales pétreos, asfaltos convencionales, asfaltos modificados con polímeros, elaboración de las briquetas de mezcla convencional y mezcla modificada con polímero para las tres granulometrías propuestas.

Finalmente analizar el cumplimiento de los intereses formulados inicialmente en el proyecto, se especificará si los resultados serán satisfactorios en cuanto al desarrollo de los efectos del gradación SUPERPAVE en el diseños de mezclas asfálticas con asfaltos convencionales y modificados con polímeros.

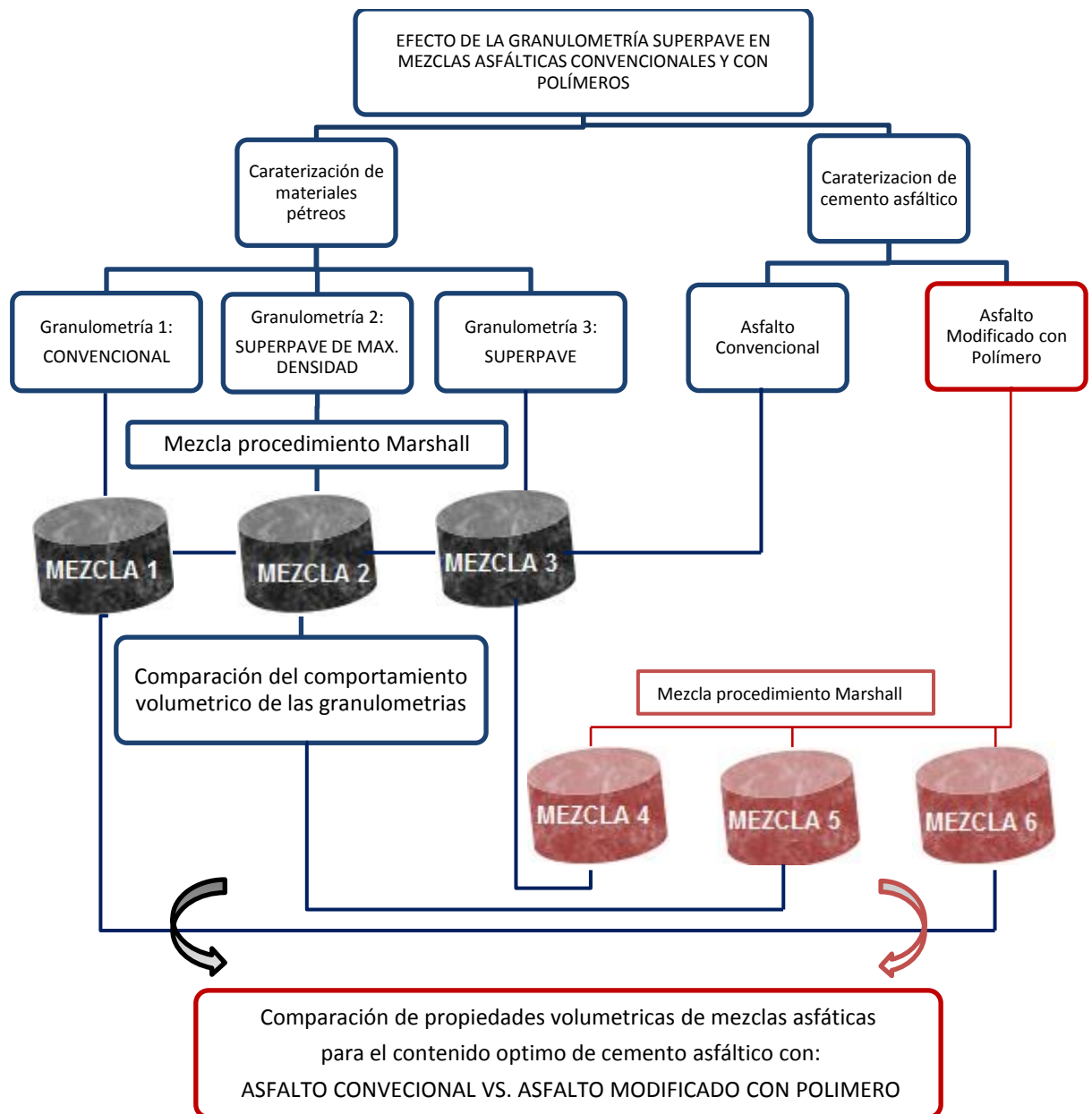
1.6 Limitaciones

La investigación abordará descripción teórica y el diseño de laboratorio, excluyendo para la presente; la producción de la mezcla en planta y la realización de tramos de prueba.

Los ensayos concernientes a la determinación de la calidad de los materiales pétreos y cemento asfáltico corresponderán nada más a aquellos que sean de utilidad para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente Método Marshall

Se analizará para un tráfico alto ya que representa las condiciones más desfavorables a las cuáles se puede someter un pavimento en las carreteras.

1.6 Medios y metodología



El proyecto de investigación “Efecto de la Granulometría SUPERPAVE en mezclas asfálticas convencionales y con polímeros” deberá comprender los siguientes medios para la elaboración del mismo:

- ✓ Recopilar información bibliográfica referente al estudio planteado. Esta información, se la obtendrá a través de revisión de libros, páginas web, etc.
- ✓ Se contará con el apoyo del municipio o instituciones afines para disponer del banco de materiales, así mismo del laboratorio de suelos y asfalto de U.A.M.S y S.E.D.E.C.A. para caracterizar los materiales pétreos y elaboración de los especímenes de mezcla asfáltica.
- ✓ Los materiales pétreos que se utilizarán para la elaboración de la mezcla asfáltica provienen del banco de materiales “San José de Charaja”, ubicado en Valle Concepción del departamento de Tarija.
- ✓ La caracterización de los materiales pétreos se realizaran de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Superpave, basados en Normas ASTM y AASTHO. Ensayos de consenso: Angularidad de agregado grueso, angularidad de agregado fino, partículas planas y alargadas. Ensayos de origen: desgaste de los ángeles.
- ✓ La dosificación de los áridos se procederá por granulometría teórica proyectada de acuerdo a sus especificaciones de tamaño máximo nominal, designados tres tipos, la granulometría 1 cumple con la banda convencional del Manual de A.B.C. (Carretera de Administración Boliviano de Caminos) pero no con los requerimientos de la faja de Superpave, la granulometría 2 no cumple con los requerimientos de la banda granulométrica Manual de Carretera del A.B.C., pero cumple con la banda de requerimientos SUPERPAVE y finalmente la granulometría 3 cumple con las dos especificaciones de densificación máxima.
- ✓ En cuanto al cemento asfáltico; se debe identificar la procedencia de la refinería o planta, posteriormente determinar las características del cemento asfáltico convencional, con los ensayos correspondientes de acuerdo a normas AASTHO,

ASTM y Manual de Laboratorio de A.B.C.; de manera similar se caracteriza el cemento asfáltico con polímero.

- ✓ Posteriormente elaborar probetas de ensayo mediante el Método Marshall, el asfalto y los agregados se calientan y se mezclan hasta que todas las partículas estén revestidas de asfalto, luego de haberse mezclado, es colocada en los moldes Marshall para después compactarlas con el martillo. El número de golpes depende de la cantidad de tránsito para la cual ha sido diseñada la mezcla. Luego de esto, se deja enfriar las briquetas y posteriormente son extraídas de los moldes.
- ✓ Para que el análisis de resultados sea confiable, se fabricaron 45 briquetas Marshall en la mezcla convencional, 15 briquetas por las granulometrías (Granulometría convencional, Superpave y Superpave de máxima densidad), 3 briquetas por punto y 5 puntos por granulometría. Para el análisis de la mezcla modificada se fabricaron 9 briquetas Marshall, las mismas que fueron elaboradas con la información del contenido óptimo de asfalto de las granulometrías convencionales y por eso solo se dispuso un punto por granulometría y 3 briquetas por el punto.
- ✓ Finalmente se evaluará los resultados de los efectos de la gradación de áridos Superpave en mezclas asfálticas con asfaltos convencionales y asfaltos modificados con polímero.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles son ampliamente utilizados en la mayoría de los países a nivel mundial; y Bolivia no es la excepción. Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no sólo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos: la “fachada” que los usuarios observan cotidianamente (Cepeda, 2002), y la superficie por la que transitan diariamente los millones de vehículos, que resuelven gran parte de las necesidades de movilidad en las sociedades humanas contemporáneas.

Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos. El comportamiento de los mismos al aplicarles cargas es muy diferente, tal como se puede verse en la figura 2.1

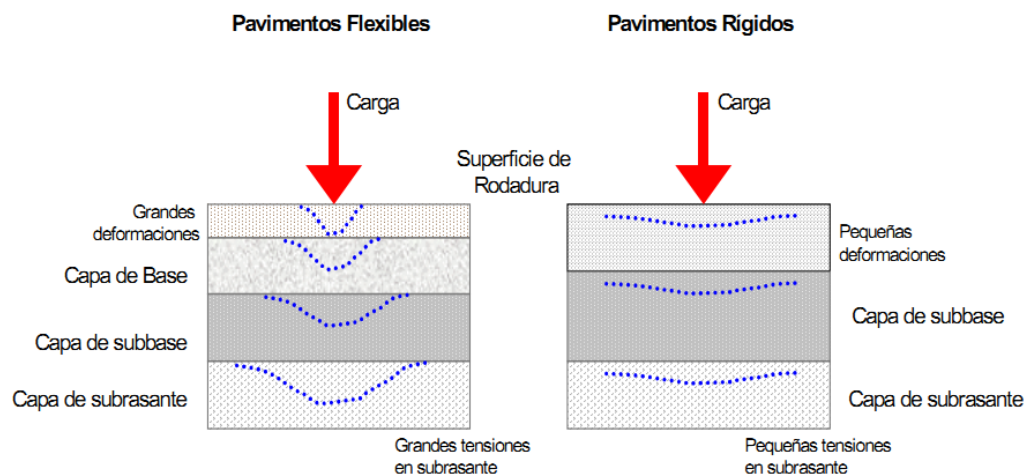


FIGURA 2. 1 - Esquema del comportamiento del pavimento flexible y rígido

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos

En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultados tensiones muy bajas en la subrasante. Lo contrario sucede en un pavimento flexible, la superficie de

rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasantes.

Respecto a la superficie de rodadura del pavimento flexible los dos principales constituyentes son el agregado mineral y ligante asfáltico que asume la mayor responsabilidad en la calidad de la capa asfáltica que se construya.

2.2 AGREGADOS PÉTREOS

2.2.1 Importancia del agregado en mezcla asfáltica

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; cabe mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica.

2.2.2 Definición de agregado

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, usados para ser mezclados en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

2.2.2.1 Tipos de agregado

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, los mismos se clasifican en los siguientes tipos:

a) Agregados Naturales.

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento.

b) Agregados de Trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de canteras cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

c) Agregados Artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

d) Agregados Marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.2.2.2 Conceptos más frecuentes relacionados a los agregados.

- ✓ **Agregado Grueso:** Agregado que pasa el tamiz de 3'' y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- ✓ **Agregado Fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200)
- ✓ **Polvo Mineral:** La porción de agregado fino que pasa el tamiz 75 μ m (No. 200)
- ✓ **Relleno Mineral:** Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200).

- ✓ **Agregado de Graduación Gruesa:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- ✓ **Agregado de Graduación Fina:** Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- ✓ **Agregado Densamente Graduado:** Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- ✓ **Agregado de Graduación Abierta:** Agregado que contiene poco o ningún llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.
- ✓ **Agregado Bien Graduado:** Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de un llenante mineral con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

2.2.3 Clasificación de rocas

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas, y metamórficas (Tabla 2.1). Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

CLASIFICACION GENERAL DE ROCAS

Clase	Tipo	Familia
Sedimentarias	Calcáreas	Caliza Dolomita
	Silíceas	Arcilla Esquistosa Arenisca Horsteno Conglomerado ¹ Breccia ¹
Metamórficas	Foliadas	Gneis Esquisto Anfibolita Pizarra
	No Foliadas	Cuarcita Mármol Serpentina
Igneas	Intrusivas (de grano grueso)	Granito ² Sienita ² Diorita ² Gabbro Periodotita Piroxenita Hornablendita
	Extrusivas (de grano fino)	Obsidiana Pómez Tufa Riolita ^{2,3} Traquita ^{2,3} Andesita ^{2,3} Basalto ² Diabasa

¹También puede estar parcialmente, o completamente, compuesta de materiales calcáreos.

²Aparece, frecuentemente, como roca porfirítica.

³Se incluyen bajo el término general "felsita" cuando no se pueden determinar, cuantitativamente, los minerales constituyentes.

TABLA 2.1 - Clasificación de Agregados.

Fuente: Serie de Manuales N.º.22 (MS-22).

2.2.4 Clasificación y Producción de Agregados

2.2.4.1. Clasificación de los Agregados

Los agregados usados en pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

2.2.4.1.1 Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena.

2.2.4.1.2 Agregados procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras, antes de ser usados en la pavimentación; de la calidad de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La roca es triturada por tres razones:

- 1) Para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa,
- 2) Para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y
- 3) Para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

2.2.4.1.3. Agregados sintéticos

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templearla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria, y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

2.2.4.2. Producción de Agregados

Cuando se trate de arenas o gravas, se deberá tener un cuidado especial al remover el suelo de destape (suelo que cubre el depósito) para no contaminar el agregado. Esto es particularmente importante cuando el suelo de destape (o descapote) contiene arcilla, vegetación, o algún otro material que pueda afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Puede que algún material de destape proporcione un relleno mineral aceptable; sin embargo, rara vez este material podrá producir una mezcla de agregado con la adecuada proporción de relleno mineral si tan solo se

añade al depósito de agregado a medida que este es removido. En consecuencia, cualquier material de destape que sea adecuado para ser usado como relleno mineral deberá ser removido del depósito, tamizado, y añadido posteriormente al agregado ya procesado.

2.2.5 Importancia de la reducción de agregado.

Después de haber seleccionado una muestra de agregado, a veces es necesario reducir su tamaño (volumen) a uno más conveniente para que pueda ser manejada y ensayada. Debido a que este proceso de reducción puede causar segregación, es necesario tener mucho cuidado para poder preservar la integridad de la muestra. La Figura 2.4 ilustra dos ejemplos de métodos de reducción. Generalmente, es preferible usar el partidador mecánico de muestras con agregados gruesos o agregados finos secos. Por otro lado, el cuarteo es el mejor método cuando la muestra de agregado está húmeda. La reducción de la muestra se hace en base al tamaño máximo nominal del agregado y de acuerdo a la norma AASHTO T 248-02 y su equivalente ASTM C 702-98 (2003), describe ambos métodos en detalle.

2.2.6 Propiedades de los agregados utilizados en Mezclas Asfálticas

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

- ✓ Graduación y tamaño máximo de partícula.
- ✓ Limpieza.
- ✓ Dureza.

- ✓ Forma de la partícula.
- ✓ Textura de la superficie.
- ✓ Capacidad de absorción.
- ✓ Afinidad con el asfalto.
- ✓ Peso específico.

Cada una de las propiedades mencionadas se describe a continuación.

2.2.6.1 Graduación y Tamaño Máximo de la Partícula

2.2.6.1.1 Graduación

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

2.2.6.1.2 Tamaño Máximo de Partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

a) Tamaño Máximo Nominal del Agregado

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

b) Tamaño Máximo del Agregado

Designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

2.2.6.1.3 Limpieza

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado de acuerdo a la norma AASHTO T 11-97 (2000) y su equivalente ASTM 117-95 (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200). El Ensayo “Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena” (AASHTO T 176-02) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

2.2.6.1.4 Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie; deben de tener mayor resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito. El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles (AASHTO T 96-2002, Equivalencia ASTM C-131-2001) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión.

2.2.6.1.5 Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la

mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como “cubicidad de las partículas” (Normas: ASTM D 692). Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de un pétreo.

2.2.6.1.6 Textura superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El

trituration produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

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

2.2.6.1.7 Capacidad de absorción

Normas: (Agregado grueso: AASHTO T 85-91 y ASTM C 127-88 (1993). Agregado fino: AASHTO T 84-00 y ASTM C 128-97).

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

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los haga deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos.

Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

2.2.6.1.8 Afinidad con el Asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas, y las rocas trapecanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

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

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

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

2.2.6.1.9 Peso Específico

(Norma: ASTM D 70, AASHTO T 228)

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica) es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso. Una tonelada de agregado de bajo peso específico tiene un volumen mayor (ocupa más espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por consiguiente, para poder cubrir todas las partículas de agregado, más asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación

Equivalente de arena, AASHTO T 176	45% mín.
Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 210	35% min

2.2.7.2.1 Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29.

La graduación del agregado fino será conforme a la graduación en la Tabla 2.2 para el número de graduación especificado en la orden, u otra graduación designada por el comprador.

Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación No. 1	Graduación No. 2	Graduación No. 3	Graduación No. 4	Graduación No. 5
3/8"	9.5 mm	100	—	—	100	100
No. 4	4.75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
No. 8	2.36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
No. 16	1.18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
No. 30	600µm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
No. 50	30µm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
No. 100	150µm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
No. 200	75µm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	—

TABLA 2.2 - Requerimientos de Graduación para agregados Finos

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Secretaria de Integración Económica Centroamericana.

2.2.7.3 Granulometría de agregados combinados (finos y gruesos).

Consiste en la combinación de diferentes tamaños de agregado, que debe llenar los requisitos siguientes:

Granulometría Tabla 2.3

Grumos de arcilla y partículas friables, AASHTO T 112 1% máx.

Libre de materiales vegetales, basura, terrones, arcilla y sustancias deletéreas.

Tamiz	Porcentaje de masa pasando, Designación de tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
	Designación de la Graduación					
	A	B	C	D	E	F
37.5 mm	100 ⁽¹⁾					
25.0 mm	97-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾			
19.0 mm	—	97-100 ⁽¹⁾	97-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	
12.5 mm	—	76-88 ⁽⁵⁾	* ⁽⁵⁾	97-100 ⁽¹⁾	97-100 ⁽¹⁾	
9.50 mm	53-70 ⁽⁶⁾	—	* ⁽⁶⁾	—	* ⁽⁵⁾	100 ⁽¹⁾
4.75 mm	40-52 ⁽⁶⁾	49-59 ⁽⁷⁾	* ⁽⁷⁾	57-69 ⁽⁶⁾	* ⁽⁶⁾	33-47 ⁽⁶⁾
2.36 mm	25-39 ⁽⁴⁾	36-45 ⁽⁵⁾	* ⁽⁵⁾	41-49 ⁽⁶⁾	* ⁽⁶⁾	7-13 ⁽⁴⁾
600 µm	12-22 ⁽⁴⁾	20-28 ⁽⁴⁾	* ⁽⁴⁾	22-30 ⁽⁴⁾	* ⁽⁴⁾	—
300 µm	8-16 ⁽³⁾	13-21 ⁽³⁾	* ⁽³⁾	13-21 ⁽³⁾	* ⁽³⁾	—
75 µm	3-8 ⁽²⁾	3-7 ⁽²⁾	3-8 ⁽²⁾	3-8 ⁽²⁾	3-8 ⁽²⁾	2-4 ⁽²⁾

(1) Procedimientos estadísticos no aplican.

* El contratante especifica el valor del rango y límites.

() Desviación permisible (\pm) de el rango de valores.

TABLA 2.3 - Rango de Valores para Graduación de Agregados para Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente.

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Secretaría de Integración Económica Centroamericana.

DESIGNACIÓN DE TAMICES	GRADACIÓN DE LOS AGREGADOS				
	A	B	C	D	E
2"	100	---	---	---	---
1 ½"	97 - 100	100	---	---	---
1"	---	97 - 100	100	---	---
¾"	66 - 80 (5)	---	97 - 100	100	---
½"	---	---	76 - 88 (5)	97 - 100	100
3/8"	48 - 60 (6)	53 - 70 (6)	---	---	90-100
No. 4	33 - 45 (5)	40 - 52 (6)	49 - 59 (7)	57 - 69 (6)	55-85
No. 8	25 - 33 (4)	25 - 39 (4)	36 - 45 (5)	41 - 49 (6)	32-67
No. 16	---	---	---	---	23-52
No. 30	---	---	---	---	15-37
No. 40	9 - 17 (3)	10 - 19 (3)	14 - 22 (3)	14 - 22 (3)	---
No. 50	---	---	---	---	7- 23.
No. 100	---	---	---	---	---
No. 200	3 - 8 (2)	3 - 8 (2)	3 - 7 (2)	3 - 8 (2)	---
Bitúmen soluble	4.0- 7.0	4.5- 7.5	4.5- 9.0	4.5 - .0	

TABLA 2.4 - Requisitos de la gradación de agregados

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 4 de Administración Boliviana de Caminos

2.2.8 Especificaciones sobre Agregados pétreos

Estas se basan en las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Muestreo del agregado mineral.	AASHTO T 2	ASTM D 75
Ensayo de Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de agregados finos.		ASTM C 128
Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos.		ASTM C 127
Análisis granulométrico de los agregados.	AASHTO T 27	ASTM C 136
Análisis granulométrico de los agregados finos.	AASHTO 11	ASTM C 117
Ensayo de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	AASHTO 176	ASTM D 2419
Ensayo a la abrasión del agregado grueso de tamaño pequeño usando la Máquina de los Ángeles.	AASHTO T 96	ASTM C 131

TABLA 2. 5 - Normas AASHTO y ASTM aplicables para agregados
Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente

2.3 ASFALTO

2.3.1 Definición de asfalto

Es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad.

2.3.2 Obtención del Asfalto en Refinerías

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. Para obtener este debe separarse entonces las distintas fracciones del crudo de petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo

2.3.2.1 Destilación Primaria

Es la primera operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, kerosene, gas oíl), hierven a esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora. El líquido o residuo de destilación primaria se junta todo en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

2.3.2.2 Destilación al Vacío

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfáltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionadora, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío. De acuerdo a la

cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que ya pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

2.3.2.3 Desasfaltización con propano o butano

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, contiene los asfaltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfaltenos es disolver (extraer) este aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina "Desasfaltización" y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120 °C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado "bitumen".

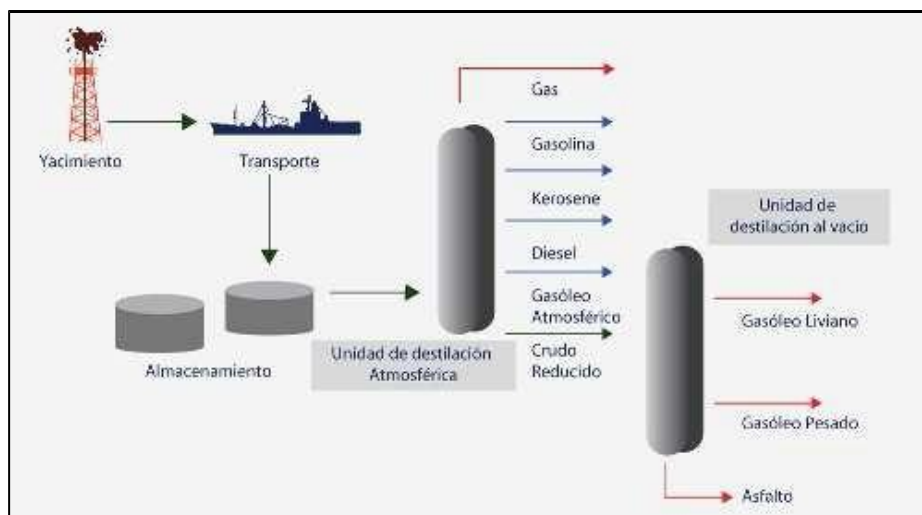


FIGURA 2. 2 - Obtención del Asfalto

Fuente:http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasf altos/proceso/

2.3.3 Composición del Asfalto

La composición química de los asfaltos es muy compleja, básicamente está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio.

La composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfaltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfaltenos, denominada máltenos. Las resinas contenidas en los máltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insolubles asfaltenos. Los máltenos y asfaltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

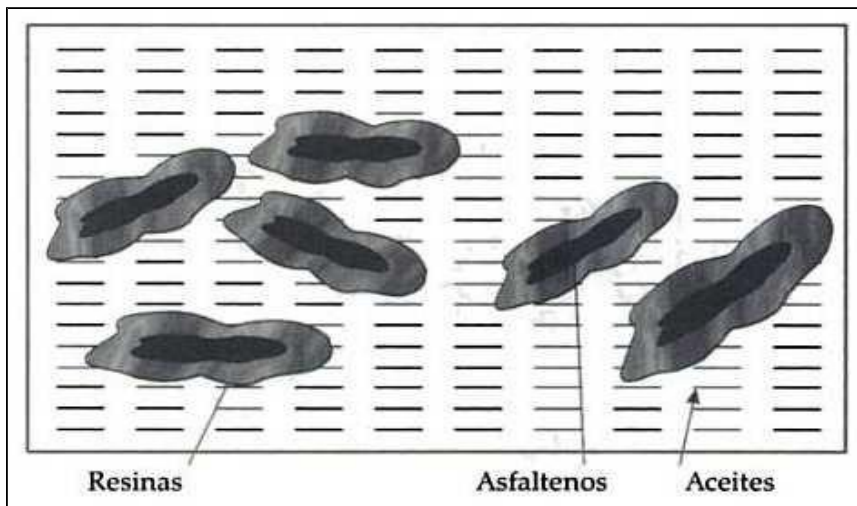


FIGURA 2.3 - Esquema coloidal de Pfeiffer.

Fuente: Hugo León Arenas, Tecnología del cemento asfáltico

2.3.4 Propiedades físicas del asfalto de pavimentación

Las propiedades físicas de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

2.3.4.1 Durabilidad

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto debido a que el comportamiento del pavimento es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

2.3.4.2 Adhesión y cohesión

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

Cohesión por otro lado, es la capacidad del asfalto de mantener firmes las partículas del agregado en el pavimento terminado.

2.3.4.3 Susceptibilidad a la temperatura

El asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando) conforme su temperatura aumenta. Esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura.

La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si estos tienen el mismo grado de consistencia.

Su importancia radica en que el asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que estas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado.

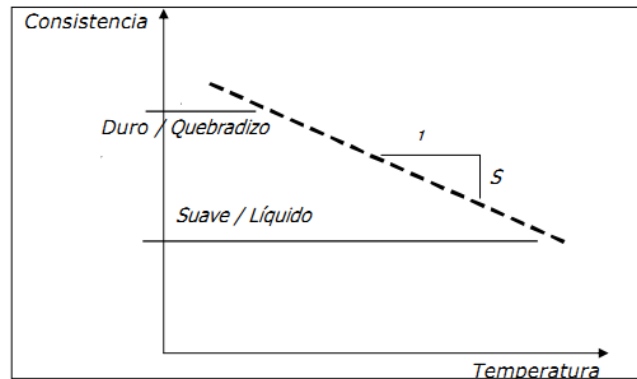


FIGURA 2.4 - Comportamiento del asfalto: Consistencia vs. Temperatura

Fuente: Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. Asphalt Institute.

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

2.3.4.4 Endurecimiento y envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas del agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas, mientras está revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado, esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa.

No todos endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y así ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento.

2.3.5 Clasificación de los asfaltos de pavimentación

De acuerdo a la American Society for Testing and Materials (ASTM), los asfaltos de pavimentación se clasifican en tres grupos generales:

2.3.5.1 Cementos asfálticos: se dividen bajo tres diferentes sistemas, cada uno abarca diferentes grados con distintos rangos de consistencia.

2.3.5.1.1 Caracterización por penetración: se aplica la norma ASTM D- 946 (Clasificación Estándar por Grado de Penetración para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación). Esta abarca los siguientes grados de penetración:

- ✓ 40 – 50
- ✓ 60 – 70
- ✓ 85 – 100
- ✓ 120 – 150
- ✓ 200 – 300

Este método se efectúa dejando penetrar una aguja dentro de una muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que penetra la aguja en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1 mm). Un grado 200- 300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas de 200 a 300 décimas de milímetro. Esta es una indicación de un asfalto “blando”, un grado 40- 50 es indicación de un asfalto “duro”.

2.3.5.1.2 Caracterización por viscosidad: se aplica la norma ASTM D- 3381 (Clasificación Estándar por Grado de Viscosidad para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación) clasifica los asfaltos en base a su viscosidad absoluta a 60°C. El poise (P) es la unidad normal de medida. Dependiendo de esta, los asfaltos se clasifican en:

- ✓ **AC- 5 (500 ± 100):** utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para riego de impregnación, riego de liga, en estabilizaciones y en mezclas asfálticas en caliente.
- ✓ **AC- 10 (1000 ± 200):** utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para carpetas y morteros de mezcla en frío.

- ✓ **AC- 20 (2000 ± 400):** utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones asfálticas usadas en morteros y carpetas de mezclas en frío.
- ✓ **AC- 30 (3000 ± 600):** utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones para carpetas y mezclas en frío.

2.3.5.1.3 Caracterización por comportamiento: este sistema fue elaborado por el Instituto de Asfalto de Estados Unidos y propuesto en el programa SHRP (Strategic Highway Research Program), aunque también está incluido en la norma ASTM D-6373 (Especificación Estándar por Grado de Comportamiento) incluye el conocimiento de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en función de la temperatura del aire y la latitud geográfica.

2.3.5.2 Asfaltos rebajados: conocidos como asfaltos diluidos, son cementos asfálticos que han sido mezclados con solventes de petróleo. Existen tres clases:

2.3.5.2.1 Asfalto de curado rápido (RC): asfalto diluido, compuesto de cemento asfáltico y un disolvente tipo nafta o gasolina de alta volatilidad.

2.3.5.2.2 Asfalto de curado medio (MC): asfalto diluido, compuesto de cemento asfáltico y un disolvente como la kerosina de media volatilidad.

2.3.5.2.3 Asfalto de curado lento (SC): asfalto diluido, compuesto de cemento asfáltico y aceites pesados de baja volatilidad.

2.3.5.3 Asfaltos emulsificados: es una emulsión de cemento asfáltico y agua que contiene una pequeña cantidad de un agente emulsionante. Es un sistema heterogéneo que normalmente contiene dos fases inmiscibles (asfalto y agua), en donde el agua forma la fase continua de la emulsión y pequeños glóbulos de asfalto forman la fase discontinua. La emulsión de asfalto puede ser:

2.3.5.3.1 Emulsión aniónica: los glóbulos de asfalto están cargados negativamente.

2.3.5.3.2 Emulsión catiónica: los glóbulos de asfalto están cargados positivamente

2.3.6 Especificaciones sobre cementos asfálticos

Estas se basan en las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Viscosidad	T - 201 T - 202	D - 2170 D - 2171
Penetración	T - 49	D - 5
Punto de Inflamación	T - 48	D - 92
Prueba de Película Delgada en Horno	T - 179	D - 1754
Ductilidad	T - 51	D - 113
Solubilidad	T - 44	D - 2042
Peso Específico	T - 228	D - 70
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695

TABLA 2.6 - Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente

2.4 POLÍMEROS

2.4.1 Definición de polímero

Un polímero es una sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeros. El número de unidades que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización.

Los materiales con un grado elevado de polimerización se denominan altos polímeros. Los homopolímeros son polímeros con un solo tipo de unidad que se repite. En los copolímeros se repiten varias unidades distintas.

2.4.2 Producción de los polímeros

El proceso para producir un polímero es llamado polimerización, los monómeros se unen entre sí para generar las gigantescas moléculas que constituyen el material. La mayor parte de las materias primas necesarias para sintetizar polímeros derivan de productos del carbón y del petróleo, que suelen estar constituidos por moléculas de pequeño peso molecular. Para formar un polímero existen dos caminos factibles: polimerización por adición y polimerización por condensación

2.4.2.1 Polimerización por adición

Los monómeros se adicionan unos con otros, de tal manera que el producto polimérico contiene todos los átomos del monómero inicial. Un ejemplo de esto es la polimerización del etileno (monómero) para formar el polietileno, en donde todos los átomos que componen el monómero forman parte del polímero.

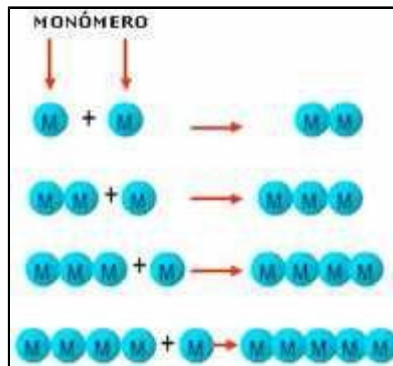


FIGURA 2.5 - Esquema de polimerización por adición.

Fuente:

<http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=136400>

2.4.2.2 Polimerización por condensación

En este caso, no todos los átomos del monómero forman parte del polímero. Para que dos monómeros se unan, una parte de éste se pierde.

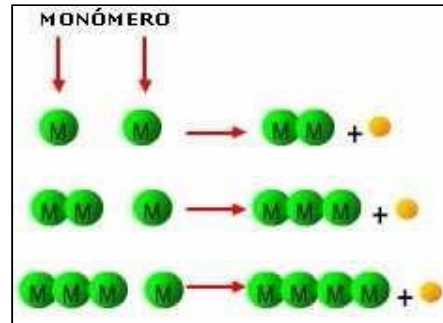


FIGURA 2.6 - Esquema de polimerización por condensación

Fuente: <http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=136400>

2.4.3 Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos

En la actualidad los cementos asfálticos son modificados comúnmente con:

2.4.3.1 Elastómeros

Son polímeros de respuesta elástica como: Latex, Hule natural, Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), Estireno-Butadieno- Latex (SBR).

- ✓ **Latex**, Hule natural, SBS, SBR. Este tipo de polímero es el más utilizado en la modificación del asfalto, el efecto de la adición de estos al asfalto es aumentar su intervalo de plasticidad y disminuir la susceptibilidad térmica. El punto de ablandamiento puede aumentar hasta 20°C, a temperaturas inferiores a 70°C los asfaltos tienen menor penetración, esto es interesante ya que a estas temperaturas se dan deformaciones en las superficies de rodamiento. Los asfaltos son más duros pero siguen siendo elásticos lo que evita la formación de roderas y el agrietamiento de las mismas. La rigidez de estos asfaltos ayuda a soportar los largos tiempos de carga sin deformaciones.

Estireno butadieno termoplástico elastómero SBS es de color blanco o amarillento poroso partículas con la barra o en escamas - en forma de apariencia procedentes de goma y plástico.



FIGURA 2. 7 – Polímero SBS y SBR

Fuente: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/sbr>

- ✓ **Hule de llanta.** Las propiedades que adquiere el asfalto al añadirle este tipo de hule son similares a las que se obtienen con el polímero SBR o SBS aunque, se deben utilizar dosificaciones más elevadas.

2.4.3.2 Plastómeros

Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia, como consecuencia no son deformables elásticamente como: polietileno, PVC, Acetato de Etil-vinilo (EVA).

- ✓ **Polietileno.** Este polímero no tiene una alta compatibilidad con el asfalto ni le confiere propiedades espectaculares, pero se usa ya que es un componente de bajo costo y soluciona un problema ecológico, al poder disponer de los desechos de este material en las carreteras. Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico cuando son añadidos en bajas proporciones, poseen las siguientes propiedades: Buena resistencia al calor, envejecimiento, baja viscosidad, incremento de resistencia de Marshall 2 a 2.5 veces a 25°C, buena flexibilidad a baja temperatura.
- ✓ **PVC.** Este polímero conocido científicamente como policloruro de vinilo tiene baja compatibilidad con el asfalto, no es resistente al calor y se descompone por la acción de la luz solar. Resiste muy bien al agua y/o

agentes químicos; es por esto que no es utilizado para la modificación de asfalto.

- ✓ EVA. Los polímeros o resinas Etilo-Vinil-Acetato son relativamente nuevos en la modificación de asfaltos, son muy compatibles con estos. La relación acetato de vinilo etileno es muy importante, pudiéndose variar el contenido de acetato de vinilo de algún % hasta 50% o incluso más. Cuando los contenidos de acetato de vinilo son bajos las propiedades se asemejan a las de los asfaltos mencionados anteriormente. Un polímero EVA con un contenido del 18% de acetato de vinilo es el más adecuado para ser usado en la construcción de carreteras. Cuando se aumenta la concentración de acetato de vinilo en el polímero (15 a 30%), adquiere un excelente poder adherente.

2.5 ASFALTOS MODIFICADOS

2.5.1 Definición de asfalto modificado

Los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido. Esto se hace con el fin de modificar sus propiedades físicas y reológicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos.

2.5.2 Principales modificadores utilizados en el asfalto

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

2.5.2.1 Polímero Tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo tribloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno- Butadieno- Estireno (SBS) o Estireno-

Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.5.2.2 Polímero Tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.5.2.3 Polímero Tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.5.2.4 Hule molido de neumáticos

Es un modificador de asfaltos que mejoran la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

2.5.3 ¿Por qué se modifican los asfaltos?

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y figuraciones dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo estos problemas son causados además por la selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

2.5.4 Estructura de los Asfaltos Modificados.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad – temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

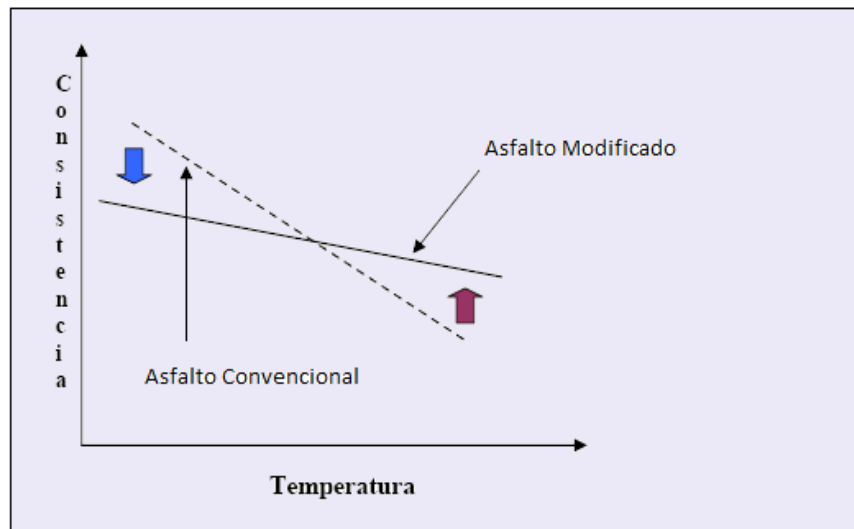


FIGURA 2.8 - Comportamiento asfalto convencional vrs. Asfalto modificado

Fuente: Introducción a la Reología de los Asfaltos Modificados. Conferencia dictada por: Ing. German Garzon Costa Rica, 2004

2.5.5 Cambio de Propiedades en el ligante asfáltico.

El objetivo perseguido con las adiciones de polímero en el asfalto, es cambiar las propiedades físicas y reológicas del ligante, buscando:

- ✓ Aumenta la viscosidad, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero.
- ✓ Disminuye la penetración.
- ✓ Aumenta el punto de reblandecimiento del asfalto entre 8 y 12 grados.
- ✓ Aumenta el punto de inflamación.
- ✓ Disminuye la susceptibilidad a las variaciones de temperatura.
- ✓ Sube entre uno y dos grados la clasificación PG (Penetración Grade ó Grado de Penetración) del asfalto.
- ✓ Eleva la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%.
- ✓ Eleva la resiliencia por encima de 25.
- ✓ Amplio rango de temperatura en el manejo y almacenamiento.
- ✓ Mayor intervalo de plasticidad.
- ✓ Mayor cohesión.
- ✓ Mayor resistencia a la acción del agua.
- ✓ Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores:

- ✓ Tipo y composición del polímero incorporado.
- ✓ Características y estructura coloidal del asfalto base.
- ✓ Proporción relativa del asfalto base.

2.5.6 Especificaciones de asfaltos modificados

Al igual que para los cementos asfálticos sin modificar, esta normativa se encuentra en el libro “Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes”, año 2001 en la sección 411 (Asfaltos modificados), es regulada por la Dirección General de Caminos, están basadas en normas AASHTO y ASTM.

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Viscosidad cinemática a 135°C	T - 201	D - 2170
Viscosidad dinámica a 60°C	T - 202	D - 2171
Penetración	T - 49	D - 5
Recuperación Elástica por Torsión	*****	*****
Prueba de Película Delgada en Horno	T - 179	D - 1754
Recuperación Elástica por Ductilometro	*****	D - 6084
Re silencia a 25°C	*****	D - 3407
Gravedad Específica	T - 228	D - 70
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695

TABLA 2.7 - Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos modificados

Fuente: Especificaciones Generales para construcción de Carreteras y Puentes

2.6 DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

2.6.1 Definición de mezcla asfáltica.

Las mezclas asfálticas, es material que está formada por una combinación de agregados pétreos, ligante asfáltico, y aditivo en algunos casos; de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas

aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento de la carpeta de rodadura y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.

2.6.2 Clasificación de las mezclas asfálticas.

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

2.6.2.1 Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- ✓ Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
- ✓ Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- ✓ Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- ✓ Macadam asfáltico: Capa de rodadura formada por una sucesión de capas de mezcla asfáltica con materiales pétreos de diferentes granulometrías, colocando las de mayor granulometría abajo, y arriba la de menor granulometría. Luego se procede a la compactación con rodos y camiones.

2.6.2.2 Por la Temperatura de puesta en obra.

- ✓ *Mezclas asfálticas en Caliente*: El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C.
- ✓ *Mezclas asfálticas en Frío*: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

- ✓ *Mezclas asfálticas Tibias:* Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

2.6.2.3 Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

- ✓ *Mezclas Cerradas o Densas:* contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto.
- ✓ *Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:* La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- ✓ *Mezclas Abiertas:* La proporción de vacíos supera el 12 %.
- ✓ *Mezclas Porosas o Drenantes:* Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre si. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.6.2.4 Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- ✓ *Mezclas Gruesas:* Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- ✓ *Mezclas Finas:* También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el

que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

2.6.2.5 Por la Estructura del agregado pétreo.

- ✓ *Mezclas con Esqueleto mineral:* Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- ✓ *Mezclas sin Esqueleto mineral:* No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.6.2.6 Por la Granulometría.

- ✓ *Mezclas Continuas:* Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- ✓ *Mezclas Discontinuas:* Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.6.3 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.

A continuación se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

- ✓ *The Hubbard-Field (1920's).* Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

- ✓ *Método Marshall (1930's)*. Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.
- ✓ *Método Hveem (1930's)*. Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.
- ✓ *Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984)*. Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia al ahuellamiento (efectos de deformación acumulada).
- ✓ *Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987)*. La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.
- ✓ *Método SUPERPAVE (1993)*. El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla

asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

2.6.4 Propiedades de las mezclas asfálticas

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes: Estabilidad, Durabilidad, Flexibilidad, Resistencia a la Fatiga, Resistencia al Deslizamiento, Impermeabilidad y Trabajabilidad.

2.6.4.1 Estabilidad

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja son:

- ✓ *Ahuellamiento*: consiste en una depresión continua a lo largo de la capa de rodadura. Las cargas repetitivas de tránsito conducen a deformar permanentemente cualquier capa que componen la estructura del pavimento, sin embargo cuando la carpeta asfáltica recién colocada presenta ahuellamiento es debido al exceso de asfalto en la mezcla.
- ✓ *Corrimiento*: desplazamiento de la mezcla asfáltica provocando distorsiones en la superficie de la carpeta asfáltica.
- ✓ *Exudación del asfalto*: es el afloramiento del asfalto o ligante asfáltico hacia la superficie de la carpeta asfáltica.

2.6.4.2 Durabilidad

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc.

2.6.4.3 Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja.

2.6.4.4 Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la sub-rasante, influyen determinadamente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica.

2.6.4.5 Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidroplaneo.

Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

2.6.4.6 Impermeabilidad

Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

2.6.4.7 Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

2.7 Características de la mezcla Método Marshall

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las *proporciones volumétricas* del asfalto y de los componentes del agregado; o más simplemente, *parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica*.

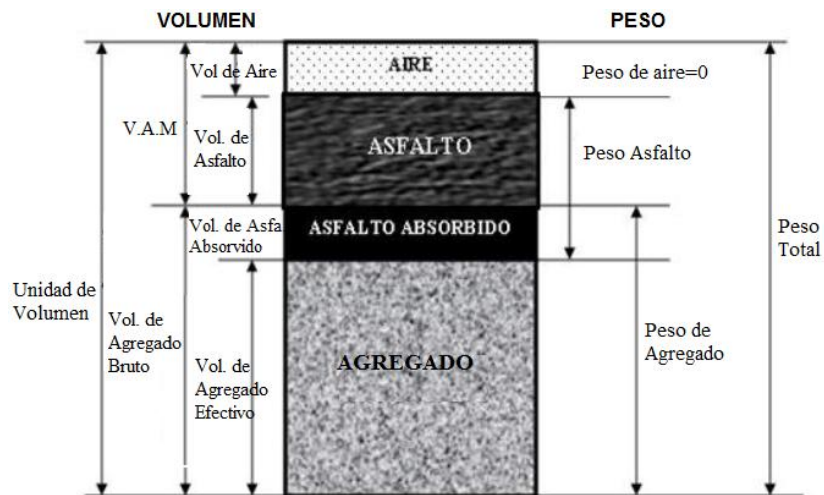


FIGURA 2.9 - Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.

Fuente: Strategic Highway Research Program SHRP A-369, 1994.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire (VTM); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) y de la densidad o gravedad específica bulk (G_{mb}) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

2.7.1 Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura mas durable.

2.7.2 Vacíos de aire (V.T.M.)

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que

estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

2.7.3 Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica,

obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca

2.7.4 Vacíos Llenos de Asfalto VFA

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

2.7.5 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca.

2.8 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios, pero esencialmente depende de escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los

critérios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo(0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver tabla siguiente					
% VFA	70	80	65	78	65	75

NOTA.

¹Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38°C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas más bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito Liviano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño < 104. Mediano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106 Pesado Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el transito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

⁶ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

TABLA 2.8 - Criterios del Instituto del Asfalto para el Diseño Marshall

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	pulg	3	4	5
11,8	No. 16	21,5	22,5	23,5
23,6	No. 8	19,0	20,0	21,0
47,5	No. 4	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	½	13,0	14,0	15,0
19,0	¾	12,0	13,0	14,0
25,0	1	11,0	12,0	13,0
37,5	1,5	10,0	11,0	12,0
50,0	2	9,5	10,5	11,5
63,0	2,5	9,0	10,0	11,0

Nota.

¹ Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

TABLA 2.9 - Porcentaje Mínimo de VMA

Fuente: Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

CAPITULO III

EL SUPERPAVE EN MEZCLAS ASFALTICAS

3.1 Introducción

Con un presupuesto que alcanzó los 150 millones de dólares (fondos provenientes de Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa), se desarrolló entre Octubre de 1987 y Marzo de 1993 el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, más conocido por sus siglas en inglés SHRP (Strategic Highway Research Program). El resultado final de estas investigaciones es un nuevo sistema para la especificación de materiales asfálticos: el método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements).

El sistema SUPERPAVE entrega:

- ✓ Nuevas especificaciones para asfaltos.
- ✓ Nuevas especificaciones para agregados.
- ✓ Nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas.
- ✓ Nuevos modelos de predicción del comportamiento.

Enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente, el primer paso del análisis SUPERPAVE involucra la selección cuidadosa de los materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos.

3.2 Niveles de diseño SUPERPAVE.

El método SUPERPAVE está compuesto por tres niveles. Debido a que el análisis y el diseño de una mezcla en el sistema SUPERPAVE son complejos, la extensión del uso de esta metodología (según los investigadores del SHRP) depende del nivel de tránsito y de la función de la mezcla en el pavimento. **La Tabla 3.1**, especifica los distintos niveles considerados para el análisis y diseño de las mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología SUPERPAVE.

Tránsito (ESAL)	Niveles de diseño	Requerimientos de ensayo
$ESAL \leq 10^6$	Primer nivel	Diseño volumétrico.
$10^6 < ESAL \leq 10^7$	Nivel intermedio	Diseño volumétrico y ensayos de predicción del comportamiento
$ESAL > 10^7$	Nivel completo	Diseño volumétrico y aumento de los ensayos de comportamiento adicionales

TABLA 3.1- Niveles de Análisis Método SUPERPAVE

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

3.2.1 Primer nivel

Este nivel requiere el diseño volumétrico, el cual involucra los siguientes aspectos:

- Selección del tipo de asfalto.
- Selección de las propiedades de los agregados.
- Preparación de especímenes de ensayo.
- Selección del contenido de asfalto.

Esta actividad se basa en la estimación de las propiedades volumétricas de la mezcla; contenido de vacíos de la mezcla (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

3.2.2 Nivel intermedio

Este nivel utiliza como punto inicial el análisis volumétrico del nivel anterior. Los ensayos establecidos para el nivel intermedio de análisis son:

- Ensayo de corte (SST, SUPERPAVE Shear Test).
- Ensayo de tensión indirecta (IDT, Indirect Tensile Test).

Utilizando equipos IDT y SST, son realizados varios ensayos para lograr de esta manera una serie de predicciones del comportamiento de la mezcla.

3.2.3 Nivel completo

Este nivel, incluye la totalidad de los pasos realizados en los niveles anteriores, pero se realizan pruebas adicionales IDT y SST, a una amplia gama de temperaturas. Un completo análisis de la mezcla utiliza especímenes confinados SST y ofrece un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la misma.

Utilizando la metodología SUPERPAVE, los resultados de los ensayos de comportamiento de las mezclas asfálticas, permiten estimar con gran precisión, el comportamiento del pavimento durante el transcurso de su vida útil, en términos de ejes equivalentes (ESALs). De la misma manera, permite estimar la cantidad de ejes equivalentes para alcanzar cierto nivel de resistencia al desplazamiento, a grietas por fatiga o a grietas por bajas temperaturas.

Cabe señalar que la investigación solo se limita al primer nivel referente al uso de la granulometría.

3.3 Requerimientos de la granulometría SUPERPAVE

La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados es debido al surgimiento de la metodología de diseño Superpave, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras. Durante el desarrollo del SHRP, expertos en pavimentos fueron consultados con el fin de determinar cuáles eran las propiedades más importantes del agregado. Hubo un acuerdo general con respecto a que las propiedades del agregado juegan un rol central en la deformación permanente.

3.3.1 Agregados minerales

Los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de los agregados minerales para mezclas asfálticas en caliente, los cuales forma parte del

programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de los pavimentos. Los investigadores de SHRP confiaron en la experiencia de esos expertos y en la suya propia para identificar dos categorías de propiedades de los agregados que se necesitan en el sistema de Superpave, si bien no se desarrolló ningún nuevo procedimiento para ensayar agregados, si se refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos al sistema, estas propiedades son: las propiedades de consenso y las propiedades de la fuente de origen; así como también una nueva forma de especificación granulométrica del agregado; esto se llama estructura del agregado de diseño.

3.3.2. Propiedades de Consenso

Las propiedades de consenso son consideradas críticas para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla asfáltica y se asocian a la calidad del agregado para producir una mezcla resistente y durable. Estas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso (Caras fracturadas).
- Partículas planas y alargadas.
- Contenido de arcilla.

3.3.2.1 Angularidad del Agregado Grueso

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm con una o más caras fracturadas (Norma ASTM D 5821 “Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso”).

Muchos Departamentos de Transporte de los E.E.U.U tienen protocolos para medir la angularidad del agregado grueso. Se considera una cara fracturada si el área proyectada es mayor o igual al 25% del área máxima proyectada y la cara es puntiaguda y margen bien definido. La determinación es subjetiva y es considerada buena.

3.3.2.2 Angularidad del Agregado Fino

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y provee resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados menores de 2.36 mm, levemente compactados (Norma ASTM C1252 “Métodos de prueba estándar para contenido de vacíos sin compactar de agregado fino (como la influencia de forma de la partícula, textura superficial, y clasificación)”). Contenidos de vacíos mayores, significan más caras fracturadas.

3.3.2.3 Partículas Planas y Alargadas.

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la norma ASTM D 4791 “Partículas alargadas y planas en agregados gruesos” y se aplica a agregados gruesos mayores de 4.75 mm.

3.3.2.4 Contenido de Arcilla.

El contenido de arcilla, es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor de 4.75 mm (norma AASHTO T 176 ó ASTM 2419 “Finos plásticos en agregados graduados y suelos usando el ensayo del equivalente de arena”).

Millones de ESALs(1)	Angularidad del agregado grueso Porcentaje mínimo		Angularidad del agregado fino Porcentaje mínimo		Equivalente de arena Porcentaje mínimo	Partículas planas y alargadas Porcentaje máximo(3)
	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm		
<0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3 < 3	75/-	50/-	40	40	45	10
3 < 10	85/80 ₍₂₎	60/-	45	40	45	10
10 < 30	95/90	80/75	45	40	45	10
>= 30	100/100	100/100	45	45	50	10

NOTA.

- (1) Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado en el carril de diseño para un periodo de de 20 años. Independientemente de la vida de diseño actual de la carretera, determine los ESAL's de diseño para 20 años y selecciona el nivel Ndis apropiado.
- (2) 85/80 indica que el 85% del agregado grueso tiene una o más caras fracturadas, y 80% tiene dos o más caras fracturadas.
- (3) Criterio basado en una relación máxima a mínima de 5:1

TABLA 3.2 - Requisitos de propiedades de consenso del agregado

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

3.3.3 Propiedades de la fuente de origen.

Además de las propiedades de consenso, los expertos pensaron que habría otras características críticas del agregado. No obstante, no pudieron acordar valores críticos para esas propiedades, pues dichos valores son específicos de cada fuente de origen. Consecuentemente, un grupo de "Propiedades de fuente de origen" fue recomendado. Valores específicos son establecidos por las características de la zona, aun cuando esas propiedades son relevantes durante el proceso de diseño de la mezcla, podrían también ser usadas como un control de aceptación de la fuente de origen. Estas propiedades son:

- Tenacidad
- Durabilidad
- Materiales deletéreos.

3.3.3.1 Tenacidad.

La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión Los Ángeles. La norma es AASHTO T 96 "Resistencia a la abrasión del agregado grueso de pequeño tamaño mediante el uso de la maquina Los Ángeles". Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Los valores de perdida máximos están aproximadamente entre 35 y 45%.

3.3.3.2 Durabilidad.

Es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio. La norma es la AASHTO T 104 "Ensayo de sanidad de agregados por sulfato de sodio". El ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para cinco ciclos.

3.3.3.3 Materiales deletéreos.

Los materiales deletéreos son definidos como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclados con los agregados. La norma es la AASHTO T 112, y puede aplicarse tanto a agregados finos como a gruesos. El ensayo se realiza tamizando el agregado por vía húmeda sobre tamices prescritos. El porcentaje en peso del material perdido como resultado del tamizado húmedo, se informa como el porcentaje de la masa de arcilla y partículas friables.

Hay evidentemente un amplio rango de máximos porcentajes permisibles de arcilla y partículas friables, dependiendo de la composición exacta del contaminante, el rango va de valores tan pequeños como 0.2% a tan altos como 10%.

3.4 Análisis de la granulometría SUPERPAVE.

A continuación se discutirán los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente.

3.4.1 Grafica elevada al exponente 0.45

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall, tomando en consideración recomendaciones de la FHWA. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la granulometría permitida (grafica de Fuller), mediante una técnica grafica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las

ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan en escala aritmética, las abscisas representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0.45.

3.4.2 Origen de la Gráfica de Fuller.

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o grafica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA), la ecuación de Fuller se describe a continuación:

$$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}} \right)^n$$

P_i= acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula D_i

D_i= diámetro de la partícula

D máx.= tamaño máximo de material

n= valor asociado a la forma de la curva 0,45

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo (D_{max}). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0.45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta. Lo que hay que resaltar aquí es que solo las curvas con n igual o cercana a 0.45 producen la máxima densificación; aunque esto se ha desvirtuado en la actualidad.

3.4.3 Importancia de la Gráfica de Fuller.

La importancia de usar la grafica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números (n_i/D_i). el primer número está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, mientras el otro se refiere al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones

granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales, pues aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo que afecta principalmente al contratista.

Una combinación de agregados es un todo, de esto pueden dar fe los manejadores de plantas trituradoras y cribadoras que cuando intentan modificar el porcentaje que pasa de un tamaño, los otros se alteran irremediablemente.

Se observa que hay una influencia igualitaria de D_{max} y n en la trabajabilidad. En el ámbito de las graduaciones de Superpave, la facilidad de manejo y colocación aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tamaños máximos más pequeños y estructuras más densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tamaño máximo.

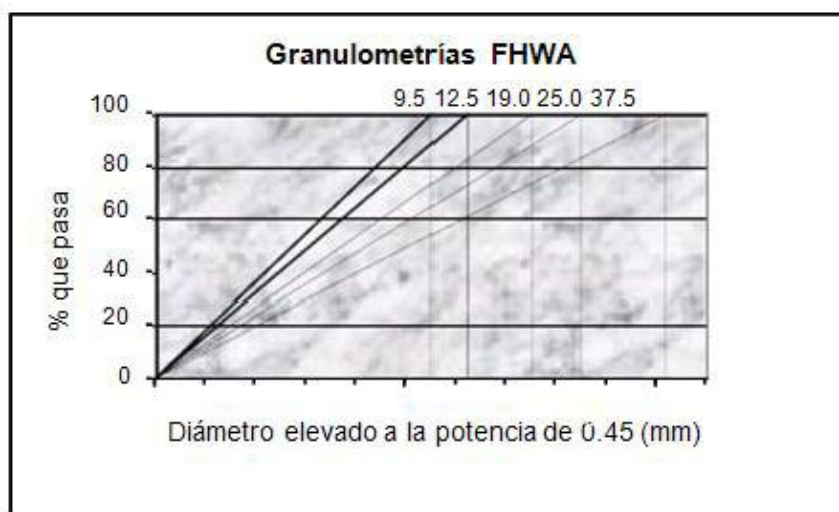


FIGURA 3.1 - Representación de granulometrías según la FHWA

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; la cual corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0%, 0 mm).

3.5 Granulometría SUPERPAVE.

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado un enfoque ya en uso en algunas agencias. Utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica para definir una granulometría permitida. Esta carta usa una técnica grafica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan, las abscisas en escala aritmética representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0.45.

La Figura 2.10, muestra como es la escala de las abscisas; en este ejemplo el tamiz de 4.75 mm es dibujado a 2.02 unidades a la derecha del origen de coordenadas ($4.75^{0.45} = 2.02$).

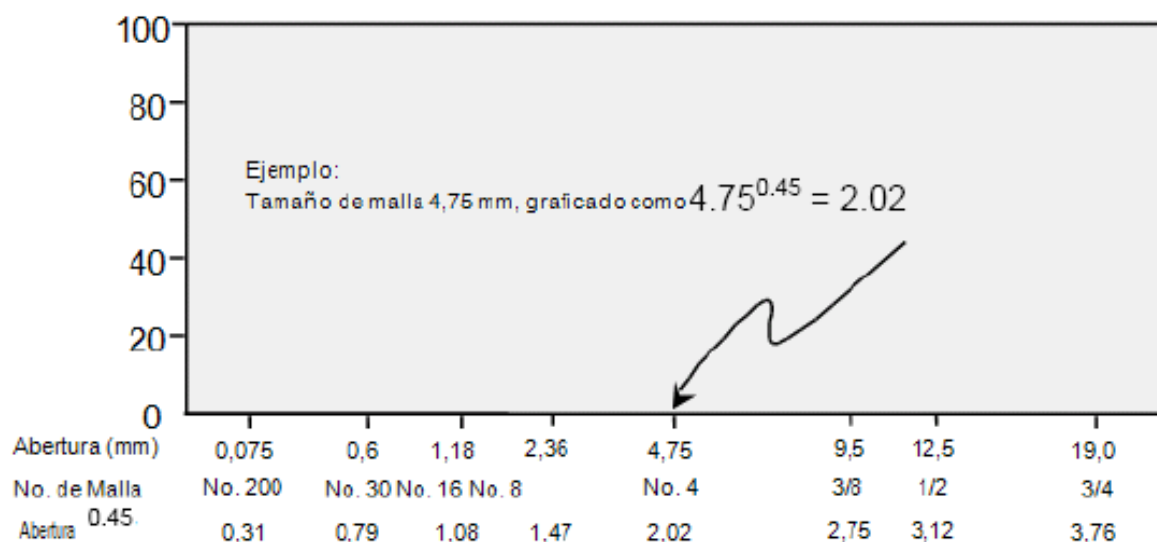


FIGURA 3.2 - Ilustración de cómo se grafican las abscisas

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

Superpave emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones con respecto al tamaño del agregado.

- **Tamaño máximo nominal:** Tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.
- **Tamaño máximo:** Tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

La granulometría de máxima densidad (Figura 2.11) representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre si conformando el arreglo volumétrico más compacto posible.

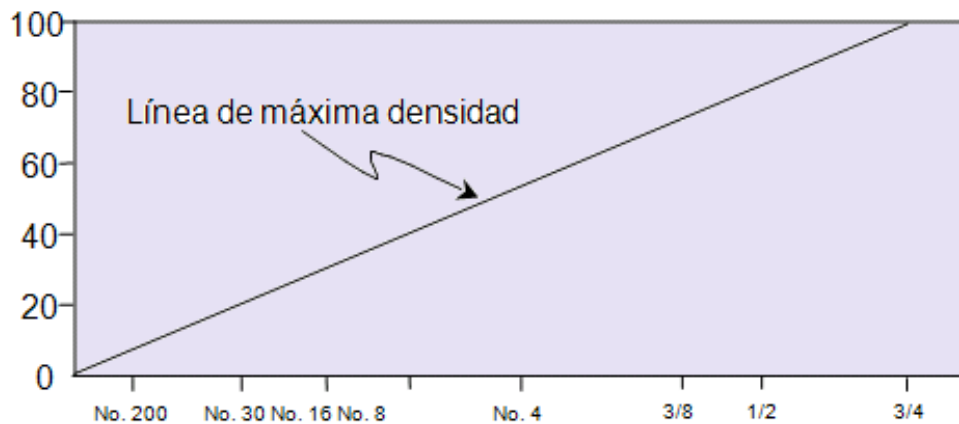


FIGURA 3.3 - Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm
Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

Evidentemente, esta granulometría debe evitarse, porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de un film de asfalto lo suficientemente grueso como para obtener una mezcla durable. La Figura 2.11 muestra la carta granulométrica elevada a la 0.45 con la graduación de máxima densidad para un tamaño máximo del agregado de 19 mm y 12.5 mm de tamaño máximo nominal.

Para especificar la granulometría del agregado, dos conceptos adicionales se emplean: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de polvo (0.075 mm).

		Tamaño máximo nominal 37.5 mm				Tamaño máximo nominal 25.0 mm				Tamaño máximo nominal 19.0 mm				Tamaño máximo nominal 12.5 mm				Tamaño máximo nominal 9.5 mm			
Tamiz mm	Tamiz Pg	Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida	
		mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
50	2"	100																			
37.5	1.5"	90	100			100															
25	1					90	100			100											
19	0,75									90	100			100							
12.5	0,5													90	100			100			
9.5	0,375																	90	100		
4.75	No. 4			34.7	34.7			39.5	39.5												
2.36	No. 8	15	41	23.3	27.3	19	45	26.8	30.8	23	49	34.6	34.6	28	58	39.1	39.1	32	67	47.2	47.2
1.18	No.16			15.5	21.5			18.1	24.1			22.3	28.3			25.6	31.6			31.6	37.6
0.6	No.30			11.7	15.7			13.6	17.6			16.7	20.7			19.1	23.1			23.5	27.5
0.3	No. 50			10	10			11.4	11.4			13.7	13.7			15.5	15.5			18.7	18.7
0.15	No. 100																				
0.075	No. 200	0	6			1	7			2	8			2	10			2	10		

TABLA 3.3 - Distintos tipos de requerimientos para granulometrías SUPERPAVE

Fuente: Superpave Gradation Requirements, www.pavementinteractive.com

3.5.1 Mecanismos de Control de la Granulometría.

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas de trabajo (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Tales especificaciones tienen una característica indeseable inherente. Las mezclas pueden estar diseñadas dentro de las especificaciones y sin embargo tener un desempeño pobre en servicio. Específicamente, estas mezclas tienen una estructura de agregado pobre y son susceptibles a la deformación permanente. De igual forma las mezclas pueden ser diseñadas demasiado densas, lo que reduce el contenido de asfalto y conduce a problemas de durabilidad.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplearon dos conceptos: los puntos de control y la zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Los puntos de control fueron seleccionados para cumplir objetivos específicos, los cuatro puntos de control superiores, mínimo 100% que pasa la malla de tamaño máximo, 90 a 100% pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90% máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal, se utilizan para verificar que se cumpla con la definición de tamaño máximo nominal y tamaño máximo.

Los cuatro puntos de control inferiores sirven para propósitos diferentes. Los requerimientos máximos y mínimos para la malla No. 200 (0.075 mm), son típicamente para mezclas asfálticas de granulometría cerrada. Otras mezclas como las SMA, las cuales tienen porcentajes que pasan la malla No. 200 de 10 a 14% no cumplen con esta especificación.

Los puntos de control para la malla No 8 (2,36 mm), son utilizados para controlar partículas con tamaño de arena en la mezcla. El punto superior limita la cantidad de arena en la mezcla con el fin de evitar mezclas asfálticas arenosas las cuales

generalmente no cumplen con las especificaciones. El punto inferior asegura una cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con los requerimientos de una granulometría densa.

La zona restringida ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tenderán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida

Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena.

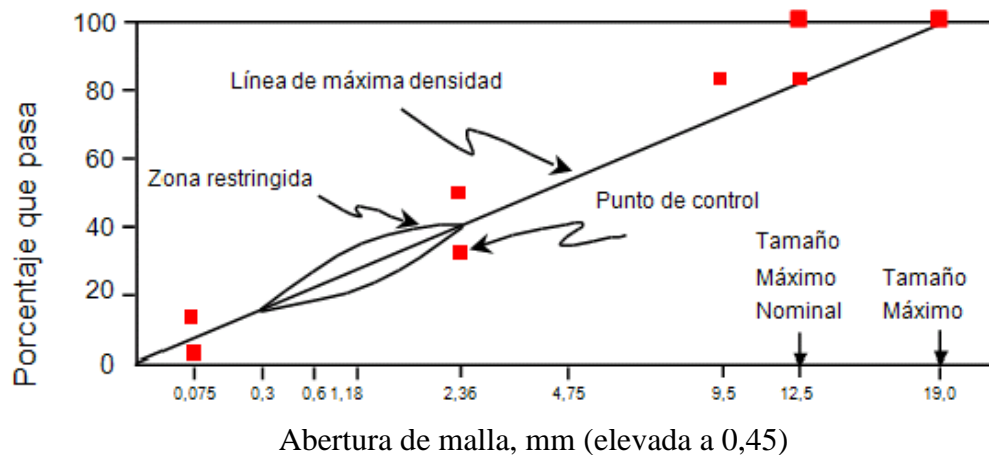


FIGURA 3.4 - Límites para las granulometrías SUPERPAVE

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, publicación N°299, Instituto mexicano del transporte

3.5.2 La Zona Restringida

El Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, resume el desarrollo de los aspectos de diseño volumétrico de Superpave bajo el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). Bajo este programa se reunió a un grupo de expertos en el área de producción de agregados y diseño y comportamiento de mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar ante ellos una serie de cuestionamientos consistente básicamente en siete características del agregado:

1. Límites de graduación
2. Caras fracturadas
3. Contenido de arenas naturales
4. Abrasión de L.A
5. Agregados redondeados
6. Materiales deletéreos
7. Equivalente de arena

La respuesta para determinar qué características deberían modificarse de esta serie fue basada únicamente en acuerdos y desacuerdos acerca de las modificaciones, sin una base científica.

Una vez acordadas las características a modificar, establecieron limitaciones en los límites de graduación. De esta manera se agregaron características adicionales como mínimo/máximo tamaños de agregados, puntos de control/zona restringida y puntos de control.

La mayoría de los expertos especificaron graduaciones arriba y abajo de la zona de restricción aunque la mitad de ellos recomendaron graduaciones debajo de la zona de restricción para altas condiciones de tráfico.

Como ya se dijo, la zona de restricción forma una banda a través de la cual fue recomendado no pasar graduaciones de agregados. La zona de restricción fue adoptada para reducir la incidencia de tender o estar propensa a roderas en las HMA. Aunque la zona restringida fue incluida por Superpave como una guía recomendada,

no como una especificación requerida, algunas agencias en EU la interpretaron como un requerimiento.

Según esto, la intención original de incluir una zona restringida, debido a que algunas graduaciones particularmente se ven afectadas por: 1) el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaños limitada y 2) la proporción admisible de la fracción fina (0.15 a 0.6 mm) del total de la arena (que pasa por 2.36 mm), fue la de ayudar a reducir la incidencia de tender o ser propenso a roderas en las HMA.

El proyecto “Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification”, de acuerdo con algunos expertos en EU, cumplir con el criterio de la zona de restricción, quizás no es deseable o necesario para producir mezclas que den buen comportamiento en términos de roderas.

Algunas agencias de carreteras de EU, pueden proveer ejemplos de graduaciones de agregados que pasan a través de la zona de restricción, sin embargo estas producen mezclas que presentan buen comportamiento. Por ejemplo si se tiene una mezcla de agregados con un valor alto de angularidad (p.e. valor alto de angularidad de agregado fino FAA), es probable que la mezcla no exhiba ninguna tendencia durante la construcción y sería resistente a las roderas bajo tráfico sin tener en cuenta si la graduación pasa a través de esta zona restringida. Algunos cuestionaron también la necesidad de la zona de restricción cuando las mezclas requieren propiedades volumétricas tales como el VAM y V_a especificados para los números de giros $N_{inicial}$, $N_{diseño}$ y $N_{máximo}$ en la compactación giratoria.

CAPÍTULO IV
APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EFECTOS DE LA
GRANULOMETRIA SUPERPAVE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS
CONVENCIONES Y CON POLÍMERO

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A continuación se presentan tres granulometrías escogidas para el desarrollo de los ensayos de laboratorio, se compactaran y se medirán según el método de dosificación Marshall con grado de compactación constante de 75 golpes. En cada granulometría se determinará y se evaluará las propiedades volumétricas, estabilidad, flujo y contenido óptimo de asfalto para un porcentaje de vacíos total de mezcla de 4% en mezcla asfáltica convencional. Con el contenido óptimo de asfalto encontrado de cada granulometría se dosifica y se compacta por el Método Marshall mezcla asfáltica con polímero, para luego evaluar el efecto granulométrico en el comportamiento del empaquetamiento de las partículas de las mezclas asfálticas.

La tabla 4.1 describe las tres granulometrías teóricas propuestas y utilizadas en el programa experimental.

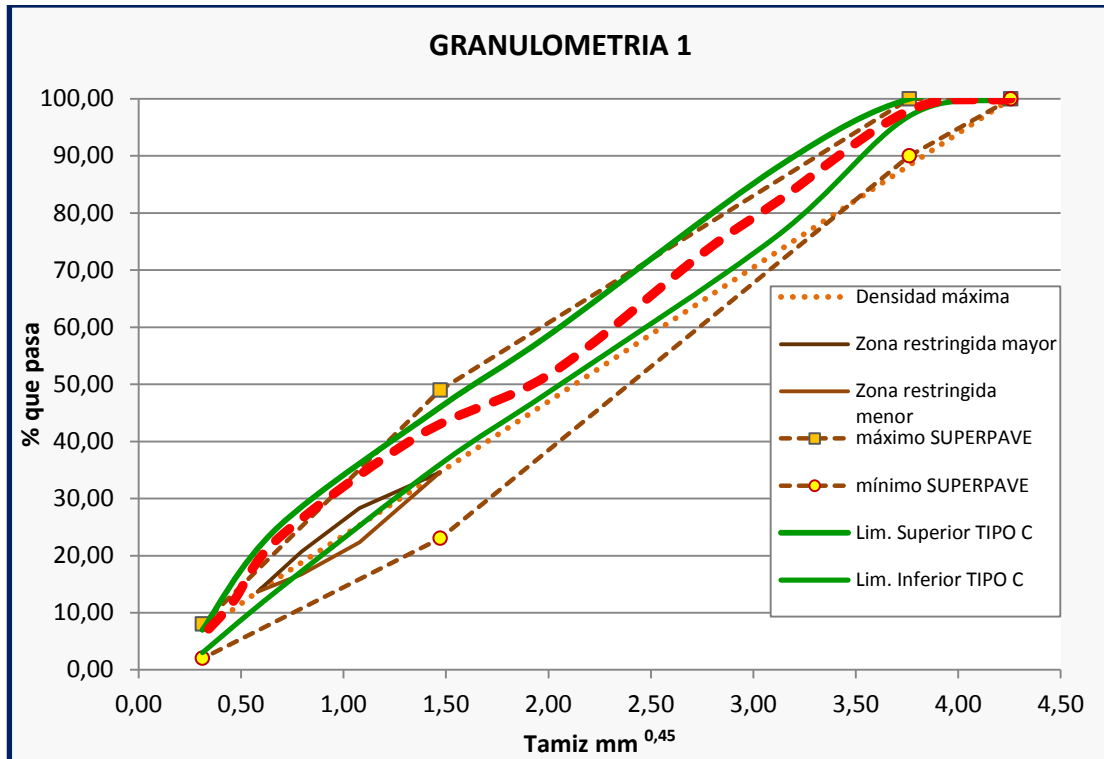
Tamices			Granulometrías (% que pasa)		
ASTM	mm	mm ^{0,45}	G1	G2	G3
1"	25	4,26	100	100	100
3/4"	19	3,76	98	97	88
1/2 "	12,5	3,12	82	82	73
3/8"	9,5	2,75	73	72	65
Nº4	4,75	2,02	52	50	47
Nº10	2	1,37	42	27	32
Nº40	0,425	0,68	24	12	16
Nº80	0,18	0,46	13	8	11
Nº200	0,075	0,31	6	5	7

TABLA 4.1 - Granulometrías para ensayos y porcentaje que pase cada tamiz

Fuente: Elaboración Propia

Granulometría 1

Cumple con la banda granulométrica TIPO C de Manual de Carretera del ABC, pero no cumple con la banda de requerimientos SUPERPAVE (Zona restrictiva, puntos de control y línea de máxima densidad).



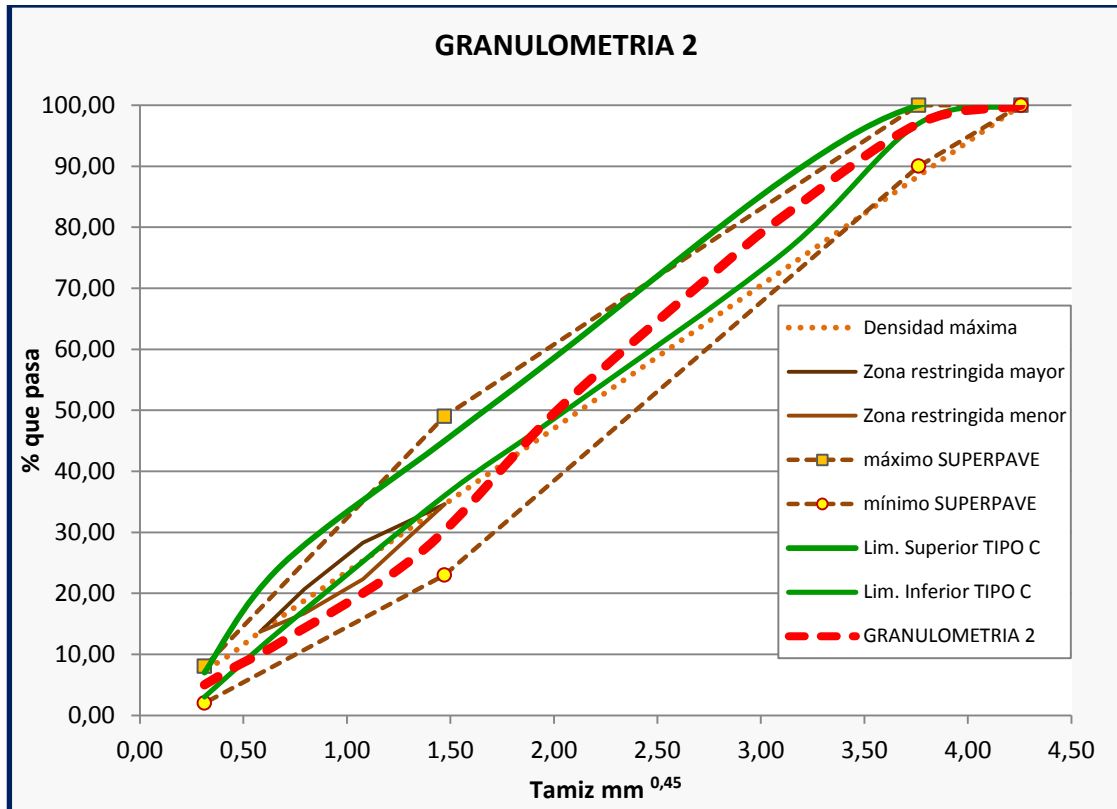
GRAFICA 4.1 - Granulometría experimental 1: Convencional

Fuente: Elaboración Propia

Esta granulometría del tipo densa (pasa por encima de la zona de restricción) que amplía el límite superior de requerimientos con respecto a SUPERPAVE y buscará ensayar su comportamiento de las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas.

Granulometría 2

No cumple con la banda granulométrica TIPO C de Manual de Carretera del ABC, pero cumple con la banda de requerimientos SUPERPAVE (Zona restrictiva, puntos de control y línea de máxima densidad)



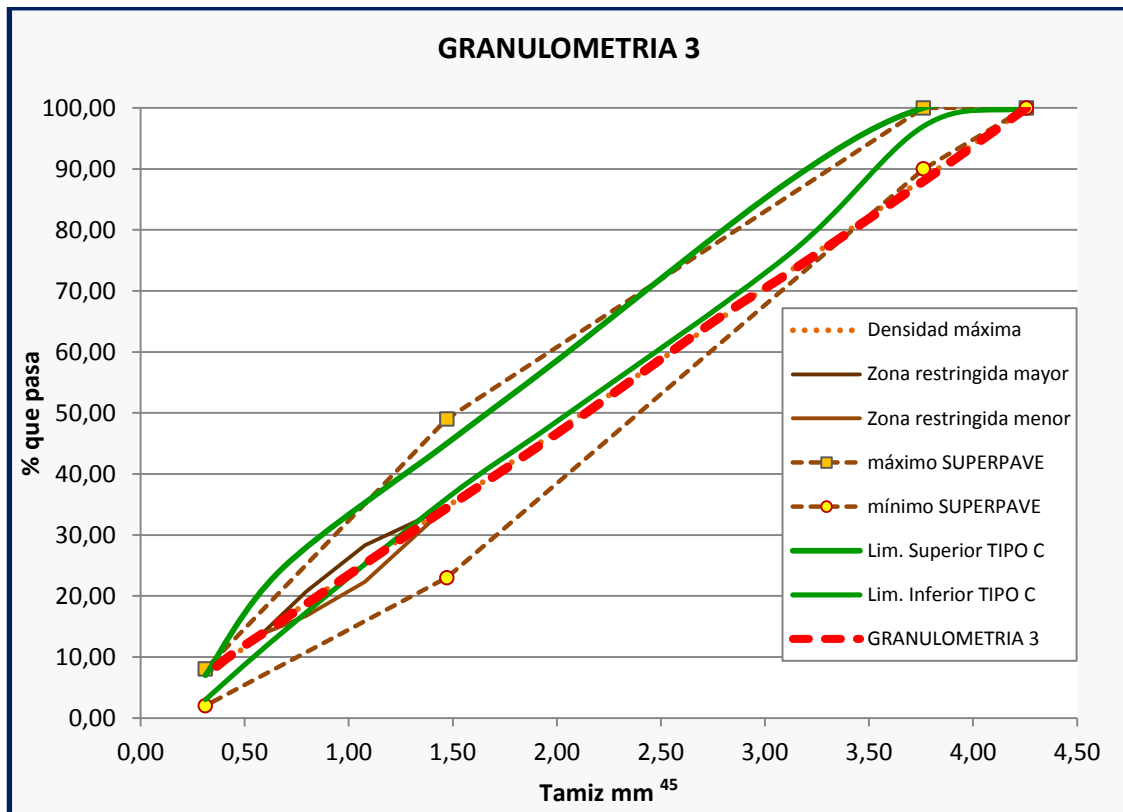
GRAFICA 4.2 - Grafica granulometría experimental 2: SUPERPAVE

Fuente: Elaboración Propia

Esta granulometría tiene la característica teóricamente ideal de la estructura granular SUPERPAVE por lo que su comportamiento será el punto de referencia para comparar las mezclas confeccionadas con las otras dos granulometrías.

Granulometría 3

No cumple con la banda granulométrica TIPO C de Manual de Carretera del ABC, y pasa por la densidad máxima de SUPERPAVE.



GRAFICA 4.3 - Grafica granulometría experimental 3: SUPERPAVE de máxima densidad

Fuente: Elaboración Propia

Se puede ver que la granulometría 3 prácticamente pasa por la línea de máxima densidad, lo que según la metodología SUPERAVE se debe evitar ya que produce teóricamente cantidad de vacío insuficientes para obtener un contenido de asfalto óptimo y no se pronostica un buen comportamiento de acuerdo a la conceptualización teórica, además está por debajo del límite de la gradación convencional.

4.2 Muestreo de materiales

4.2.1 Materiales pétreos

Los materiales pétreos que se utilizaron para la elaboración de la mezcla asfáltica provienen de bancos de materiales “San José Charaja”, ubicado en el valle concepción del departamento de Tarija, El afloramiento del material presenta la roca triturada seleccionada en tres fuentes de áridos, grava $\frac{3}{4}$ ”, gravilla de $\frac{3}{8}$ ” y polvo de roca de áridos.



FIGURA 4.1 - Banco de material “San José de Charaja”

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Materiales asfálticos

- ✓ El asfalto utilizado en la elaboración de probetas en la presente investigación para la mezcla asfáltica convencional, fue cemento asfáltico Ipiranga de Brasil C. A. 85 – 100.
- ✓ Para la elaboración de la mezcla modificada BETUFLEX o 60/85, un cemento asfalto modificado con polímeros elastoméricos de SBS de procedencia de asfalto STRATURA de Brasil.

4.3 Caracterización de materiales pétreos

4.3.1 Angularidad del agregado grueso ASTM D 5821

4.3.1.1 Objetivo

- ✓ Uno de los propósitos de esta estimación es maximizar la resistencia al corte mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas de agregado.
- ✓ Otro propósito es proveer estabilidad para tratamientos superficiales de agregados mediante el incremento de la fricción y textura del agregado utilizado en carpetas asfálticas delgadas.

4.3.1.2 Equipo y materiales

- ✓ Juego de Tamices
- ✓ Cuarteador mecánico
- ✓ Balanza de 5000 g de capacidad y aproximación de 1 gr.
- ✓ Espátula

4.3.1.3 Procedimiento

- ✓ Esparza la muestra en un área suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula. Si es necesario lave el agregado sucio. Esto facilitará la inspección y detección de las partículas fracturadas.
- ✓ Separe con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas.
- ✓ Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como "partícula fracturada". Una partícula se considerará como fracturada cuando un 25% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las producidas por procedimientos mecánicos.
- ✓ Pese las partículas fracturadas y anote este valor.



FIGURA 4.2 - Separando las partículas fracturadas y no fracturadas

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.4 Cálculo y resultados

- ✓ Anote el peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo, comprendidas entre los tamaños antes especificados.
- ✓ Anote el peso del material con caras fracturadas para cada tamaño.
- ✓ Finalmente calcule el porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño:

$$P(\%) = \frac{B}{A} * 100$$

A: Peso exacto de las muestras tomadas para el ensayo (g).

B: Peso del material con caras fracturadas para cada tamaño (g).

P: Porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño (%).

Procedencia del Agregado : "San Jose de charara"		Grava 3/4"	Grava 3/8"
Peso total de la muestra (g)	A	1000	1000
Peso total de caras fracturadas (g)	B	956,5	995,5
% de caras fracturas	P=B/Ax100	95,7	99,5

TABLA 4. 2 - Resultado de porcentaje de caras fracturadas grava 3/4" y grava 3/8"

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Partículas largas y achatadas ASTM D 4791

4.3.2.1 Objetivo

- ✓ Este método de prueba provee un medio para verificar el cumplimiento con las especificaciones que limitan tales partículas, o para determinar las características relativas a la forma del agregado grueso.
- ✓ Las partículas de agregado planas o alargadas, para algunos usos en construcción, pueden interferir con la consolidación y provocar dificultad para colocar los materiales.

4.3.2.2 Equipo y materiales

- ✓ Tamices $\frac{3}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ "
- ✓ Cuarteador mecánico
- ✓ Balanza de 5000 g de capacidad y aproximación de 1 gr.
- ✓ Recipientes

4.3.2.3 Procedimiento

- ✓ Separar por cuarteo una muestra representativa por cuarteo
- ✓ Tamizar por las mallas indicadas $\frac{3}{4}$ " para grava y $\frac{3}{8}$ " para gravilla y determinar el peso retenido con muestra representativa de 1000g.



FIGURA 4.3 - Cuarteo de muestra

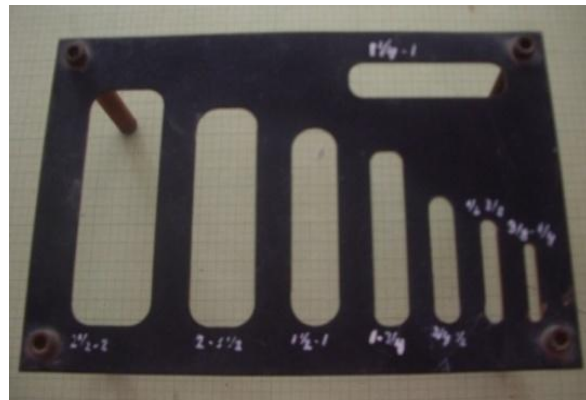


FIGURA 4.4 - Calibrador metálico

En la práctica muy pocos estados miden las partículas planas o alargadas por separado. La mayoría de los estados miden la relación de la mínima dimensión (espesor) a la máxima dimensión (largo) de la partícula de agregado para determinar el porcentaje de partículas planas o alargadas, usualmente se especifica un porcentaje máximo de relaciones 1:5. El ensayo se realizó de esta forma.

4.3.2.4 Cálculo y resultado

- ✓ Anote el peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo, comprendidas entre los tamaños antes especificados.
- ✓ Anote el peso del material de chatas y alargadas cada tamaño.
- ✓ Finalmente calcule el porcentaje de partículas chatas y alargadas

$$P(\%) = \frac{B}{A} * 100$$

A: Peso exacto de las muestras tomadas para el ensayo (g)

B: Peso del material de partículas chatas y alargadas(g).

P: Porcentaje de partículas chatas y alargadas(%).

Procedencia del Agregado "San Jose de charara"		Grava	Gravilla
Peso total retenido en ¾" [g]	A	1000	1000
Peso total de partículas chatas y alargadas [g]	B	4	0
Porcentaje de partículas chatas alargadas [%]	B/Ax100	0,4	0

TABLA 4.3 - Porcentaje de partículas chatas alargadas grava ¾ y grava 3/8"

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Determinación del valor Equivalente de arena de suelos y agregados finos

Norma ASTM D 2419

4.3.3.1 Objetivo

El equivalente de arena es una medida de la cantidad de contaminación de limo o arcilla en el agregado fino menor de 4.75 mm.

4.3.3.2 Equipo y materiales:

- ✓ Tubo irrigado, de acero inoxidable, cobre o bronce, de 6.35 mm de diámetro exterior, 508 mm de longitud, cuyo extremo inferior está cerrado en forma de cuña.
- ✓ Sistema de Sifón, se compone de un botellón de 3.8 lt de capacidad con un tapón. El tapón tiene dos orificios que lo atraviesan, uno para el tubo del sifón y el otro para entrada de aire. El conjunto deberá ubicarse a 90 cm por encima de la mesa.
- ✓ Probeta graduada. Con diámetro interior de 31.75 ± 0.381 mm y 431.8 mm de altura graduada hasta una altura de 381 mm, provista de un tapón de caucho o goma que ajuste en la boca del cilindro.
- ✓ Tubo flexible. De caucho o goma con 4.7 mm de diámetro, tiene una pinza que permite cortar el paso del líquido a través del mismo. Este tubo permite conectar el tubo irrigador con el sifón.
- ✓ Pisón de metal.
- ✓ Recipiente metálico.
- ✓ Cronómetro o reloj. Lecturas en minutos y segundos
- ✓ Embudo. De boca ancha para incorporar la muestra de ensayo en la probeta graduada.
- ✓ Tamiz N°4
- ✓ Recipiente para mezcla
- ✓ Horno. Capaz de mantener temperaturas de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

4.3.3.3 Procedimiento

- ✓ Llenamos la probeta hasta 10 cm con solución tipo (Cloruro de calcio, glicerina y agua destilada).
- ✓ Vertemos contenido de muestra de arena.
- ✓ Golpeamos parte inferior para desalojar burbujas y humedecer muestra.
- ✓ Dejamos reposar 10 minutos.

- ✓ Tapamos la probeta y agitar 90 ciclos (ida y vuelta 20 cm) durante 30 segundos.
- ✓ Lavamos el tapón y las paredes interiores de la probeta con disolución lavadora.
- ✓ Introducimos tubo irrigador al fondo de la muestra y ascendemos poco a poco (permite el ascenso del material fino atrapado).
- ✓ Dejar reposar durante 20 minutos.
- ✓ Hacemos lecturas h1 y h2 para las dos muestras.



FIGURA 4.5 - Probeta para equivalente de arena con muestra y accesorios

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.4 Cálculo y resultado:

Calcule el equivalente de arena con aproximación a 0.1% como sigue:

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

Procedencia del Agregado arena:	
San Jose de charara	
Lectura de arena	7,3
Lectura de arcilla	12,8
Porcentaje de arena [%]	57,03

TABLA 4.4 - Resultado de Porcentaje de arena

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Abrasión por medio de la Máquina de los Ángeles ASTM C131

4.3.4.1 Objetivo

- ✓ Este método abarca el procedimiento de ensayo para determinar el porcentaje de desgaste de piedra y grava triturada y agregado grueso natural (grava no triturada) por medio de a máquina de los ángeles.

4.3.4.2 Equipo

- ✓ Máquina de desgaste de los Ángeles que consiste de un cilindro o tambor hueco de acero, cerrado en ambos extremos. Este cilindro tiene las siguientes dimensiones interiores: 70cm. (28") de diámetro y 50cm (20") de largo. El tambor además tiene una puerta lateral pequeña por donde se introduce la muestra. El tambor debe ser montado en forma adecuada y acoplada a un motor de 1 HP de potencia aproximadamente, en forma tal que el número de revoluciones del tambor sea de 30 a 33 por minuto.
- ✓ Un juego de tamices de abertura cuadrada de la serie estándar de los siguientes tamaños: 3", 2 ½", 2", 1½", 3/4", 3/8" y números 4, 8 y 12.
- ✓ Horno de temperatura constante a 105 °C.
- ✓ Balanza de 5 kg de capacidad y sensible de 0,1 gr.

4.3.4.3 Procedimiento:

- ✓ La muestra de ensayo y la carga se colocara en la máquina de desgaste de los Ángeles y se pondrá en funcionamiento la maquina a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto. Para la gradaciones A, B, C la maquina se hará girar 500 revoluciones, para las gradaciones E, F y G se hará girar durante 1000 revoluciones. Al final del ensayo el material será descargado de la máquina y se hará una separación preliminar en un tamiz más grueso que el N° 12; la porción más fina se tamizara luego sobre el tamiz N° 12.

- ✓ El material que quede retenido en el tamiz N° 12 deberá lavarse, secarse hasta peso constante en un horno de 105 a 110 °C y pesarse con una aproximación al gramo.

La carga de desgaste que debe llevar la máquina de los Ángeles consistirá de bolas o esferas de acero de 1 7/8" de diámetro y cuyo peso puede variar entre 390 y 445 gr. El número de bolas de acero que se usara depende de la gradación de la muestra de ensayo y será como sigue:

Tamaño de Partículas (mm)	E	F	G	A	B	C	D
	(80-40)	(50-25)	(40-20)	(40-10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
	Tamaño de las fracciones (g)						
75 - 63	2.500 ± 50						
63- 50	2.500 ± 50						
50 -37,5	5.000 ± 50	5.000 ± 25					
37,5 - 25		5.000 ± 50	5.000 ± 25	1.250 ± 10			
25 - 19			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
19 - 12,5				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12,5 - 9,5				1.250 ± 25	2.500 ± 10		
9,5 - 6,3						2.500 ± 10	
6,3 - 4,75						2.500 ± 10	
4,75 - 2,36							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
- numero	12			12	11	8	6
- masa (g)	5.00 ± 25			5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15
Numero de revoluciones	1.000			500			

TABLA 4.5 - Grados de ensayo (Definidos por tipos y sus rangos de tamaños, en mm)

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos



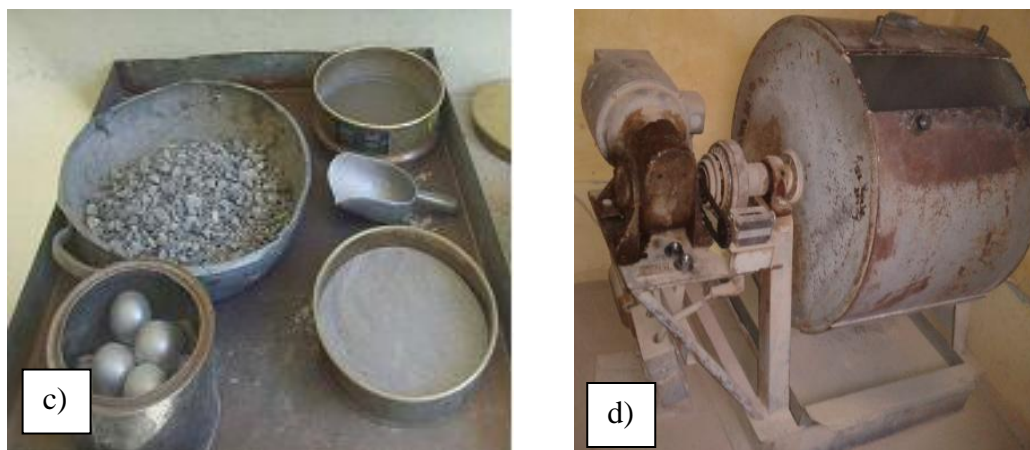


FIGURA 4.6 - a) Cuarteando, b) Tamizado, c) Esferas de acero, d) Equipo de los Ángeles

Fuente: elaboración propia

4.3.4.4 Cálculo y resultado

La diferencia entre el peso original (P) y el peso final (Pf) de la muestra de ensayo será expresado como un porcentaje del peso original de la muestra de ensayo. Este valor será consignado como porcentaje de desgaste.

$$\text{Porcentaje de Desgaste} = \frac{P - P_f}{P} * 100 = \frac{\text{Diferencia}}{P} * 100$$

Procedencia del Agregado: "San Jose de charara"		
Gradación:	B	Esferas a 32,5 RPM
Carga abrasiva con:	11	500 Revoluciones
Pasa	Retenido	Cantidad
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3.854
Diferencia		1.146
Desgaste		22,92%

TABLA 4.6 - Resultados desgaste de los ángeles grava 3/4"

Fuente: Elaboración Propia

Procedencia del Agregado: "San Jose de charara"		
Gradación:	C	Esferas a 32,5 RPM
Carga abrasiva con:	8	500 Revoluciones
Pasa	Retenido	Cantidad
3/8	1/4	2500
1/4	N° 4	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3846
Diferencia		1154
Desgaste		23,08 %

TABLA 4.7- Resultados desgaste de los ángeles grava 3/8"

Fuente: Elaboración Propia

4.3.5 Ensayo de Durabilidad ASTM C68

4.3.5.1 Objetivo

El método describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados por la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. El ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento.

4.3.5.2 Equipo y materiales

- ✓ Tamices Para ensayar agregado grueso 3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/2", 2" y 2 1/2"
Para ensayar agregado fino N° 50, N° 30, N° 16, N° 8 y N° 4
- ✓ Recipientes. Cestas de mallas metálicas que permiten sumergir las muestras en la solución utilizada, facilitando el flujo de la solución e impidiendo la salida de las partículas del agregado. El volumen de la solución en la cual se sumergen las muestras será, por lo menos, cinco veces el volumen de la muestra sumergida.
- ✓ Balanzas. Capacidad de 500 gr. y sensibilidad de 0.1 gr. para el caso del agregado fino y otro de capacidad no menor a 5000 gr. y sensibilidad de 1 gr. para el caso del agregado grueso
- ✓ Horno. Capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$

- ✓ Reactivos: Solución sulfato de sodio, disuelva 350 gr de sulfato de sodio anhídrido por litro de agua a una temperatura mayor a 25°C y menor a 0°C. Revuelva completamente durante la adicción de la sal y a intervalos regulares hasta su uso.

4.3.5.3 Procedimiento

- ✓ Se sumergen las muestras en la solución preparada de 16 a 18 h, de tal manera que cubra el agregado hasta una profundidad de ½”, evitando la evaporación y previniendo la adición accidental de sustancias ajenas por medio de una tapa sobre el contenedor. Las muestras sumergidas en la solución se mantienen a una temperatura de $21\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante el periodo de inmersión.
- ✓ Después del periodo de inmersión se retiran las muestras de agregado de la solución, se dejan escurrir 15 ± 5 minutos se secan al horno a una temperatura constante de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Se establece el tiempo requerido para alcanzar esa masa constante con el horno conteniendo la muestra de carga máxima esperada, verificando la pérdida de masa de las muestras retirándolas y pesándolas, sin enfriar, a intervalos de 2 a 4 h, con suficientes verificaciones se establece el tiempo de secado requerido. Se dejan enfriar las muestras y se repite el proceso alterno de inmersión y secado hasta que el número de ciclos requerido se obtenga.



FIGURA 4.7 - Muestra con reactivos de Sulfato de Sodio



FIGURA 4.8 - Muestra Secada en Horno

4.3.5.4 Cálculos resultados

Ya sin la solución y después de secar el agregado, se criba el agregado fino con la misma malla en la cual este fue retenido antes del ensayo y se criba el agregado grueso con las mallas de acuerdo al tamaño apropiado de partícula. Se pesa el material retenido en cada una de las mallas, la diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la fracción de la muestra es la pérdida en el ensayo y es expresada en porcentaje del peso inicial, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$Pn(\%) = \frac{A - B}{A} * C$$

Pn(%): Porcentaje ponderado de pérdida de cada fracción de muestra (%)

A: Masa inicial de la fracción (g)

B: Masa final de la fracción (g)

C: Porcentaje parcial retenido correspondiente a la fracción según el análisis granular (%)

Calculo de la desintegración del árido fino o grueso:

$$P(\%) = (P_1 + P_2 + \dots P_n)$$

P(%): Porcentaje de pérdida de la masa (%)

Granulometría			Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Pasa	Ret.		Ensayo(g)	Ensayo(g)	(g)	más fino	Tamiz	Muestra Total
			A	B	A-B	C	(A-B)/A	(A-B)/A*C
1	3/4"	98	0	0	0	4,9	0	0
3/4"	1/2"	93,1	350	331,6	18,4	58,4	5,26	3,07
1/2"	3/8"	34,7	350	325,1	24,9	28,4	7,11	2,02
3/8"	Nº 4	6,3	150	125,6	24,4	6,3	16,27	1,02
Porcentaje de pérdida de masa [%]								6,12

TABLA 4.8 - Resultado método sulfato de sodio de agregado grueso

Fuente: Elaboración Propia

Granulometría			Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Pasa	Ret.		Ensayo(g)	Ensayo(g)	(g)	más fino	Tamiz	Muestra Total
			A	B	A-B	C	(A-B)/A	(A-B)/A*C
Nº 4	Nº 8	16,5	300,0	191,6	108,4	10,3	36,1	3,7
Nº 8	Nº 16	6,2	150,0	107,2	42,8	0,0	28,5	0,0
Nº 16	Nº 40	6,2	150,0	98,6	51,4	0,0	34,3	0,0
Nº 40	Nº 50	6,2	150,0	52,4	97,6	6,2	65,1	4,0
Porcentaje de pérdida de masa [%]								7,8

TABLA 4.9 - Resultado método sulfato de sodio de agregado fino

Fuente: Elaboración Propia

4.3.6 Determinación gravedad específica y absorción de agua en áridos gruesos

4.3.6.1 Objetivo:

Determinar la gravedad específica y la absorción de agua en áridos gruesos. Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definiciones

Gravedad específica: de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C

La ecuación usada es:

$$Gravedad\ específica = \frac{Peso}{Volumen * Peso\ específico\ del\ agua}$$

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

$$Gravedad\ específica = \frac{Peso}{Volumen}$$

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

Gravedad Específica Seca Aparente (Gsa), incluye solamente el volumen de las partículas de agregado más los poros interiores que no han sido llenados con agua después de 24 horas de inmersión.

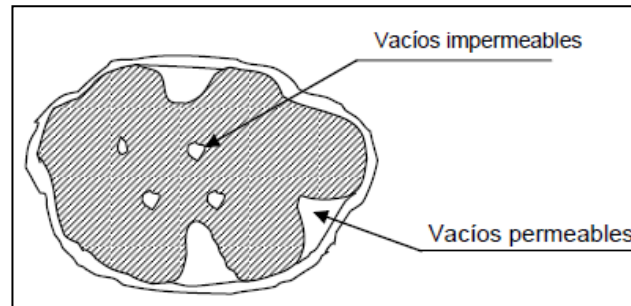


FIGURA 4.9 - Representación gráfica de los vacíos en los agregados

Fuente: Manual de Laboratorio ensayo para pavimentos -Peru

$$G.E. \text{ seca aparente } (Gsa) = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

Gravedad Específica Seca Bulk (Gsb), incluye volumen total de las partículas de agregados, así como el volumen de poros llenos con agua luego de 24 horas de inmersión.

$$\text{Gravedad específica seca Bulk } (Gsb) = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del agregado + vacíos permeables}}$$

$$G.E. \text{ seca Bulk } (Gsb) = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp}) \gamma_w}$$

Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk (Gsssb), define la relación entre el peso del agregado en su condición saturada superficialmente seca, que se obtiene secando las partículas con un paño luego de la inmersión, y el volumen del agregado más los vacíos permeables.

$$\text{Grav. Esp. saturada superficialmente Bulk} = \frac{\text{Peso del agregado saturado superficialmente seco}}{\text{Volumen del agregado + vacíos permeables}}$$

$$G.E.sss \text{ bulk } (G_{sssb}) = \frac{W_{sss}}{(V_s + V_{pp})\gamma_w}$$

4.3.6.2 Equipo y materiales:

- ✓ Balanza
- ✓ Horno
- ✓ Canastillo “Porta Muestra, de alambre de acero inoxidable lo suficientemente resistente para soportar el peso de la muestra, con malla de abertura igual o inferior que 2 mm. Además, debe estar provisto de un dispositivo que permita suspenderlo de la balanza.
- ✓ Recipientes

4.3.6.3 Procedimiento:

- ✓ Tamaño de la muestra a ensayar, es la cantidad mínima de muestra para el ensayo se determina según la tabla N°1, en función del tamaño máximo nominal del árido.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
mm	ASTM	kg
12.5 o menos	1/2"	2
19	3/4"	3
25	1"	4
37.5	1(1/2)"	5
50	2"	8
63	2(1/2)"	12

TABLA 4.10 - Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal

Fuente: ASTM127-01 “Volume04.02 Concrete and Aggregates”

- ✓ Más o menos 5 kg lavados y retenidos en la malla N°4 (4.75 mm), se secan a peso constante.
- ✓ La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua
- ✓ Los agregados se sacan del agua
- ✓ Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca

- ✓ La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el sumergido en agua
- ✓ La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante

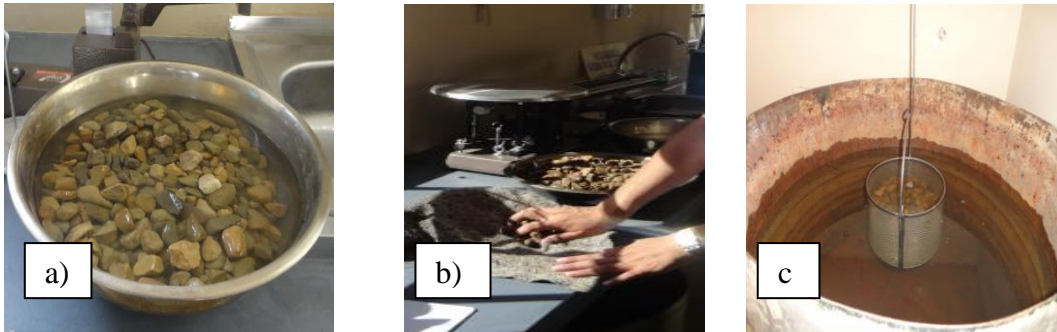


FIGURA 4.10 - a) Muestra saturada, b) Secando la Muestra, c) Peso de muestra en agua

Fuente: elaboración propia

4.3.6.4 Cálculos y resultados

$$\text{Gravedad específica seca aparente (Gsa)} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Gravedad específica seca Bulk (Gsb)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica saturada superficialmente seca (Gsssb)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Dónde:

A: masa en el aire del agregado seco al horno (g)

B: masa en el aire del agregado saturado superficialmente seco (g)

C: masa del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua (g)

Descripción del ensayo		Grava 3/4"	Gravilla 3/8"	
Masa Material Seco	[g.]	A	5246	3510
Masa Muestra Saturada de Superf. Seca	[g.]	B	5299	3559
Masa Muestra suspendida Agua	[g.]	C	3283	2198
Gravedad especifica aparente (Gsa)	[g./cm3]	$\frac{A}{A-C}$	2,607	2,596
Gravedad especifica seco bulk (Gsb)	[g./cm3]	$\frac{A}{B-C}$	2,632	2,626
Graved. Espe. Saturado perf. Seso (Gsss)	[g./cm3]	$\frac{B}{B-C}$	2,672	2,675
Absorción	[%]	$\frac{B-A}{A} * 100$	0,934	1,140

TABLA 4.11 - Resultado de gravedades específicas y absorción de agregado grueso

Fuente: Elaboración Propia

4.3.7 Gravedad Específica y absorción en Agregados Finos ASTM C-128

4.3.7.1 Objetivo

- ✓ El ensayo que a continuación se describe 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 fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

4.3.7.2 Equipo y material

- ✓ Balanza con capacidad de 1kg. y sensibilidad de 0,1 gr.
- ✓ Matraz de 500 ml de capacidad (se usa el mismo que se requiere para las pruebas de suelos).
- ✓ Molde cónico y una varilla.
- ✓ Muestra, Se selecciona una muestra de 1kg. Que puede ser obtenida por cuarteo, luego se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas.

4.3.7.3 Procedimiento:

- ✓ Se saca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme.

- ✓ Con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra, se coloca primero en el molde cónico y luego se retira este. Si la muestra tiene todavía alguna humedad en la superficie, conservara la forma cónica y si por el contrario la humedad de la superficie ha sido eliminada, la arena rodara libremente cuando se levante el cono.
- ✓ Por lo general si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto es indicación de que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por consiguiente, se deberá rociar con agua y dejarla reposar por 30 minutos antes de volver a colocar en el cono.
- ✓ Se coloca 100grs. De la muestra en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope, con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre si mismo y luego se coloca en un baño a temperatura constante de 20°C. Luego se obtiene el peso del matraz lleno.
- ✓ Se vacía el contenido del matraz en un recipiente y se pone a secar en el horno de temperatura constante (105°C) y se pesara.

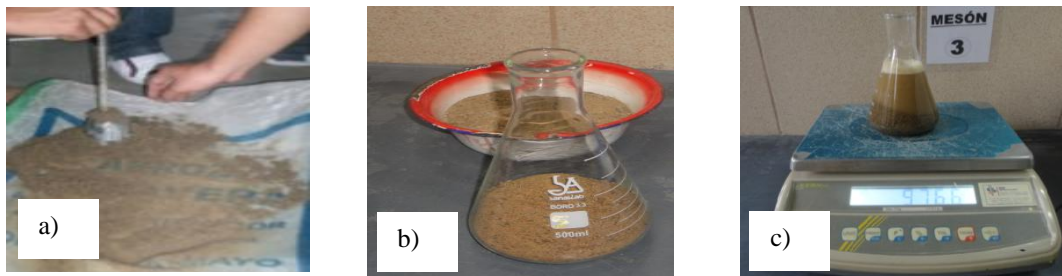


FIGURA 4.11 – a) Usando el molde cónico, b) Vaciando en el matraz, c) Pesando la muestra el agua y matraz

Fuente: elaboración propia

4.3.7.4 Cálculo y resultados

$$\text{Gravedad específica seca aparente } (Gsa) = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Gravedad específica seca Bulk } (Gsb) = \frac{A}{B + D - C}$$

$$\text{Gravedad específica saturada superficialmente seca (Gsssb)} = \frac{D}{B + D - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{D - A}{A} * 100$$

Dónde:

A: masa Muestra Seca al horno (g)

B: masa Agua (g)

C: masa Muestra + Agua (g)

D: masa Muestra Saturada de Superficie Seca (g)

Masa Frasco Seco Vacío	[g.]	x	156,9
Masa Frasco más Muestra	[g.]	y	295,9
Masa Muestra Saturada de Superficie Seca	[g.]	D=y-u	228,8
Masa Muestra Seca	[g.]	A	223,5
Peso Agua	[g.]	B	327,8
Peso Muestra + Agua	[g.]	C	466,8
Gravedad específica aparente (Gsa)	[g./cm ³]	A / (B+D-C)	2,489
Gravedad específica seco bulk (Gsb)	[g./cm ³]	D / (B+D-C)	2,548
Graved. Espe. Saturado perf. Seso (Gsss)	[g./cm ³]	A/(B+A-C)	2,645
% de Absorción	[%]	(D - A) / A *100	2,371

TABLA 4.12 - Resultado de gravedades específicas y absorción de agregado fino

Fuente: Elaboración Propia

4.3.8 Granulometría de agregados ASTM C136

4.3.8.1 Objetivo

Determinar la distribución de los tamaños de las partículas de agregado fino y grueso mayores a 0,075mm. Mediante un proceso de tamizado.

4.3.8.2 Equipos y materiales:

- ✓ Balanza eléctrica: De 0.01 gr. De precisión para muestras de hasta 200gr.
- ✓ Juego de Tamices: Con aberturas en cada tamiz según la siguiente tabla:

Agregado Grueso		Agregado Fino	
mm	ASTM	mm	ASTM
63 mm.	2 1/2"	*2.36 mm.	Nº 8
50 mm.	2"	*1.18 mm.	Nº 16
37.5 mm.	1 1/2"	*0.60 mm.	Nº 30
*25 mm.	1"	*0.30 mm.	Nº 50
*19 mm.	3/4"	*0.15 mm.	Nº 100
*12.5 mm.	1/2"	0.075 mm.	Nº 200
*9.5 mm.	3/8"		
*4.75 mm.	Nº 4		

TABLA 4.13 - Serie de Tamices (* Tamices utilizados en el ensayo)

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

4.3.8.3 Procedimiento

- ✓ Antes de realizar el ensayo se debe de eliminar todo tipo de impurezas (material orgánico) y toda partícula fina menor a a 0.075 mm. Para ello se procederá a lavar bien la muestra y secarla muy bien. (Se recomienda dejarlo secar 24 Hrs. a temperatura ambiente o secarlo en un horno.)
- ✓ Se realiza el cuarteo del material para determinar una cantidad de muestra apropiada según la siguiente tabla:

Tamaño máximo de las partículas	Tamiz Nº	Masa de muestra mínima
63 mm.	2 1/2"	35 kg.
50 mm.	2"	20 kg.
37.5 mm.	1 1/2"	15kg.
25 mm.	1"	10 kg.
19 mm.	3/4"	5 kg.
*12.5 mm.	1/2"	2kg.
**9.5 mm.	3/8"	1 kg.
4.75 mm. o menos	Nº 4	0.3 y/o 0.5 kg.

TABLA 4.14 - Cantidad mínima de muestra (* Utilizado)

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

- ✓ Se agita todo el juego de mallas, horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes de vez en cuando. El tiempo de agitado por lo general es de 15 minutos.

- ✓ Se quita la tapa y se separa los tamices, vaciando las fracciones de muestra que quedaron retenidos en cada uno de ellos, incluyendo en la base.

4.3.8.4 Cálculo y resultado

- ✓ Sume y registre todas las fracciones retenidas de todos los tamices, esta suma no debe diferir de la masa inicial registrada en mas de 3% para agregados finos y de 0.5 % para los áridos gruesos
- ✓ Si esta especificación no se cumple se rechaza el ensayo y se realiza otro con una muestra gemela.
- ✓ Calcular la masa retenida acumulada en cada tamiz.
- ✓ Calcule el porcentaje retenido en cada tamiz.
- ✓ Calcular el porcentaje que pasa cada tamiz haciendo la diferencia de 100 entre el % retenido de cada tamiz
- ✓ Graficar la curva granulométrica en un sistema de coordenadas ortogonales cuya abscisa en escala logarítmica indique las aberturas nominales de los tamices y en las ordenadas a escala lineal los valores.

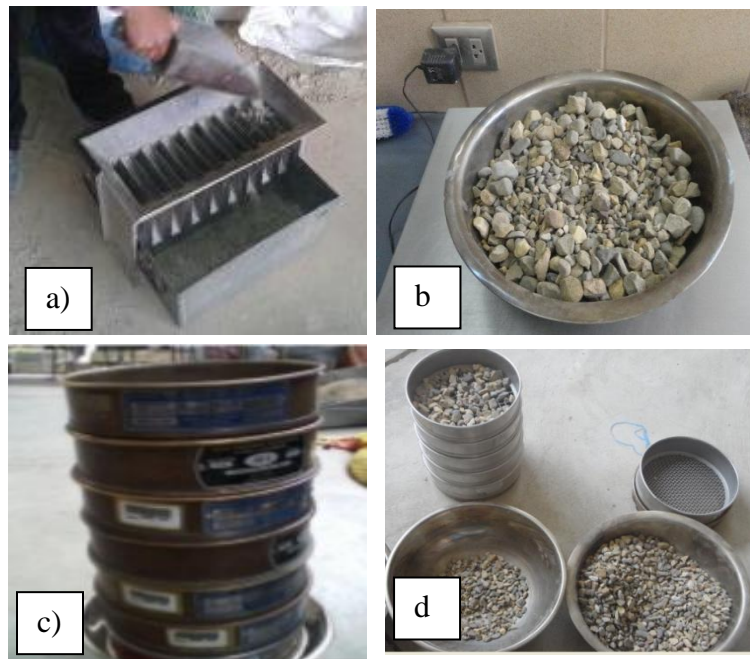
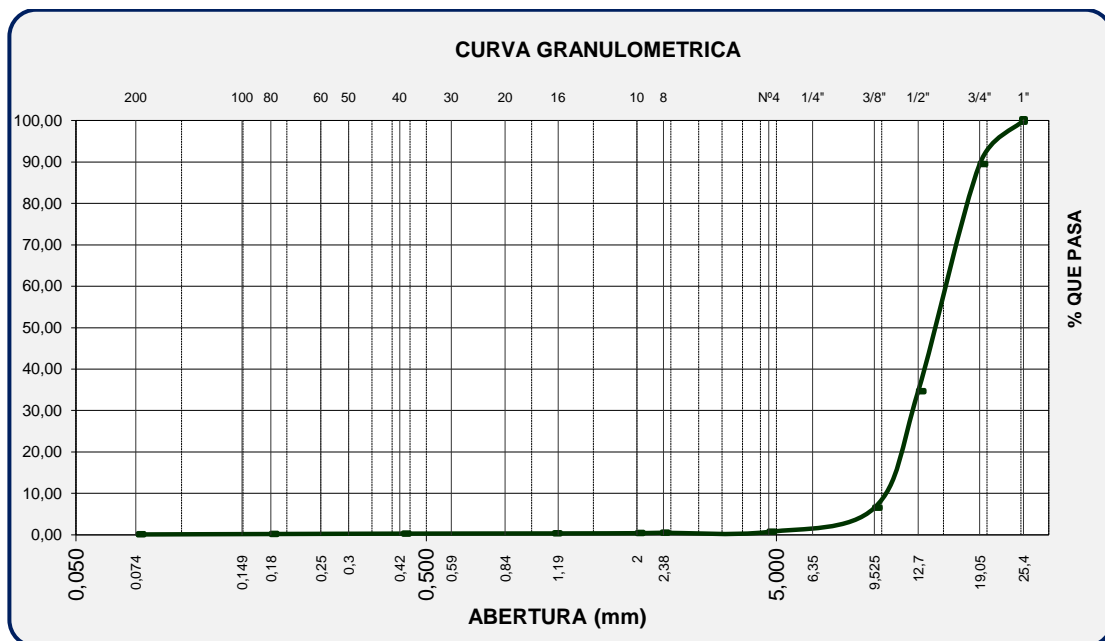


FIGURA 4.12 - a) Cuartear los agregados, b) Peso de la muestra, c) Juego de tamices, d) Material Tamizado

Procedencia del agregado: "San José de Charaja"					
Masa total 2500 g.					
Tamiz (No)	Abertura (mm)	Masa Retenido (g)	Masa Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Que Pasa
1"	25,40	0,0	0,00	0,0	100,00
3/4"	19,05	262,5	262,50	10,5	89,50
1/2 "	12,70	1372,5	1635,00	65,4	34,60
3/8"	9,53	702,5	2337,50	93,5	6,50
Nº4	4,75	145	2482,50	99,3	0,70
Nº8	2,36	5	2487,50	99,5	0,50
Nº10	2,00	2,5	2490,00	99,6	0,40
Nº16	1,16	1,5	2491,50	99,7	0,34
Nº40	0,43	1	2492,50	99,7	0,30
Nº80	0,18	2,5	2495,00	99,8	0,20
Nº200	0,075	2,5	2497,50	99,9	0,10
Pasa		2,5	2500,00	100,0	0,00

TABLA 4.15 - Resultado de granulometría de grava ¾"
Fuente: Elaboración propia

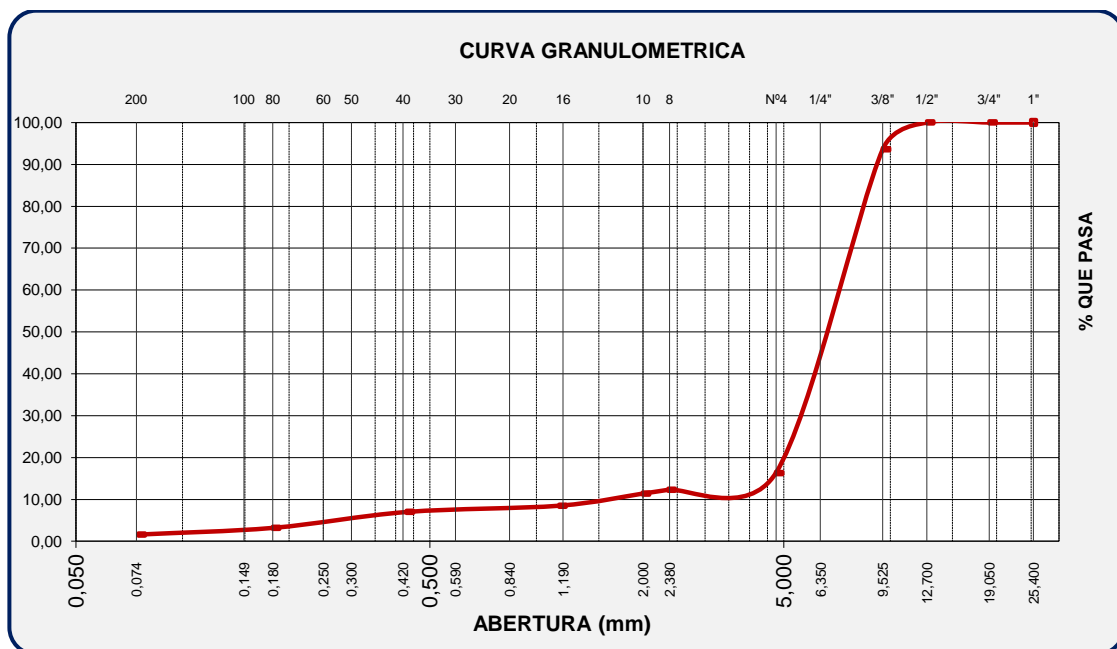


GRAFICA 4.4 - Análisis de granulometría de grava ¾"
Fuente: Elaboración propia

Procedencia del agregado: "San José de Charaja"					
Masa total 2500 g.					
Tamiz (No)	Abertura (mm)	Masa Retenido (g)	Masa Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Que Pasa
1"	25,40	0	0,00	0,0	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,0	100,00
1/2 "	12,70	0	0,00	0,0	100,00
3/8"	9,53	160	160,00	6,4	93,60
N°4	4,75	1932,5	2092,50	83,7	16,30
N°8	2,36	100	2192,50	87,7	12,30
N°10	2,00	22,5	2215,00	88,6	11,40
N°16	1,16	72,5	2287,50	91,5	8,50
N°40	0,43	37,5	2325,00	93,0	7,00
N°80	0,18	95	2420,00	96,8	3,20
N°200	0,075	40	2460,00	98,4	1,60
Pasa		40	2500,00	100,0	0,00

TABLA 4.16 - Resultado de granulometría de grava 3/8"

Fuente: Elaboración propia



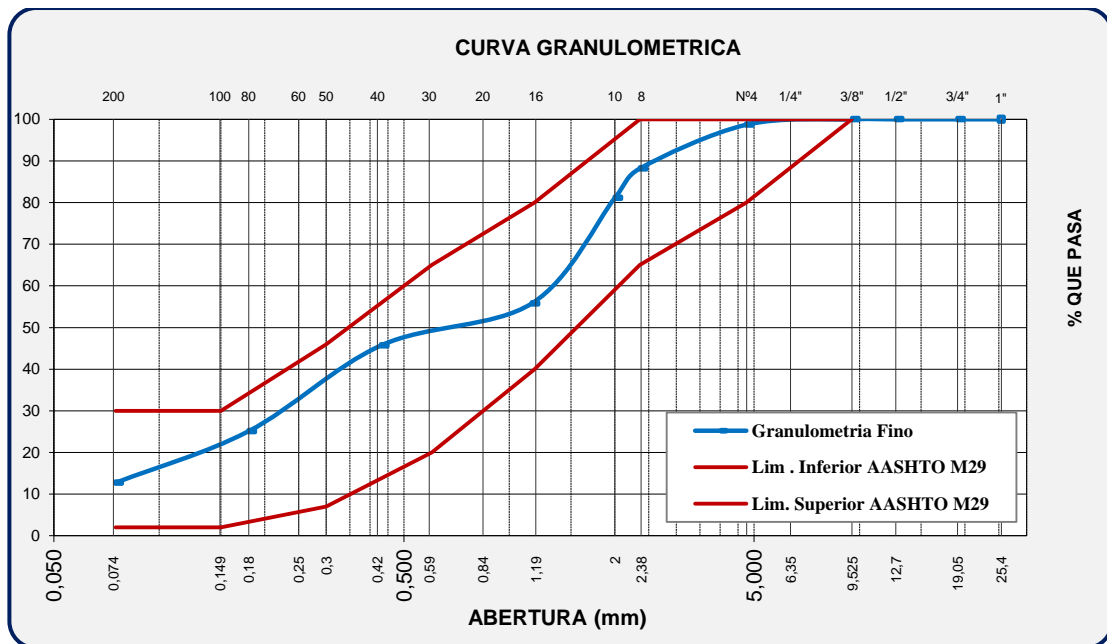
GRAFICA 4.5 - Análisis de granulometría de grava 3/8"

Fuente: Elaboración propia

Procedencia del agregado: "San José de Charaja"						Especificación ASSTHO M 29	
Masa total (g) :		2000				Lim Inferior	Lim. Superior
Tamiz (No)	Abertura (mm)	Masa Retenido (g)	Masa Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Que Pasa		
1"	25,40	0	0	0	100	100	100
3/4"	19,05	0	0	0	100	100	100
1/2 "	12,70	0	0	0	100	100	100
3/8"	9,53	0	0	0	100	100	100
Nº4	4,75	26	26,00	1,3	98,70	80	100
Nº8	2,36	210	236,00	11,8	88,20	70	100
Nº10	2,00	142	378,00	18,9	81,10	60	95
Nº16	1,16	506	884,00	44,2	55,80	40	80
Nº40	0,43	202	1086,00	54,3	45,70	12	55
Nº80	0,18	412	1498,00	74,9	25,10	5	34
Nº200	0,075	248	1746,00	87,3	12,70	2	30
Pasa		254	2000,00	100,0	0,00		

TABLA 4.17 - Resultado de granulometría de Arena

Fuente: Elaboración propia



GRAFICA 4.6 - Análisis de granulometría de arena

Fuente: Elaboración propia

4.3.9 Dosificación de agregados para la granulometría combinada

4.3.9.1 Objetivo

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es cómodo elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados.

4.3.9.2 Procedimiento

- ✓ Se busca una combinación de los tres agregados que se utilizarán: Grava 3/4", Grava 3/8" y Arena, para esto se ha utilizado el programa Excel de Windows mediante la elaboración de una tabla con fórmulas para que realice dichos cálculos de la cual se obtiene los porcentajes para cada uno de los agregados antes mencionados, y considerando que el Tamaño Máximo del agregado que se tiene es de 3/4".
- ✓ Se procede a asignar un porcentaje a cada agregado, la sumatoria de dichos porcentajes será el 100 por ciento de los agregados; por ejemplo:

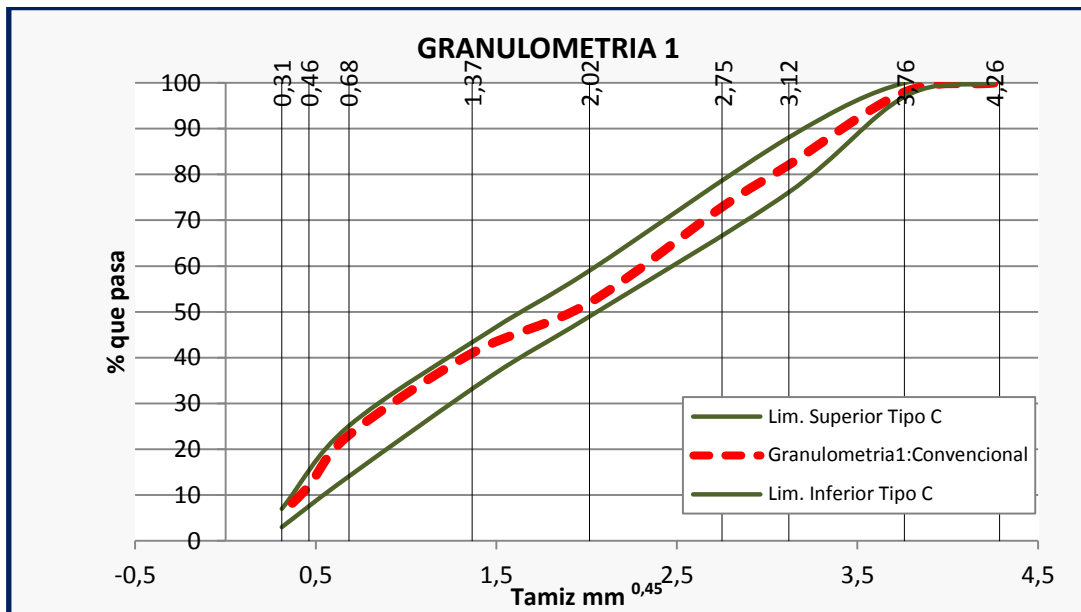
Agregado Grueso 3/4"	30 %
Agregado Medio 3/8"	30 %
Arena	40 %
	100 %
- ✓ El porcentaje de cada agregado es multiplicado por su respectiva granulometría luego se obtiene la suma de los tres porcentajes obteniendo así el valor para cada tamiz respectivamente, se verifica si está dentro de la especificación e igual a la granulometría proyectada.

Granulometría 1: se utiliza la especificación granulométrica del Manual de Carretera Administración Boliviana de Caminos ABC, que exige para ese tamaño es el Tipo C.

AGREGADOS			GRAVA 3/4		GRAVA 3/8		ARENA		Dosificación granulométrica	Especificación TIPO C	
TAMIZ %			A= 27%	B= 24%	C= 49%					Lim. Inferior	Lim. Super.
Num.	mm	(mm) 0,45	% Pasa	%Pasa *A	% Pasa	%Pasa *B	% Pasa	%Pasa *C	% Pasa		
1"	25,40	4,29	100,0	27,00	100,0	24,00	100,00	49,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,05	3,77	92,7	25,03	100,0	24,00	100,00	49,00	98,03	97,00	100,00
1/2 "	12,70	3,14	34,6	9,34	100,0	24,00	100,00	49,00	82,34	76,00	88,00
3/8"	9,53	2,76	6,5	1,76	93,6	22,46	100,00	49,00	73,22	—	—
N°4	4,75	2,02	0,7	0,19	16,3	3,91	98,70	48,36	52,46	49,00	59,00
N°8	2,36	1,47	0,5	0,14	12,3	2,95	88,20	43,22	46,31	36,00	45,00
N°10	2,00	1,37	0,4	0,11	11,4	2,74	81,10	39,74	42,58	—	—
N°16	1,16	1,07	0,3	0,09	8,5	2,04	55,80	27,34	29,47	—	—
N°40	0,43	0,68	0,3	0,08	7,0	1,68	45,70	22,39	24,15	14,00	22,00
N°80	0,18	0,46	0,2	0,05	3,2	0,77	25,10	12,30	13,12	—	—
N°200	0,075	0,31	0,1	0,03	1,6	0,38	12,70	6,22	6,63	3,00	7,00

TABLA 4.18 - Combinaciones Granulométricas –Convencional Tipo C

Fuente: Elaboración propia



GRAFICA 4.7 - Combinaciones Granulométricas –Convencional Tipo C

Fuente: Elaboración propia

Comprobación granulométrica: Cuando se tienen establecidos los porcentajes para cada uno de los agregados el procedimiento sigue con una comprobación granulométrica que se puede decir que es la combinación real, y es simplemente la

verificación que indica que se puede reproducir la combinación teórica, dicha comprobación se realiza según el ensayo basado en AASHTO T 27.

Así la combinación para obtener una muestra de 2500 g que sirva para realizar el ensayo granulométrico, es de la siguiente manera:

Agregado Grueso 3/4"	27 %	= 0.27 x 2500 g =	675 g
Agregado Medio 3/8"	24 %	= 0.24 x 2500 g =	600 g
Arena	49 %	= 0.49 x 2500 g =	1225 g
	100 %		2500 g

Granulometría 2 y 3: Se utiliza la especificación granulométrica SUPERPAVE estudiado en el capítulo anterior, tomando en cuenta el tamaño máximo nominal de 19mm se tiene la siguiente especificación:

AGREGADO DE TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL 19 mm							
TAMIZ			Máxima densidad	Puntos de control		Zona restringida	
N°	mm	(mm) ^{0,45}		mín.	máx.	mín.	máx.
1"	25	4,26	100,00	100	100		
3/4"	19	3,76	88,40	90	100		
1/2 "	12,5	3,12	73,20				
3/8"	9,5	2,75	64,70				
N°4	4,75	2,02	47,40				
N°8	2,36	1,47	34,60	23	49	34,6	34,6
N°10	1,18	1,08	25,30			22,3	28,3
N°16	0,6	0,79	18,80			16,7	20,7
N°40	0,3	0,58	13,70			13,7	13,7
N°80	0,16	0,44	10,00				
N°200	0,075	0,31	7,30	2	8		

TABLA 4.19 - Requerimientos de Superpave para la granulometría de mezcla asfáltica para agregados de tamaño máximo nominal 19mm.

Fuente: Manual centroamericano Especificaciones para la construcción de carreteras

Cortes de áridos utilizados

Debido a que con las tres fuentes de áridos (gravilla 3/4", gravilla 3/8" y arena) y después de analizar sus granulometrías, fue muy difícil ponderar para obtener las

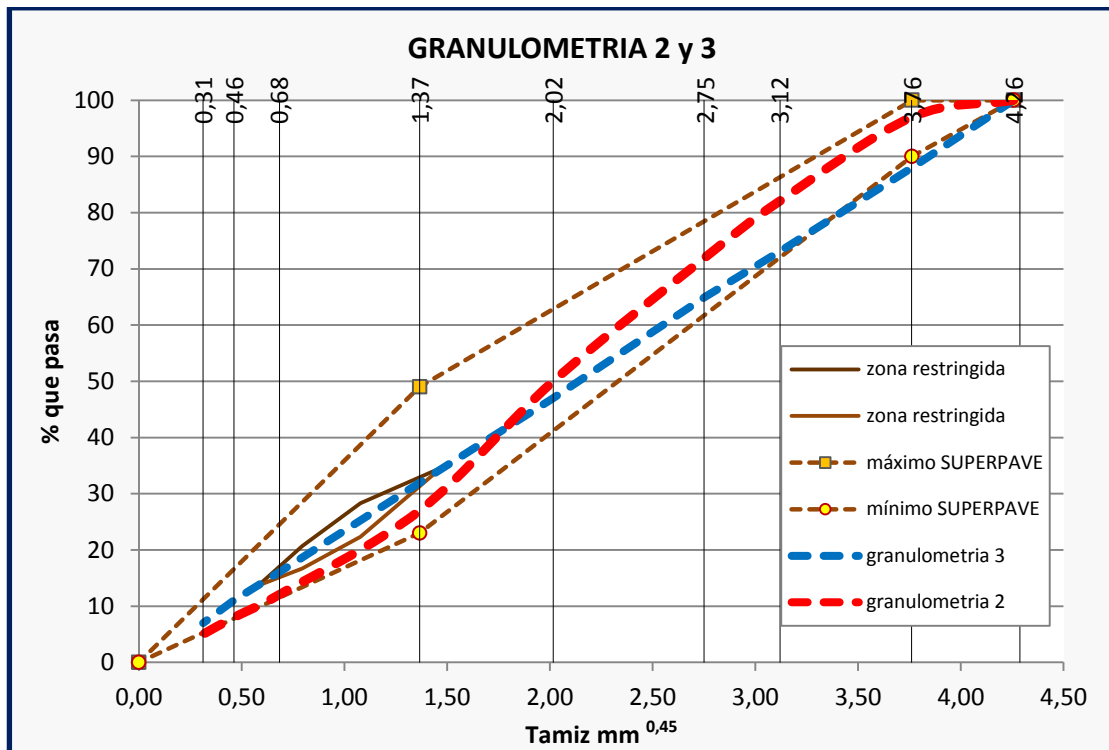
granulometrías 2 (una aproximación de referencia por tanteo se tiene 22% de grava 3/4", 50% grava 3/8" y arena 23%) y 3 deseadas y por lo que decidió tamizar los áridos y cortar para obtener en los porcentajes que aporta cada tamaño de árido. A continuación se detallan los porcentajes retenidos usados de cada corte de áridos para obtener con la mezcla de estos cada una de las granulometrías.

$$\% \text{Retenido} = \% \text{ que pasa}_{\text{superior}} - \% \text{ que pasa}_{\text{inferior}}$$

AGREGADO DE TAMAÑO MAXIMO NOMINAL 19 mm										
TAMIZ			GRANULOMETRIA 2		GRANULOMETRIA 3		Puntos de control		Zona restringida	
N°	mm	(mm) ^{0,45}	% que pasa	% Retenido	% que pasa	% Retenido	mín	máx	mín	máx
1"	25	4,26	100	0	100	0	100	100		
3/4"	19	3,76	97	3	88	12	90	100		
1/2 "	12,5	3,12	82	15	73	15				
3/8"	9,5	2,75	72	10	65	8				
N°4	4,75	2,02	50	22	47	18				
N°10	2	1,37	27	23	32	15	23	49	34,6	34,6
N°40	0,425	0,68	12	15	16	16			22,3	28,3
N°80	0,18	0,46	8	4	11	5			16,7	20,7
N°200	0,075	0,31	5	3	7	4			13,7	13,7

TABLA 4.20 - Combinaciones Granulométricas -Superpave para agregado de 19mm.

Fuente: Elaboración propia



GRAFICA 4.8 - Granulometría 2 y 3 Superpave para agregado de TMN de 19 mm.

Fuente: Elaboración propia

Así la dosificación de agregado para la elaboración de una briqueta se tiene de 1200 g

% Retenido	% Retenido* Peso muestra	Retenido muestra
0	$0,00 * 1200 =$	0 g
3	$0,03 * 1200 =$	36 g
15	$0,15 * 1200 =$	180 g
10	$0,10 * 1200 =$	120 g
22	$0,22 * 1200 =$	264 g
23	$0,23 * 1200 =$	276 g
15	$0,15 * 1200 =$	180 g
4	$0,04 * 1200 =$	48 g
3	$0,03 * 1200 =$	36 g
Total muestra=		1200 g

TABLA 4.21 - Dosificación mediante porcentajes retenidos para una briqueta

Fuente: Elaboración propia

4.4 Caracterización de materiales asfálticos

4.4.1 Penetración ASTM D5, AASHTO T49

4.4.1.1 Objetivo

- ✓ Determina la dureza o consistencia relativa, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente a una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se determina la penetración normal. Esta se hace a 25 °C, calentando la muestra en un baño de agua termostáticamente controlada, la aguja cargada con 100 g y la carga se aplica durante 5 segundos. La unidad de penetración es la décima de milímetro.

4.4.1.2 Equipo y material

- ✓ Penetrómetro, Cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm. El peso del vástago será de $47,5 \pm 0,05$ gr. El peso total del vástago con aguja será de $50 \pm 0,05$ gr. para cargas totales de 100 y 200 gr. Dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo.
- ✓ Aguja de Penetración, La aguja es de acero inoxidable templado y duro, debe tener aproximadamente 50 mm. De largo y diámetro entre 1,00 y 1,02 mm.
- ✓ Capsulas
- ✓ Baño de agua
- ✓ Transportador de capsula
- ✓ Aparato medidor de tiempo
- ✓ Termómetros

4.4.1.3 Procedimiento

- ✓ Calentar el material en un recipiente, agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas.
- ✓ Se llena el molde para la probeta calentado a una temperatura semejante a la del material, hasta una altura que sea superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta.
- ✓ Después de llenar los moldes, protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y dejar enfriar al aire a una temperatura por un período entre 1 y 1.5 horas.
- ✓ Sumergir el recipiente en el baño de agua a la temperatura controlada de 25°C, durante un periodo de 30 minutos.
- ✓ Comprobar que el vástago soporte de la aguja este perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamientos
- ✓ Fijar la aguja firmemente en su soporte. Se coloca el peso suplementario de 50g sobre el vástago, para obtener la masa móvil total de 100 ± 0.1 g.
- ✓ Aproximar la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sí que penetre.
- ✓ Poner en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado.
- ✓ Se lee ya nota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que hay a penetrado la aguja en la muestra.
- ✓ Se puede realizar más perforaciones en la muestra para lo cual se la vuelva a introducir al baño de agua durante un periodo de 15 minutos.
- ✓ Al momento de repetir el ensayo se debe tener en cuenta que se las debe realizar tanto a 10mm de la perforación inicial y del borde.

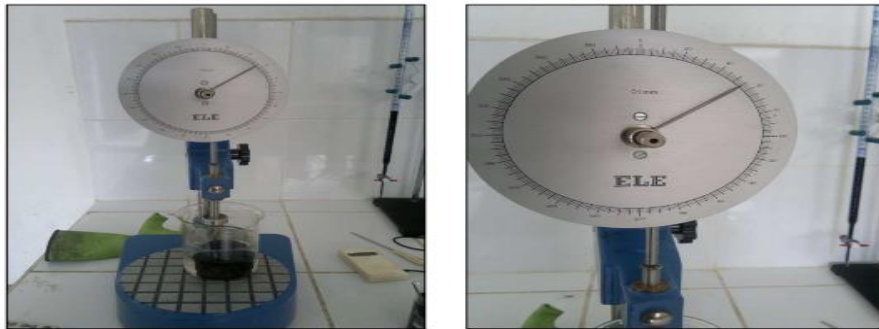
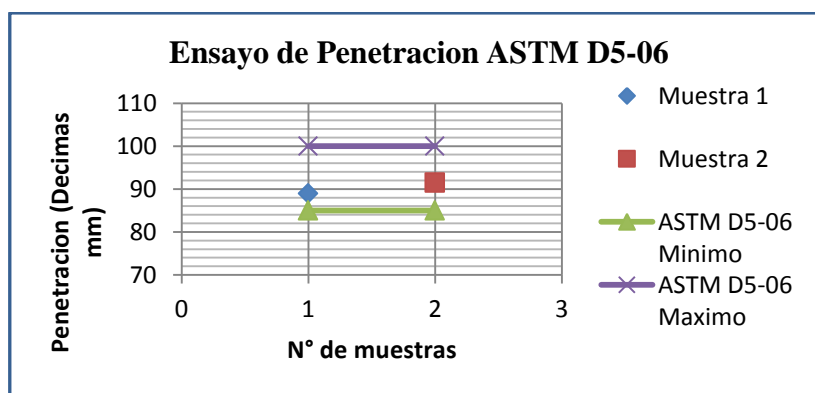


FIGURA 4.13 - Penetración en el residuo a 25 °C, 5 segundos y con un peso de 100 g

4.4.1.4 Cálculo y resultados

Ensayo de penetración			
N° de muestra	N° penetración	Lectura	Unidades
1	1	90	d mm
	2	91	d mm
	3	86	d mm
	Promedio	89	d mm
2	1	90	d mm
	2	88	d mm
	3	89	d mm
	Promedio	89	d mm
PENETRACION		89	d mm

TABLA 4.22 - Resultado de Ensayo de Penetración 85-100 Convencional
Fuente: Elaboración propia



GRAFICA 4.9 – Resultado de Penetración 85-100 Convencional
Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Ensayo de Viscosidad Saybolt Furolb ASTM D244

4.4.2.1 Objetivo.

- ✓ Este método de ensayo permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo. Empleando una temperatura de 135°C para los cementos asfálticos, de 25 y 50°C para las emulsiones asfálticas y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados, haciendo a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.
- ✓ La prueba consiste en determinar el tiempo que tarda en pasar 60 cm³ del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de Viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecida.

4.4.2.2 Equipo y materiales

- ✓ Viscosímetro Syabot Furolb
- ✓ Recipiente
- ✓ Aciete
- ✓ Matraz 60 cm³

4.4.2.3 Procesamiento

- ✓ Se colocan 450 g de la muestra de cemento asfáltico en un recipiente, para derretirla se calienta hasta alcanzar una temperatura superior en 15 °C a la prueba, agitándola de vez en cuando, excepto durante los últimos 30°C de calentamiento, cuando el agitado será continuo. El tiempo de calentamiento no será mayor de 2 horas y la muestra solamente se debe.
- ✓ Se llena el baño del viscosímetro con el aceite adecuado para la temperatura a la cual se efectuara la prueba o con agua si se trata de un asfalto rebajado.

- ✓ Se limpia el tubo del equipo y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia.
- ✓ Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para evitar pérdidas de la muestra de prueba.

- ✓ Se ajusta el baño del viscosímetro a una temperatura ligeramente inferior a la seleccionada para la prueba, se entibian y secan el tubo de viscosidad y el embudo con la malla N° 20 cuando se trate de cemento asfáltico o N° 100 para asfalto rebajado. A continuación se vierte en el tubo de viscosidad la muestra preparada, filtrándola a través de la malla, hasta que se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.
- ✓ Se ajusta la muestra continuamente con el termómetro, dándole a este un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de burbujas, teniendo cuidado de no golpear el tubo de viscosidad para no presionar el asfalto a través del orificio de la boquilla se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.
- ✓ Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 minuto de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de 0,3 °C respecto a la temperatura de prueba, se retira la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.
- ✓ Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm³ del matraz y se registra el tiempo

medido. El tiempo transcurrido desde que se inicia el llenado del tubo de viscosidad hasta que empiece el llenado del matraz.

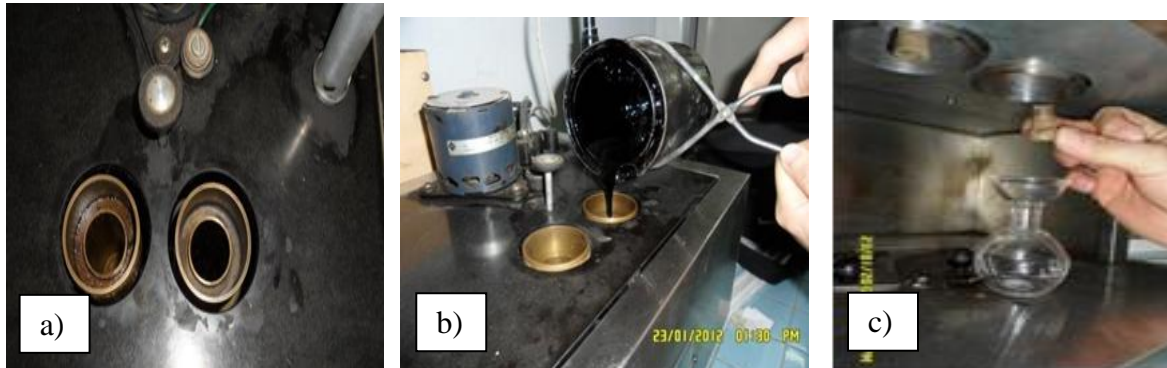


FIGURA 4. 14 - a) limpieza, b) Vertiendo, c) Registro de tiempo en el viscosímetro

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.4 Cálculo y resultados

Viscosidad Saybolt 135°C de 60 cm³ de muestra de asfalto

Ensayos	Tiempo (seg)
1	84
2	100
Promedio	92

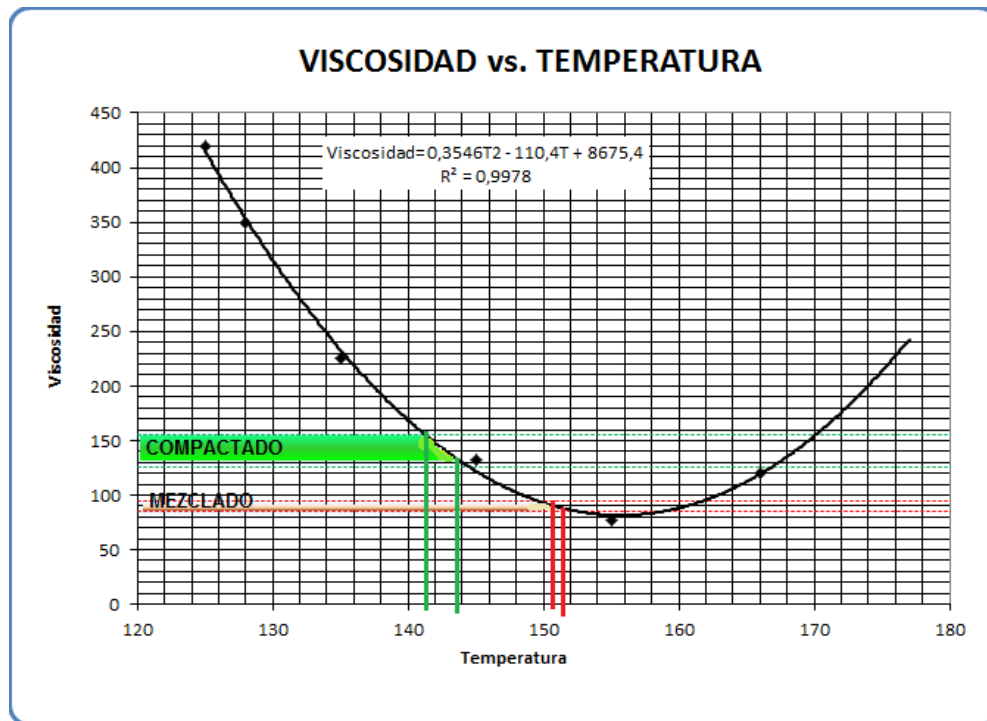
TABLA 4. 23 – Resultado de Viscosidad Saybolt asfalto convencional

Fuente: Elaboración propia

Punto	Temperatura	Viscosidad
1	125	420
2	128	350
2	135	226
3	145	132
4	155	77
5	166	120

TABLA 4. 24 - Viscosidad a diferente temperatura asfalto convencional

Fuente: elaboración propia



GRAFICA 4. 10 - Temperatura vs viscosidad asfalto convencional

Fuente: elaboración propia

a).- **Mezclado** Especificación: Viscosidad 85 - 95 Saybolt Furol
 Temperatura **152** y **155** °C

b).- **Compactado** Especificación: Viscosidad 125-155 Saybolt Furol
 Temperatura **142** y **144** °C

4.4.3 Punto de reblandecimiento Anillo y Bola ASTM D 36

4.4.3.1 Objetivo.

- ✓ Este método se utiliza para determinar el punto de ablandamiento del betún en el intervalo de 30° a 157° C (86° a 315° F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30° a 80° C). Se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua glicericina

- ✓ Este ensayo mide de forma indirecta la consistencia y equivale a una temperatura de equiviscosidad en las condiciones de ensayo. Junto a la penetración a 25° C, permite calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad de los asfaltos.

4.4.3.2 Procesamiento

- ✓ Se homogeniza su contenido con una espátula.
- ✓ Verter una pequeña muestra de betún caliente en cada anillo, posterior a esto permitir que las muestras se enfríen a temperatura ambiente por un periodo mínimo de 30 minutos.
- ✓ Una vez que las muestras se encuentren frías, cortar el exceso de betún sobre la parte superior del anillo con un cuchillo o espátula ligeramente caliente, de modo que el betún quede al ras y a nivel con el anillo.
- ✓ Monte el aparato con los anillos, guías de centrado de la bola, y el termómetro en posición. Llene la bañera de modo que la profundidad del líquido sea de 105 ± 3 mm con el aparato en su lugar.
- ✓ Coloque las esferas en las guías y sumerja el aparato en el medio del baño correspondiente.
- ✓ Calentar el baño de tal manera que la temperatura se incremente en rangos de 5°C cada minuto.
- ✓ Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1°C, de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.

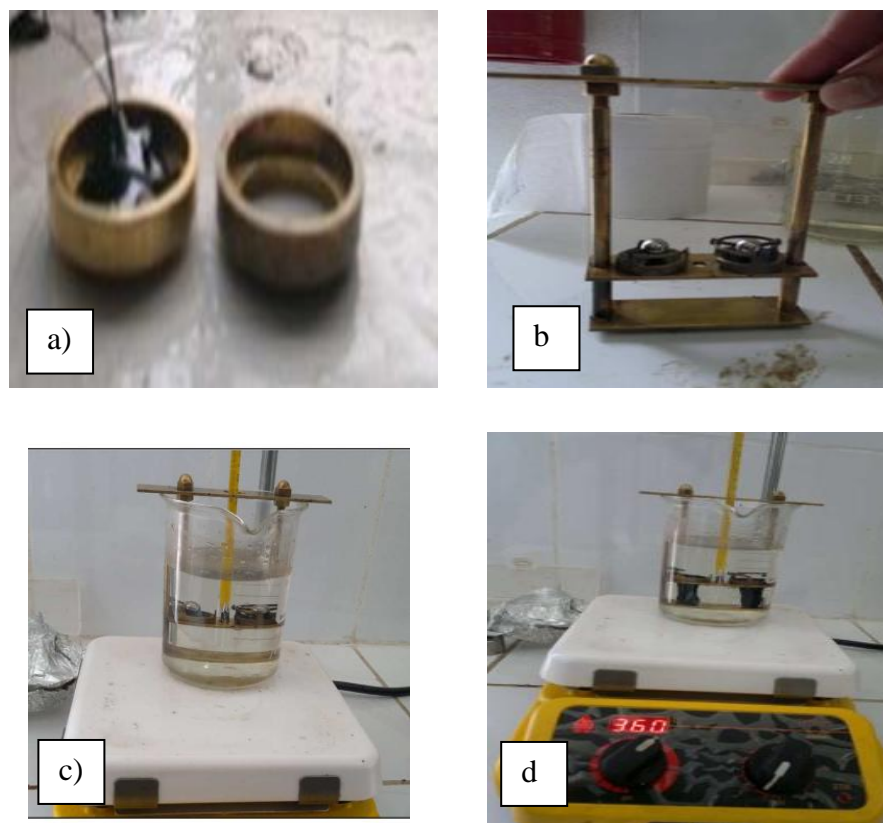


FIGURA 4.15 - a) Colocación del betún en el anillo, b) Colocación de esferas sobre anillos, c) Aparato sumergido, d) Registro de temperaturas

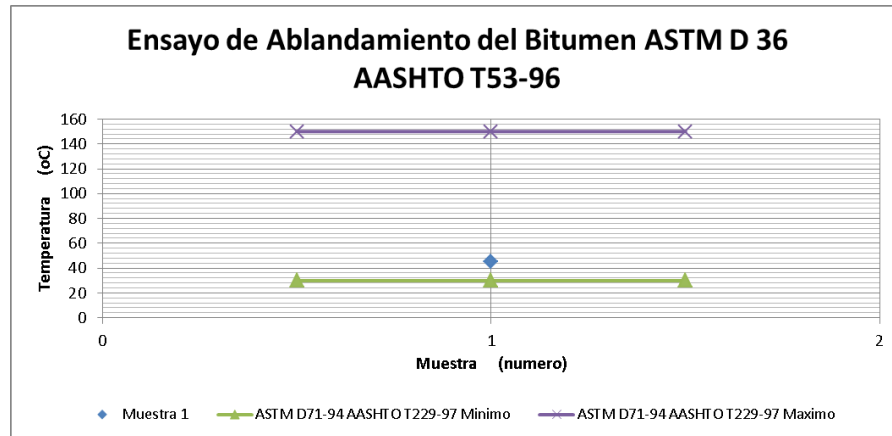
Fuente: elaboración propia

4.4.3 Cálculo y resultados

MUESTRA	TEMPERATURA (°C)
1	46
	46
2	44.5
	43.5
PROMEDIO	45

TABLA 4.25 - Resultado del punto de ablandamiento

Fuente. Elaboración propia



GRAFICA 4.11 - Ensayo de Ablandamiento

Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Ensayo de peso específico ASTM D-70.

4.4.4.1 Objetivo

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°C. Además de dar una identificación de la calidad y origen del material, el peso específico es útil para determinar el peso por unidad de volumen de un ligante calentado a la temperatura de aplicación.

4.4.4.2 Procesamiento

- ✓ Picnómetro.
- ✓ Baño de agua.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Recipiente de vidrio boca ancha de 600ml.
- ✓ Balanza A ± 0.01 gr.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Asfalto.

4.4.4.3 Procesamiento

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

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A.

Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C.

Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobre calentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

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

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

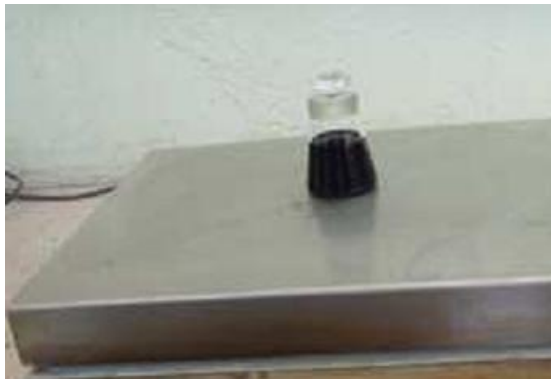


FIGURA 4. 16 - Pesando el conjunto picnómetro + asfalto



FIGURA 4. 17 - Baño de agua a 25°C conjunto picnómetro + asfalto + agua

4.4.4.4 Cálculo y resultado

Peso Picnómetro	[g]	A	73,2
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	[g]	B	168,5
Peso Picnómetro + Muestra	[g]	C	133,1
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	[g]	D	169
Gravedad Especifica (Gb)	[g/cm ³]	$\frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$	1,008

TABLA 4. 26 Resultado de la gravedad específica de asfalto convencional

Fuente: Elaboración Propia

4.4.5 Puntos de inflamación copa abierta de Cleveland ASTM D-92

4.4.5.1 Objetivo

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

4.4.5.2 Procesamiento

- ✓ Arme el aparato sobre una mesa nivelada en una pieza sin corrientes de aire; ubique el protector alrededor del aparato de encendido, afirmado por algún medio adecuado que permita la lectura del Punto de Inflamación.
- ✓ Lave la copa de ensaye con un solvente apropiado y quite cualquier aceite o vestigios pegados o residuos remanentes de ensayos anteriores. Si hay depósitos de carbón remuévalos con una esponja de acero. Limpie la copa bajo un chorro de agua fría y seque por unos pocos minutos sobre una llama, placa caliente o en un horno y elimine los últimos indicios de solvente y agua.

Enfríe la copa por lo menos a 55°C por debajo del Punto de Inflamación esperado antes de usarla.

- ✓ Mantenga el termómetro en posición vertical con el bulbo a una distancia de 6,5 mm del fondo de la copa y localizada en el punto medio del trecho entre el centro y el borde de la copa, en un diámetro perpendicular al arco o línea del recorrido de la llama de prueba y en el lado opuesto de la llama del quemador.
- ✓ Llene la copa a una temperatura conveniente no excediendo 100°C por encima de lo esperado para el Punto de Ablandamiento; de esa manera la parte superior del menisco está en la línea de llenado. Para ayudar en esta operación use un medidor del nivel de llenado. Si un exceso de muestra se ha agregado a la copa, quítelo usando una pipeta u otro aparato adecuado. Sin embargo, si hay muestra que esté fuera del aparato, vacíe, limpie y vuelva a llenar. Destruya cualquier burbuja de aire sobre la superficie de la muestra.
- ✓ La luz de la llama de prueba se ajusta a un diámetro de 3,0 a 5,0 mm y se compara con el tamaño del cabezal.
- ✓ Aplique calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17°C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra se aproxime a los 55°C por debajo del Punto de Inflamación esperado, disminuya el calor de modo que la velocidad de la temperatura para 28°C antes del Punto de Inflamación, sea de 5 a 6°C por min.
- ✓ Comenzando, al menos 28°C por debajo del Punto de Inflamación, aplique la llama de prueba cada 2°C sucesivos leídos en el termómetro. Pase la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulo recto al diámetro que pasa a través del termómetro; con suavidad continúe el movimiento aplicando la llama en línea recta a lo largo de la circunferencia de un círculo que tenga un

radio al menos de 150 mm. El centro de la llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2mm por encima del plano del borde superior de la copa, pasando en una dirección primero y en el próximo intervalo en la dirección opuesta. El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 s. Durante los últimos 17°C, suba la temperatura previo al Punto de Inflamación.

- ✓ Informe el Punto de Inflamación como la temperatura leída en el termómetro, cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces circunda la llama de prueba.

- ✓ Para determinar el Punto de Combustión continúe calentando de modo que la temperatura de la muestra se eleve a una razón de 5 a 6°C por min. Continúe aplicando la llama a intervalos de 2°C hasta que el material se inflame y continúe quemándose como mínimo 5 s. Informe la temperatura de este punto como el Punto de Combustión del material.



**FIGURA 4.18 - Aparato armado
copa abierta de Cleveland**



**FIGURA 4.19 - Medición del nivel de
llenado**

4.4.5.3 Resultado

De acuerdo a la norma de ensayos de laboratorio de asfalto de ABC para el tipo de asfalto 85-100 el punto de inflamación y combustión mínima es 230°C.

De acuerdo al procedimiento se obtuvo 280 °C de punto de inflamación y 200°C de combustión.

Si la presión barométrica real durante el tiempo de ensayo es menor que 715 mm de mercurio informe y sume la corrección apropiada al Punto de Inflamación y Punto de Combustión de acuerdo a la tabla siguiente

Presion Barometrica (mm de mercuciro)	Correccion (oC)
715 - 665	2
664 - 610	4
609 - 550	6

TABLA 4.27 - Valores de corrección del punto de Inflamación

Fuente: Manual de carreteras Ensayos de laboratorio de asfalto de ABC

MUESTRA	Presion Barometrica (TARIJA) (mm de mercuciro)	Correccion (oC)	Punto de inflamacion oC
1	609 - 550	6	286

TABLA 4.28 - Resultado del punto de Inflamación asfalto convencional

Fuente: Elaboración Propia

4.4.6 Ensayo de ductilidad en el asfalto ASTM 113

4.4.6.1 Objetivo

Determinar distancia en centímetros en un equipo denominado “ductilómetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de ligante asfáltico es extendida o estirada a una velocidad de 5 cm/minuto, en un baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

4.4.6.2 Equipo

- ✓ Moldes.
- ✓ Placa.

- ✓ Baño de agua.
- ✓ Ductilómetro.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Espátula
- ✓ Asfalto

4.4.6.1 Procedimiento

- ✓ Regule el ductilómetro a la temperatura de $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Asegúrese que la flecha este en cero.
- ✓ Recubra el plato base y las paredes internas de las piezas laterales con lubricante para evitar que la muestra se pegue en las paredes del molde.
- ✓ Ensamble el molde con las mordazas y las piezas laterales sobre la placa base
- ✓ Se calienta la muestra hasta fluidificarla, y se la vacía en los moldes sin hacer burbujas, hasta rebasar ligeramente el nivel de enrase.
- ✓ Se deja enfriar los moldes por 30 minutos a temperatura ambiente.
- ✓ Después de enfriarlas coloque en el baño del ductilómetro a temperatura especificada por 30 minutos.
- ✓ Se enrasa los moldes con una espátula o cuchillo caliente para eliminar el exceso de asfalto en los moldes. Coloque nuevamente los moldes en el baño por 30 minutos.
- ✓ Después de 90 minutos se quita las piezas laterales del molde y separe la briqueta de la base. Se fija las briquetas con sus mordazas en el ductilómetro sujetando los extremos de estas en los postes o ganchos de la máquina del ensayo.
- ✓ Se enciende el motor, y fije la flecha a la barra y jale la muestra con una velocidad de 5cm por minuto, hasta producir una ruptura en la briqueta.
- ✓ Si durante el ensayo, el material bituminoso al estirarse tiene tendencia a subir hasta la superficie del agua o tocar la placa de fondo del ductilómetro, deberá ajustarse la densidad relativa del agua a la del material ensayado, añadiendo

cloruro de sodio, hasta conseguir que el hilo quede lo más recto posible, sin elevarse o descender.

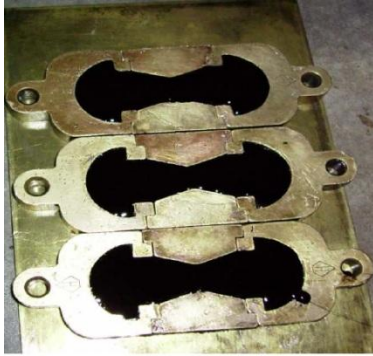


FIGURA 4. 20 - Preparación de las briquetas



FIGURA 4. 21 – Elongación del asfalto en el equipo ductilómetro

Fuente: Elaboración propia

4.4.6.1 Cálculo y resultado

Nº de lectura	Longitud de alargamiento (cm)	Velocidad de ensayo (cm/min)	Temperatura de ensayo (°C)
1	115	5	25
2	113	5	25
3	121	5	25
Promedio	116,3		

TABLA 4. 29 - Resultado del ensayo de ductilidad asfalto convencional

Fuente: Elaboración propia

4.4.7 Ensayo de la mancha AASHTO T-102

4.4.7.1 Objetivo

El ensayo de la mancha o de "Oliensis" es un procedimiento que permite comprobar si un asfalto ha sido sometido a temperaturas capaces de originar procesos de descomposición térmica o si ha sido contaminado con productos que los hayan tenido. El resultado de esta prueba tiene una valoración visual.

4.4.7.2 Equipo

- ✓ Un frasco Erlenmeyer de 25ml.
- ✓ Balanza A \pm 0.01gr.
- ✓ Papel filtro.
- ✓ Varilla de vidrio con extremos redondeados.
- ✓ Gasolina.
- ✓ Asfalto.

4.4.7.3 Procedimiento

- ✓ Se pesan 2 g de la muestra de asfalto.
- ✓ Se calientan al horno en el frasco Erlenmeyer hasta que la muestra se extiende y forme una película que cubra el fondo del recipiente.
- ✓ Se deja enfriar a la temperatura ambiente y se agregan 10.2 ml de gasolina y se pesa el conjunto
- ✓ Se coloca el tapón de corcho provisto del tubo, se agita durante 5 segundos en forma circular y se sumerge hasta el cuello en un baño de agua hirviendo después de 1 minuto se retira, se agita en forma circular durante 5 segundos y se repite el ciclo completo hasta que el asfalto se diluya por completo.
- ✓ Cumplida la dilución completa ayudada del calentamiento, se deja enfriar a la temperatura ambiente. La mezcla anterior se coloca durante 15 minutos en un baño a $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; se retira, se agita y con la varilla de vidrio se toma una pequeña porción, dejando caer dos gotas sobre el papel filtro el cual se mantiene en el aire, horizontalmente

- ✓ Se considera que el ensayo da resultado "negativo" cuando las dos manchas obtenidas en el paso anterior son uniformes y sin un núcleo o anillo de color más oscuro en su interior.
- ✓ Se considera que el ensayo es "positivo" cuando en cualquiera de las dos manchas obtenidas se observa un núcleo o anillo de color más oscuro en su interior. En caso de precisarse de una estimación cuantitativa, se seguirá el siguiente procedimiento cuando se tienen resultados positivos.



FIGURA 4. 23 - Agregando gasolina a la muestra



FIGURA 4. 22 - Muestra en baño a 25°C



FIGURA 4. 24 - Tomando muestra para dejar caer en el papel filtro
Fuente: Elaboración propia

4.4.7.4 Resultado

Como las dos manchas obtenidas son uniformes y sin un núcleo o anillo de color más oscuro en su interior, entonces “NEGATIVO”

4.4.8 Índice de penetración del asfalto

4.4.8.1 Objetivo

Este índice, concebido por Pfeiffer y Van Doormal, se calcula a partir de los valores de la penetración y del punto de ablandamiento y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

4.4.8.2 Procedimiento

El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir, por un lado, que a la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) la penetración de un cemento asfáltico es de 800, y, por otro, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, si se elige en ordenadas una escala logarítmica para la penetración.

4.4.8.3 Cálculo y resultado

El cálculo del IP se obtiene mediante la expresión:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log \text{penetracion}}{\text{pto. blandamiento} - 25} \right]$$

$$IP = \frac{20 - 10A}{A + 1}$$

Dato:

Ablandamiento = 45°C

Penetración = 92 dmm

Remplazando en:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log 92}{45 - 25} \right] = 2,34$$

$$IP = \frac{20 - 10 \cdot 2,34}{2,34 + 1} = -1,02\%$$

4.4.9 Recuperación elástica por ductilometro ASTM D-6084

4.4.9.1 Objetivo

Este ensayo está basado en el ensayo de ductibilidad. En éste se emplea la misma técnica para la preparación de las muestras y el mismo equipo para realizar el ensayo.

4.4.9.2 Equipos

- ✓ Moldes.
- ✓ Placa.
- ✓ Ductilómetro.
- ✓ Termómetro.

4.4.9.3 Procedimiento

- ✓ La muestra es estirada a una velocidad de 5 cm/min, hasta una distancia de 20 cm.
- ✓ El hilo se corta al medio y al cabo de 30 min. Se mide la recuperación elástica.
- ✓ Se expresa la recuperación elástica como un porcentaje de la deformación aplicada.
- ✓ El ensayo de acuerdo a las distintas especificaciones, se realizarse a una temperatura de 25°C.
- ✓ Si la rotura del hilo se produce antes de los 20 cm, se tomará esta distancia para el cálculo de la recuperación elástica.



FIGURA 4. 25 - Procedimiento de recuperación elástica

4.4.9.4 Cálculo y Resultado

N° de lectura	Longitud de inicio (cm)	Longitud de corte (cm)	Recuperación elástica (%)
1	20	0,5	2,5
2	20	0,4	2
3	20	0,6	3
Promedio			2,5

TABLA 4. 30 - Resultado de recuperación elástica de Asfalto Convencional

Fuente: Elaboración propia

4.4.10 Prueba de película delgada en horno ASTM D1754

4.4.10.1 Objetivo

Este método se refiere a la determinación del efecto del calor y del aire sobre una película de materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este procedimiento se determinan a partir de la medición de ciertas propiedades seleccionadas del asfalto, antes y después del ensayo.

4.4.10.2 Equipo

- ✓ Horno
- ✓ Repisa giratoria
- ✓ Termómetro
- ✓ Recipiente
- ✓ Balanza

4.4.10.3 Procedimiento

- ✓ Colóquese suficiente material para el ensayo en un recipiente adecuado y caliéntese hasta que llegue a una condición fluida. Teniendo cuidado la más alta temperatura, no exceda en 100 °C al punto de ablandamiento esperado.

- ✓ Agítase la muestra con un termómetro de uso general, durante el período de calentamiento, pero evítese la incorporación de burbujas de aire en la muestra.
- ✓ Pésease 50 ± 0.5 g dentro de cada una de dos o más cazuelas taradas, que cumplan con las exigencias del numeral que corresponde al recipiente utilizado.
- ✓ Cuando se quieran efectuar ensayos sobre el residuo, diferentes a la penetración y a la ductilidad, podrán requerirse más de dos recipientes que proporcionen material suficiente para efectuarlos.
- ✓ Al mismo tiempo, viértase una parte de la muestra dentro de los recipientes especificados, para la medida de las propiedades originales del asfalto. Efectúense los ensayos correspondientes a las propiedades que se quieren medir.
- ✓ Si se desea, el valor de la pérdida o del aumento de peso en términos cuantitativos, enfríense las muestras para el ensayo al horno, hasta la temperatura ambiente y pésease cada muestra separadamente con aproximación a 0.001 gr.
- ✓ Si no se necesita el cambio de peso, déjense enfriar las muestras hasta aproximadamente la temperatura ambiente antes de colocarlas en el horno como se indica en el paso 2 del procedimiento.
- ✓ Nivélese el horno de manera que la repisa gire en un plano horizontal. La inclinación máxima durante la rotación no deberá ser mayor de 3° a partir de la horizontal.
- ✓ Determínese la temperatura del horno por medio del termómetro especificado sostenido del vástago de la repisa circular, en posición vertical,

localizada en un punto equidistante del centro y del borde exterior de la repisa.

- ✓ Con el horno a **163°C** colóquense rápidamente los recipientes con la muestra sobre la repisa circular, ciérrase el horno, e iníciase la rotación del estante. Manténgase la temperatura a $163 \pm 1^\circ\text{C}$ **durante 5 horas** después de que la muestra haya sido introducida y de que haya alcanzado el horno dicha temperatura.
- ✓ Después de pesar los recipientes con los residuos, colóquense sobre unas láminas de asbesto-cemento y deposítense sobre la repisa circular del horno, mantenido a 163°C (325°F). Vacíense ambas muestras en una lata de 240 mL (8 onzas). Remuévase sustancialmente todo el material de los recipientes de 140 mm ($5\frac{1}{2}$ "). Agítense completamente los residuos colocándolos en la lata de 240 mL (8 onzas), sobre una placa caliente para mantener el material en condición fluida, si fuera necesario. Vacíese el material dentro del recipiente o moldes adecuados para la penetración, ductilidad u otros ensayos que fueren requeridos.



FIGURA 4. 27 - Cazuela tarada con asfalto



FIGURA 4. 26 - Repisa giratoria en horno

4.4.10.4 Cálculo y resultados:

- a) Pérdida por peso

$$\%perdida = \frac{Pantes - Pdespues}{Pantes} * 100$$

RECIPIENTE	PESO		% PERDIDA
	ANTES (g)	DESPUES (g)	
1	50,2	50,13	0,14
2	48,52	48,43	0,19
3	49,25	49,14	0,22
% de pérdida por peso			0,18

TABLA 4. 31- Resultado de pérdida de peso asfalto convencional
Fuente: Elaboración propia

b) Porcentaje de penetración original

Ensayo de penetración después del ensayo de película delgada		
N° penetración	Lectura	Unidades
1	74	d mm
2	70	d mm
3	71	d mm
Promedio	71,7	d mm

TABLA 4. 32 – Penetración después del ensayo TFOT
Fuente: Elaboración propia

$$\% de penetracion original = \frac{Penetracion despues del ensayo}{Penetracion antes del ensayo} * 100$$

$$\% de penetracion original = \frac{71,7}{92} * 100 = 77,9$$

c) Ductilidad a 25°C 5cm/min

N° de lectura	Longitud de alargamiento (cm)
1	95
2	85
3	88
Promedio	89,3

TABLA 4. 33 - Resultado de ductilidad después del ensayo TFOT
Fuente: Elaboración propia

4.5 Asfaltos Modificados con SBS

4.5.1 Ensayo de Penetración

Ensayo de penetración			
N° de muestra	N° penetración	Lectura	Unidades
1	1	70	d mm
	2	65	d mm
	3	68	d mm
	Promedio	67,7	d mm
2	1	70	d mm
	2	72	d mm
	3	68	d mm
	Promedio	70,0	d mm
Penetración		86,8	d mm

TABLA 4. 34 - Resultados de penetración de asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Punto de reblandecimiento del Bitumen usando Anillo y Bola

MUESTRA	TEMPERATURA (oC)
1	58
	61
2	59
	63
PROMEDIO	60.25

TABLA 4. 35 - Resultado de ablandamiento del asfalto modificado

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Gravedad específica

Peso Picnómetro	[g]	A	73,4
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	[g]	B	168,5
Peso Picnómetro + Muestra	[g]	C	188,1

Peso Picnómetro + Agua + Muestra	[g]	D	169
Gravedad Especifica (Gb)	----	$\frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$	1,004

TABLA 4. 36 - Resultado de gravedad específica de asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Puntos de inflamación copa abierta de Cleveland

MUESTRA	Punto de inflamación °C
1	342
	348

TABLA 4. 37 - Resultado de inflamación asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración propia

4.5.5 Ensayo de ductilidad en el asfalto ASTM 113

Nº de lectura	Longitud de alargamiento	Velocidad de ensayo	Temperatura de ensayo
1	125	5	25
2	135	5	25
3	128	5	25
Promedio	129,3		

TABLA 4. 38 - Resultado de ductilidad asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración propia

4.5.6 Ensayo de la mancha AASHTO T-102

Resultado: “NEGATIVO”

4.5.7 Índice de penetración del asfalto

Si penetración=68,8 y punto de ablandamiento=60,2

Entonces:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log \text{penetracion}}{\text{pto. blandamiento} - 25} \right] = 50 \left(\frac{\log 800 - \log 68,8}{60,2 - 25} \right) = 1,51$$

$$IP = \frac{20 - 10A}{A + 1} = \frac{20 - 10 * 1,51}{1,51 + 1} = 1,95$$

Índice de penetración=1,95%

4.5.8 Recuperación elástica por ductilometro ASTM D-6084

N° de lectura	Longitud de inicio (cm)	Longitud de corte (cm)	Recuperación elástica (%)
1	20	12,6	63
2	20	15	75
3	20	14,2	71
Promedio			69,7

TABLA 4. 39 - Resultado recuperación elástica asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración propia

4.5.9 Prueba de película delgada en horno ASTM D1754

a) Pérdida por peso

$$\%perdida = \frac{Pantes - Pdespues}{Pantes} * 100$$

RECIPIENTE	PESO		% PERDIDA
	ANTES (g)	DESPUES (g)	
1	48,52	48,43	0,19
2	49,52	49,43	0,18
3	49,25	49,06	0,39
% de perdida por peso			0,25

TABLA 4. 40 - Resultado de pérdida de peso después del ensayo TFOT

Fuente: Elaboración propia

b) Porcentaje de penetración original

Ensayo de penetración después del ensayo de película delgada		
N° penetración	Lectura	Unidades
1	51	0,01 mm
2	48	0,01 mm
3	55	0,01 mm
Promedio	51,3	0,01 mm

TABLA 4. 41 – Penetración después del ensayo TFOT

Fuente: Elaboración propia

$$\% de penetracion original = \frac{Penetracion despues del ensayo}{Penetracion antes del ensayo} * 100$$

$$\% \text{ de penetracion original} = \frac{51,3}{68,8} * 100 = 74,6$$

c) **Ductilidad a 25°C 5cm/min**

Nº de lectura	Longitud de alargamiento
1	110
2	105
3	102
Promedio	105,6

TABLA 4. 42 - Resultado de ductilidad después del ensayo TFOT

Fuente: Elaboración propia

4.6 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

4.6.1 Método de Diseño Marshall Convencional AASHTO T 245

4.6.1.1 Objetivo

- ✓ Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto o inferior a 25mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno.
- ✓ Determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla.

4.6.1.2 Resumen del método

- ✓ El procedimiento consiste en la elaboración de briquetas (probetas cilíndricas de 101.6 mm. de diámetro y 63.5 mm. de altura, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall determinando su estabilidad y flujo.
- ✓ Si se desea determinar el porcentaje de vacíos de las mezclas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las briquetas compactadas antes del ensayo de rotura.

- ✓ Previa a la preparación de las briquetas es necesario determinar la granulometría de los áridos y la combinación de estos, además de los pesos específicos de los mismos, así como también del asfalto
- ✓ Para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla se harán varias briquetas con distintos porcentajes de asfalto de tal forma que al graficar los valores obtenidos del ensayo se pueda determinar el valor óptimo de asfalto en la mezcla.

4.6.1.3 Equipo y materiales

- ✓ **Moldes de Compactación:** Se conforman de una placa de base plana con su molde y collar de extensión cilíndricos. El molde deberá tener un diámetro interior de 4" y una altura aproximada de 3", la placa de base y el collarín deberán ser intercambiables o sea que se deberán ajustar en los dos extremos de los moldes
- ✓ **Extractor:** Que sirva para sacar las briquetas del molde
- ✓ **Martillo de compactación:** Consiste en una cara circular de 100mm. De diámetro equipada con un peso de 4.515 ± 15 gr. (10lb) Y construido de modo de obtener una altura de caída de 460 ± 2 mm.
- ✓ **Pedestal de compactación:** Consiste en un poste de madera de 205 x 205 x 455 mm. Cubierto con una placa de acero de 305 x 305 x 25 mm. Debe estar empotrado y quedar firmemente afianzada y a nivel.
- ✓ **Sujetador de molde:** Consiste en un aro con resorte diseñado para mantener centrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.
- ✓ **Mordaza:** Son dos segmentos de cilindro (superior e inferior) con un radio interno de 51 ± 0.2 mm. Diseñado para transmitir la carga.
- ✓ **Maquina Marshall:** Aparato eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensayo a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min. Está equipada con un anillo de prueba calibrada para determinar la carga aplicada de una capacidad superior a 25 kN y una sensibilidad de 45 N. con

un dial graduado de 0.0025 mm. Y un medidor de flujo con una precisión de 0.01 mm. Para determinar la deformación que se produce en la carga máxima.

- ✓ **Horno**
- ✓ **Baño de agua:** Deberá ser controlado termostáticamente a 60 ± 1 :C y también contara con un fondo falso y un termómetro centrado y fijo.

4.6.1.4 Evaluación de agregados

Calidad de control de los agregados pétreos mediante los ensayos de caracterización de los agregados.

Ensayos	Unidades	Normas	Resultado	Especificación	
De consenso					
Angularidad del agregado grueso	[%]		ASTM D5821	Grava 95,7 Gravilla 99,5	75 min
Partículas planas y alargadas	[%]		ASTM D4791	0,4	10% máx.
Equivalente de arena	[%]	AASHTO 176	ASTM2419	57,03	45% mín.
De origen					
Desgaste de los Ángeles	[%]		ASTM C131	Grava 22,92 Gravilla 23,08	35% máx
Intemperismo acelerado	[%]	AASHTO T 104	ASTM C88	7,8	10% máx
Densidades					
Gravedad específica seca agregado grueso	[Adimens.]	AASHTO T85	ASTM C127	Grava 2,632 Gravilla 2,632	—
Absorción del agregado grueso	[%]	AASHTO T85	ASTM C127	Grava 0,934 Gravilla 1,140	—
Gravedad específica seca agregado fino	[Adimens.]		ASTM C128	2,548	—
Absorción del agregado fino	[%]		ASTM C128	2,371	—

TABLA 4. 43 - Resumen de los resultados de caracterización de materiales pétreos

Fuente: Elaboración propia

Realizar la combinación de agregados de gravedad específica y absorción en relación al porcentaje que se obtiene la estructura granular de las granulometrías propuestas, el diseño de mezcla debe proporcionar la granulometría que se encuentra dentro de los rangos de diseño.

Gravedad Específica seca o bulk de la combinación de agregados (Gsb)

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Gsb: Gravedad Especifica seca o bulk de la combinación de agregados

P1, P2, ..Pn: Porcentaje por Peso de los Agregados

G1, G2, ...G3:Gravedad Especifica seca o buk de cada agregado

Las gravedades específicas de la granulometría1 convencional de los materiales las cuales se han obtenido por medio de cada uno de los ensayos respectivos son las siguientes:

Agregado ¾” → G1 = 2,602

Agregado ⅜” → G2 = 2,579

Arena → G3 = 2,348

Asfalto → Gasf = 1,008

$$Gsb = \frac{28 + 24 + 49}{\frac{28}{2,602} + \frac{23}{2,579} + \frac{49}{2,348}} = 2,466$$

De manera resumida se tiene las gravedades específicas bulk de las granulometrías estudiadas.

Gravedad especifica seca o bulk	Gsb
Granulometría 1 Convencional	2,466
Granulometría 2Superpave	2,515
Granulometría 3Superpave de max. densidad	2,506

TABLA 4. 44 - Resultado de Gravedades específicas bulk de la combinación de los agregados

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.5. Evaluación del cemento asfáltico convencional y modificado SBS

Se determina el grado apropiado de cemento asfáltico Ipiranga C.A. 85-100, según el tipo y ubicación geográfica del proyecto, así la gravedad específica del cemento asfáltico (Ga) tiene igual a 1,008 que se determinó en la caracterización de los ensayos de asfalto.

Ensayos	Unidades	Normas		Resultado	Especificación
Penetración	[dmm]	AASHTO T49	ASTM D5	89,0	85 – 100
Viscosidad Saybolt Furol	° C	AASHTO T5997	ASTM D244	92,0	85min
Punto de ablandamiento	° C	AASHTO T53	ASTM D36	45	30 – 150
Gravedad específica a 25°C	g/cm ³	ASSHTO T229	ASTM D71	1,008	—
Punto inflamación	°C	AASHTO T79	ASTM D1310	286,0	232 min
Ductilidad a 25°C	cm		ASTM D 113	116,3	100 min
Ensayo de mancha	—	AASHTO T 102		Negativo	Negativo
Recuperación elástica por ductilidad	%		ASTM D 6084	2,5	—
Índice de penetración	%			-1,02	-1,5min 1,5 máx.
Ensayo de película delgada TFOT					
Pedida por peso	%			0,18	0,4 máx.
% de penetración original	dmm	AASHTO T 49		71,7	47 min
Ductilidad a 25°C	cm		ASTM D 113	89,3	75 min

TABLA 4. 45 - Resumen de control de calidad asfalto convencional

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo se determina el grado apropiado de cemento asfáltico modificado STRATURA 85-100 SBS, según el tipo y ubicación geográfica del proyecto, así la gravedad específica del cemento asfáltico (G_a) tiene igual a 1,004 que se determinó en la caracterización de los ensayos de asfalto.

Ensayos	Unidades	Normas		Resultado
Penetración	[dmm]	AASHTO T49	ASTM D5	68,8
Punto de ablandamiento	° C	AASHTO T53	ASTM D36	60,2
Gravedad específica a 25°C	g/cm ³	AASHTO T229	ASTM D71	1,004
Punto inflamación	°C	AASHTO T79	ASTM D1310	348
Ductilidad a 25°C	cm		ASTM D 113	129,3
Ensayo de mancha	—	AASHTO T 102		Negativo
Recuperación elástica por ductilidad	%		ASTM D 6084	69,7
Índice de penetración	%			1,95
Ensayo de película delgada TFOT				
Pedida por peso	%			0,25
% de penetración original	dmm	AASHTO T 49		51,3
Ductilidad a 25°C	cm		ASTM D 113	105,6

TABLA 4. 46 - Resumen de control de calidad asfalto modificado SBS

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.6 Preparación de los Especímenes Marshall

4.6.1.6.1 Dosificación de agregados para una briqueta

El procedimiento para dosificación de agregado que se utilizará en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma Bolivia de

Laboratorio de suelos y asfalto, que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda los rangos.

Según el tamaño máximo de los agregados (3/4") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

- ✓ 25.0 mm a 19.0 mm (1 pulg a ¾ pulg.)
- ✓ 19.0 mm a 12.5 mm (¾ a ½ pulg.)
- ✓ 19.0 mm a 9.5 mm (¾ a ⅜ pulg.)
- ✓ 9.5 mm a 4.75 mm (⅜ pulg. a No. 4)
- ✓ 4.75 mm a 2.36 mm (No. 4 a No. 8)
- ✓ Pasa 2.36 mm (No. 8)

Nuestro diseño utilizará tres tamaños de agregado con sus respectivos porcentajes establecidos que son: Agregado Grueso ¾", Agregado Medio ⅜" y Arena ; pero ahora, para poder hacer una briqueta de 1200 g se tienen cuatro fracciones de agregado, lo cual implica que se deben pesar cuatro cantidades, una de cada fracción para complementar una dosificación de agregado para una elaboración de una briqueta; para éstas fracciones no tenemos todavía un porcentaje establecido por lo que se procede a calcularlo de las granulometrías propuestas que se obtuvo al combinar los tres agregados.

El porcentaje retenido se calcula es restando los porcentajes acumulados que pasan entre las mallas en las que se encuentra dicha fracción.

$$\% \text{Retenido} = \% \text{ que pasa superior} - \% \text{ que pasa inferior}$$

Tamiz		GRANULOMETRIA 1		GRANULOMETRIA 2		GRANULOMETRIA 3	
Pasa	Retiene	% que pasa	% retenido	% que pasa	% retenido	% que pasa	% retenido
1"	¾"	100,0	1,971	100	3	100	12
¾"	½"	98,0	15,687	97	15	88	15
½"	⅜"	82,3	9,123	82	10	73	8
⅜"	Nº4	73,2	20,755	72	22	65	18
Nº4	Nº8	52,5	6,159	50	20	47	13
Pasa por malla Nº8		46,3		30		34	

TABLA 4. 47 - Porcentaje calculado para cada fracción del agregado

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.6.2 Estimación del porcentaje óptimo de asfalto

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda, y se realiza utilizando la relación propuesta por el instituto del asfalto, ya que proporciona un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño. Relación propuesta por el Instituto del Asfalto

$$P = 0.035a + 0.045b + K.c + F$$

Dónde:

P = porcentaje de asfalto estimado por peso total de la mezcla

a = porcentaje de material pétreo retenido en el tamiz No. 8

b = porcentaje de material que pasa el tamiz No. 8 y se retiene en la No. 200.

c = porcentaje de material que pasa la malla No. 200.

K = factor que depende del valor de “c”, así

- ✓ 0.15 para c de 11% a 15%
- ✓ 0.18 para c de 6% a 10%.
- ✓ 0.20 para c de 5% o menos.

F= 0% a 2%, basado en la absorción de agregados ligeros o pesado. En ausencia de datos se toma 0.7%.

Otra alternativa la siguiente tabla: K = n

Tipo de Material	n
Gravas o arenas de río de baja absorción	0.55
Gravas angulosas, redondeadas, trituradas de baja absorción	0.60
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y roca Triturada de absorción media.	0.70
Rocas trituradas de alta absorción	0.80

Utilizando la granulométrica 1 se procede a obtener los valores de a, b y c de la siguiente manera:

$$a = 100 - (\% \text{ pasa No. 8}) = 100 - 42,58 = 53,70$$

$$b = (\% \text{ pasa No. 8}) - (\% \text{ pasa No. 200}) = 42,58 - 6,6 = 39,71$$

$$c = (\% \text{ pasa No. 200}) = 6,6$$

$$K = 0.18$$

$$n = 0.70$$

Sustituyendo en la ecuación tenemos

$$P = 0,035 (57,42) + 0,045 (35,98) + (0.18) (6,6) + 0.70$$

$$P = 1,837 + 1,619 + 1,188 + 0,60$$

P= 5,55 %, se aproxima a

P = 5.5 % de Cemento Asfáltico teórico

Tamiz	GRANULOMETRIAS		
	G1	G2	G3
	% que pasa	% que pasa	% que pasa
N° 8	46,3	30	34
N°200	6,6	3	4
a	53,70	70	66
b	39,71	27	30
c	6,60	3	4
k	0,18	0,2	0,2
F	0,70	0,7	0,7
% Optimo teórico C.A.	5,55	4,76	4,96
% Optimo teórico C.A.	5,5	5	5

TABLA 4. 48 - Estimación de porcentaje óptimo de Cemento asfáltico de las granulometrías

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de cemento asfáltico para cada dosificación se obtienen haciendo incrementos de 0.5% al porcentaje óptimo teórico de cemento asfáltico, dos incrementos arriba y dos abajo. Para comparar las relaciones volumétricas se tomara de 4% al 6% con incrementos de 0,5% para las tres granulometrías.

GRANULOMETRIAS	Porcentajes de C.A.				
	%	%	%	%	%
Granulometría 1	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Granulometría 2	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Granulometría 3	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5

TABLA 4. 49 - Porcentajes de Cemento Asfálticos de las granulometrías

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.6.3 Dosificación de agregado y asfalto

A continuación se ejemplifica el cálculo de los diferentes pesos de agregados para cada una de las fracciones, de acuerdo a los porcentajes establecidos.

Cálculo Para una Briqueta.

Para ejemplificar el cálculo se utilizará la granulometría 1, la dosificación completa para una briqueta de 1200 gramos con 5 % C.A. (Cemento Asfáltico)

$$W_{\text{briqueta}} = 1200 \text{ g}$$

$$1200 \text{ g} \quad 1200 \times 5\% = 60 \text{ g de C.A.}$$

$$1200 \times 95\% = 1140 \text{ de C.A.}$$

$$100\% \quad 1200 \text{ g por peso total en mezcla}$$

Tamiz		5%	de C.A. (g)	60
		95%	agregado (g)	1140
Pasa	Retiene	% retenido	Operación	Peso de agregado (g)
1"	3/4"	2,0	1140x0,02	22,47
3/4"	1/2"	15,7	1140x0,16	178,83
1/2"	3/8"	9,1	1140x0,09	104,00
3/8"	N°4	20,8	1140x0,21	236,61
N°4	N° 8	6,2	1140x0,06	70,21
Pasa por malla N°8		46,3	1140x0,46	527,88
Σ				1140,00
	% sfalto	5,0	1200x0,05	60,00
Peso de la Briqueta			Σ	1200,00

TABLA 4. 50 - Dosificación para una briqueta de 1200 g de 5% de C.A.

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos para las diferentes dosificaciones para las briquetas de acuerdo a su porcentaje respectivo de cemento asfáltico se realizan de la misma forma que los ejemplos en las secciones anteriores, a continuación se presenta todo los datos calculados de todos los porcentajes de cemento asfáltico.

GRANULOMETRIAS 1, 2 Y 3		C.A.	4,5%	5%	5,5%	6%	6,5%
		agregado	95,5%	95%	94,5%	94%	93,5%
TAMIZ		Peso (g)	1146	1140	1134	1128	1122
Pasa	Retiene	% retenido	Peso de agregado (g)	Peso de agregado (g)	Peso de agregado (g)	Peso de agregado (g)	Peso de agregado (g)
1"	3/4"	2,0	22,59	22,47	22,35	22,23	22,11
3/4"	1/2"	15,7	179,77	178,83	177,89	176,95	176,01
1/2"	3/8"	9,1	104,55	104,00	103,45	102,91	102,36
3/8"	N°4	20,8	237,85	236,61	235,36	234,12	232,87
N°4	N° 8	6,2	70,58	70,21	69,84	69,47	69,10
Pasa por malla N°8		46,3	530,66	527,88	525,10	522,32	519,54
Σ			1146,00	1140,00	1134,00	1128,00	1122,00
asfalto (g)			54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Σ			1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

TABLA 4. 51 - Dosificaciones de agregado y asfalto para una briqueta de 1200 g
Fuente: Elaboración Propia



FIGURA 4. 28 - Paquetes de 1200 g para las briquetas
Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.7 Preparación de la mezcla

- a) Pese en bandejas separadas para cada briqueta la cantidad necesaria de cada fracción para producir muestra quede como resultado una briqueta compacta de altura igual a 65 mm. Normalmente se requieren 1200 gr.
- b) Coloque las bandejas en el horno y caliente a una temperatura de aproximadamente 30 °C sobre la temperatura de mezclado.
- c) Coloque el árido caliente en una bandeja y revuelva completamente, forme un cráter en el árido y pese la cantidad necesaria de cemento asfáltico e incorpórela en la bandeja junto con los áridos. Asegúrese que la temperatura en ese instante sea la de mezclado.
- d) Mezcle el asfalto y el árido tan rápido como sea posible hasta que de completamente uniforme.



FIGURA 4. 29 - a) muestra tamizada, b) secado en el horno, c) pesado de la muestra, d) preparación de mezcla

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.8 Compactación de Briquetas

- a) Prepare el molde y el martillo, limpiándolos completamente y calentándolos durante 15 min.
- b) A una temperatura próxima a la de compactación, coloque un disco de papel filtro (papel común pintado con aceite sucio) cortado a medida, suavice las paredes del molde con aceite. Coloque el conjunto collar molde y base en el pedestal del compactador.
- c) Coloque la mezcla para la elaboración de briqueta
- d) Llene el molde con la espátula acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro.
- e) Con el martillo de compactación aplique 75 golpes en un tiempo no superior a 90s. Saque la base y el collar, invierta y re ensamble el molde y aplique en la otra cara del molde el mismo número de golpes.
- f) Después de compactar saque la base y deje enfriar la briqueta al aire. Si se desea puede utilizar un ventilador. Normalmente se deja enfriar toda la noche.



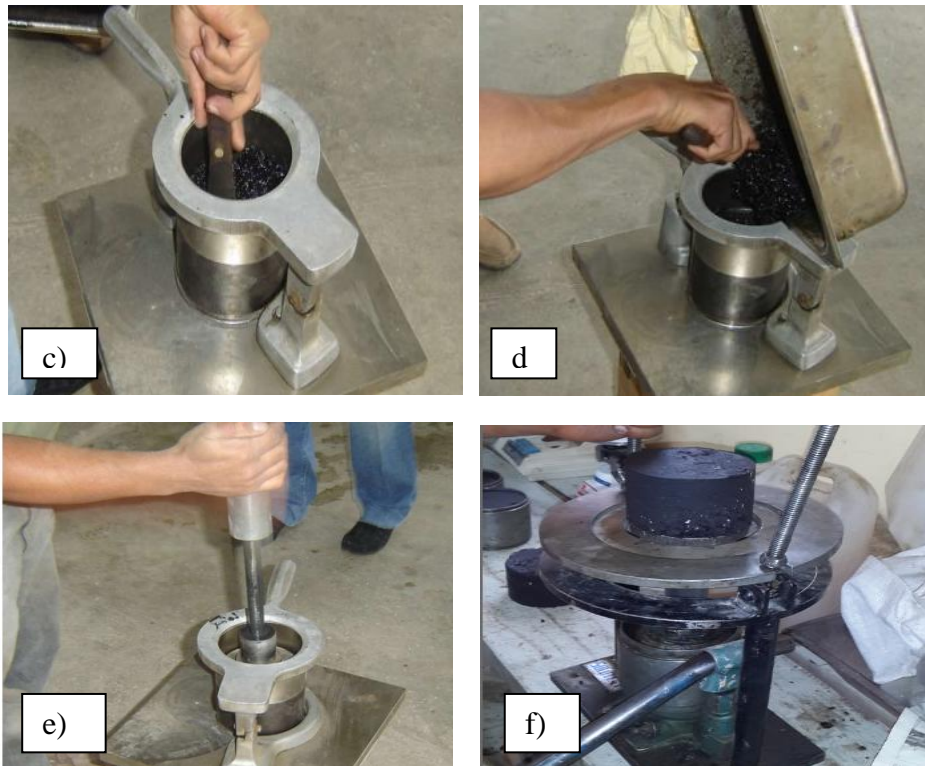


FIGURA 4. 30 - a), b), c), d), e), f), g) Pasos para compactación de mezcla

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.9 Gravedad Específica Bulk mezcla compactada (Gmb)

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para su respectivo curado a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad bulk, según AASHTO T 166-05. El procedimiento seguido fue secar los especímenes hasta masa constante (curado a temperatura ambiente). Luego se registró el peso seco de cada briqueta. Luego se sumergieron en un recipiente con agua a 25 °C, dejándolos saturar por lo menos 10 minutos. Al final del período de 10 minutos se removieron los especímenes y se colocaron en la canastilla sumergida previamente agitada para la eliminación de burbujas de aire, y se registró el peso sumergido de cada briqueta, inmediatamente al retirar la briqueta de la canastilla se

secó la humedad del espécimen con unatoalla húmeda tan rápido como fue posible. Pesamos al espécimen y registramos como peso saturado superficialmente seco. La norma AASHTO T 166-05 establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0.02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor es descartada.

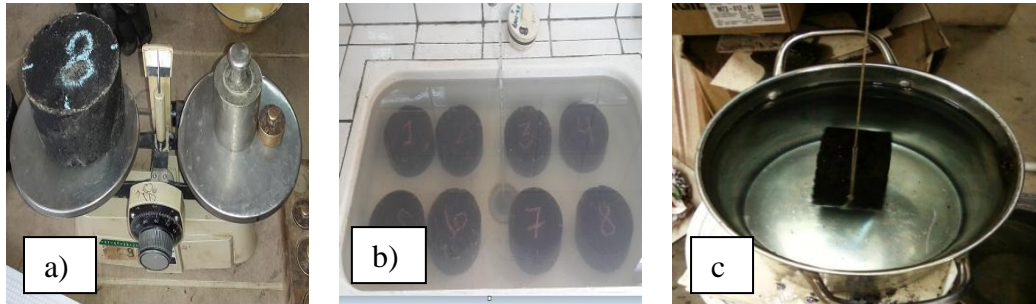


FIGURA 4. 31 - a) Peso seco, b) Peso sat. Supef. Seco, c) Peso sumergido en agua

Fuente: Elaboración Propia

Calculo:

$$G_{mb} = \frac{W_{seco\ al\ aire}}{W_{s.s.s.} - W_{sumergido}} = \frac{B}{C - D}$$

Para 4% de C.A. se tiene:

$$G_{mb1} = \frac{1995,4}{1193,1 - 649,2} = 2,197$$

$$G_{mb2} = \frac{1998,2}{1204,2 - 664,8} = 2,221$$

$$G_{mb3} = \frac{1197,7}{1200,4 - 680,5} = 2,304$$

Valor promedio:

$$G_{mb3} = \frac{2,197 + 2,221 - 2,304}{3} = 2,241$$

Para % C.A. de granulometría 1 con los puntos proyectados se tiene:

% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)				
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm ³]	Gravedad esp. buk
A		B	C	D	E	f
					C-D	B/E
4,00	1	1195,1	1193,1	649,2	543,9	2,197
	2	1198,2	1204,2	664,8	539,4	2,221
	3	1197,7	1200,4	680,5	519,9	2,304
Promedio						2,241
4,50	4	1192,4	1197,4	661,6	535,8	2,225
	5	1188,0	1190,0	659,3	530,7	2,239
	6	1190,3	1198,3	659,9	538,4	2,211
Promedio						2,225
5,00	7	1192,4	1196,2	668,6	527,6	2,260
	8	1188,0	1186,2	656,1	530,1	2,241
	9	1190,0	1194,0	668,4	525,6	2,264
Promedio						2,255
5,50	10	1183,3	1186,3	675,2	511,1	2,315
	11	1183,6	1186,6	665,7	520,9	2,272
	12	1181,5	1184,5	665,7	518,8	2,278
Promedio						2,288
6,00	13	1174,2	1177,2	662,4	514,8	2,281
	14	1178,4	1181,4	664,3	517,1	2,279
	15	1175,3	1178,3	664,4	513,9	2,287
Promedio						2,282

TABLA 4. 52 - Resultados de gravedades específicas (Gmb)

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.11 Calculo de las Propiedades volumétricas

4.6.1.11.1 Porcentaje de Vacíos en Total de la Mezcla (VTM)

Los vacíos de aire o vacíos en total de mezcla se pueden definir como el volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una

mezcla de pavimento compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla de pavimento compactado.

En mezclas asfálticas densas, este valor de vacíos según las especificaciones, debe estar en el rango de 3 a 5%. Existe una relación entre la gravedad específica bulk y la teórica máxima, esta última no contempla vacíos en su muestra, mientras que una briqueta compactada si posee vacíos en su interior, por lo tanto si el procedimiento se ha efectuado correctamente, la gravedad específica bulk siempre será menor que la gravedad específica teórica máxima.

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos es la siguiente: $100 \cdot (J-F)/J$

$$\% VTM = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{J - F}{J}$$

VTM= vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmm= Gravedad específica máxima teórica de la mezcla de pavimentación.

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Como ejemplo de cálculo para una briqueta con 4% de asfalto residual se tiene:

Briqueta 1:

Gmm = 2,401

Gmb = 2,241

$$\% VTM = 100 * \frac{2,401 - 2,241}{2,401} = 6,67$$

Para todos los % C.A. de la granulometría convencional se tiene:

Granulometría 1 CONVENCIONAL			
% C.A.	Gravedad específica seca bulk [Gmb]	Gravedad específica máxima teórica [Gsb]	% V.T.M.
A	F	J	$100 \cdot (J-F)/J$

4	2,241	2,40	6,65
4,5	2,225	2,412	7,75
5	2,255	2,394	5,82
5,5	2,288	2,391	4,30
6	2,282	2,388	4,42

TABLA 4. 53 - Resultado de porcentaje de Vacíos en Total de la Mezcla (VTM)

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.11.2 Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total.

La ecuación utilizada para determinar los vacíos en el agregado mineral (VAM) es la siguiente:

$$\% V. A. M. = 100 - \left(\frac{Gmb(100 - \%C. A.)}{Gsb} \right) = 100 - \frac{F(100 - A)}{Gsb}$$

Dónde:

VMA= vacíos en el agregado mineral (porcentaje del total de la mezcla)

Gsb= Gravedad específica bulk de la combinación de agregados.

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico.

Como ejemplo de cálculo para una briqueta con 4% de asfalto residual se tiene:

Briqueta 1:

Gmb= 2,241

Gsb= 2,546

$$\% VTM = 100 - \left(\frac{2,241(100 - 4)}{2,546} \right) = 15,5$$

Para todos los % C.A. de la granulometría convencional se tiene:

Granulometría 1 CONVENCIONAL			
% C.A.	Gravedad específica seca bulk [Gmb]	Gravedad específica de agregados [Gsb]	% V.A.M.
A	F	Gsb	$100 - (F * (100 - A) / Gsb)$
4	2,241	2,546	15,50
4,5	2,225	2,546	16,53
5	2,255	2,546	15,84
5,5	2,288	2,546	15,05
6	2,282	2,546	15,72

TABLA 4. 54 - Resultado de porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)
Fuente: Elaboración propia

4.6.1.11.3 Porcentaje de Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA), que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, mientras que el VFA solamente abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de VFA se expresa generalmente como un porcentaje.

La ecuación que determina el VFA es la siguiente:

(i-h)/i*100

$$\%VFA = 100 * \frac{VMA - VTM}{VMA} = 100 * \frac{L - K}{L}$$

Dónde:

VFA= Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA.

VMA= Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del total de la mezcla.

VTM= vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Como ejemplo de cálculo para un contenido de 4% de asfalto residual se tiene:

VMA= 15,49

VTM= 6,67

$$\%VFA = 100 * \frac{15,49 - ,67}{15,49} = 57$$

En la Tabla siguiente se presentan los valores obtenidos para los demás contenidos de asfalto residual.

Granulometría 1 CONVENCIONAL				
% C.A.	% C.A.	% V.T.M.	% V.A.M.	% V.T.M.
	A	L	K	(L-K)/L*100
57	4	6,65	15,50	57
53	4,5	7,75	16,53	53
63	5	5,82	15,84	63
75	5,5	4,30	15,05	71
73	6	4,42	15,72	72

TABLA 4. 55 - Resultado de porcentaje de Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.12 Medición de la estabilidad y la fluencia

Para briquetas confeccionadas con cemento asfáltico coloque estas en un baño de agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 a 40 min antes de ensayar.

Limpie completamente la mordaza, la temperatura de esta debe mantenerse entre 21°C y 38°C usando un baño de agua si es necesario lubrique las barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza se deslice nuevamente Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada asegúrese que el dial este firmemente ajustado y en cero.

Saque la probeta del agua y seque cuidadosamente la superficie coloque y centre la probeta en la parte inferior de la mordaza luego coloque la parte superior y centre el conjunto en el aparato de carga.

Aplique carga a la briqueta a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min. Hasta que produzca la falla.

El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida el cual se define como la estabilidad Marshall como el número total de Newtons o libras necesarios para producir falla de la briqueta a 60°C A medida que avanza el ensayo de estabilidad sujete firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía, cuando se produzca la carga máxima, tome la lectura y anótela. Esta lectura es el valor de la fluidez de la briqueta expresada en unidades de 0.25 mm (1/100 pulg.)

El procedimiento completo de estabilidad y fluencia comienza desde el momento en que se retira la briqueta del agua y no debe durar más de 30 s.



**FIGURA 4. 33 - Briquetas en
baño de María**
Fuente: Elaboración propia



**FIGURA 4. 32 Determinación de Estabilidad y
flujo con la Marshall**
Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta un ejemplo, de cómo se convierten las lecturas obtenidas, en los valores verdaderos de estabilidad.

La ecuación de mejor ajuste para el equipo Marshall de S.E.D.E.C.A del anillo de carga es la siguiente:

$$\text{Estabilidad} = (a * \text{Lec. anillo}^3 + b * \text{lec. anillo}^2 + c * \text{lec. anillo} + d) / e * P \quad [\text{Lb}]$$

Dónde: Lectura de anillo (O) = son los valores leídos en el dial.

$$a = 0,000004$$

$$b = -0,0038$$

$$c = 5,55$$

$$d = 11,768$$

$$e = 0,4536$$

P = Corrección por altura

Para el punto de 4% de Cemento asfáltico:

Briqueta 1 → Lectura = 220 → h = 6,30 cm → P = corrección por altura 1,00

Briqueta 2 → Lectura = 230 → h = 6,28 cm → P = corrección por altura 1,00

Briqueta 3 → Lectura = 220 → h = 6,26 cm → P = corrección por altura 1,00

La corrección por altura se obtiene de la siguiente tabla

$$E_{\text{estabilidad}} = 2406,17 \text{ libras}$$

$$E_{\text{estabilidad}} = 2506,70 \text{ libras}$$

$$E_{\text{estabilidad}} = 2408,60 \text{ libras}$$

$$E_{\text{estabilidad promedio}} = \frac{2406,17 + 2506,70 + 2408,60}{3} = 2440,49 \text{ libras}$$

El cálculo del flujo para cada punto con determinado porcentaje de asfalto se obtiene simplemente multiplicando la lectura de cada briqueta por el factor de 0,03937 para convertirlo a 0,01 pulgadas, y luego se promedian los valores de las 3 briquetas.

Para el punto de 4% de Cemento asfáltico:

Briqueta 1 → Lectura = 210 → Flujo $210 \times 0,03937 = 8,27$ [0,01 plg]

Briqueta 2 → Lectura = 200 → Flujo $200 \times 0,03937 = 7,87$ [0,01 plg]

Briqueta 3 → Lectura = 190 → Flujo $190 \times 0,03937 = 7,48$ [0,01 plg]

$$\text{Flujo promedio} = \frac{8,27 + 7,87 + 7,48}{3} = 7,87 \text{ [0,01 plg]}$$

Estabilidad [Lb]				Flujo [0,01]	
Lectura de anillo	altura de briqueta [cm]	correccion alt.	Carga [libras]	Lectura de anillo	Flujo [0,01 pulg]
N	O	P	Q	R	S
			Ecuacion (1)		$R*0,0394$
220	6,30	1,00	2406,17	210,0	8,27
230	6,28	1,00	2506,7	200,0	7,87
220	6,26	1,00	2408,6	190,0	7,48
			2440,49		7,87
240	6,32	1,00	2601,82	240,0	9,45
230	6,22	1,00	2504,2	220,0	8,66
220	6,19	1,04	2502,4	230,0	9,06
			2536,15		9,06
240	6,24	1,04	2705,89	250,0	9,84
235	6,18	1,09	2782,9	260,0	10,24
230	6,17	1,09	2729,6	250,0	9,84
			2739,45		9,97
250	6,18	1,09	2941,91	280,0	11,02
250	6,20	1,04	2756,5	280,0	11,02
245	6,17	1,09	2836,0	280,0	11,02
			2844,79		11,02
220	6,18	1,09	2622,73	300,0	11,81
240	6,18	1,09	2836,0	290,0	11,42
230	6,20	1,04	2604,4	285,0	11,22
			2687,70		11,48

TABLA 4. 56 - Resultado de Estabilidad y flujo de Granulometría 1 Convencional

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.13 Determinación del Óptimo Contenido de Asfalto

Método 1.- El procedimiento NAPA, en TAS 14

1. Determine el contenido de asfalto correspondiente a la medida especificada del contenido de vacíos (4% típicamente). Este es el óptimo contenido de asfalto.
2. Determine las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:
 - ✓ Estabilidad Marshall
 - ✓ Flujo
 - ✓ Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
 - ✓ Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA
3. Compare cada uno de estos valores de especímenes y si todos tiene el rango especificado, entonces el óptimo contenido de asfalto determinado es satisfactorio. Si algunas de estas propiedades está fuera del rango de especificaciones, la mezcla debe ser rediseñada.

Método 2.- Método del Instituto del Asfalto en MS-2

1. Determine: (a) contenido de asfalto en la estabilidad máxima
 - 1.1 contenido de asfalto en la densidad máxima
 - 1.2 contenido de asfalto en el punto medio del rango de volúmenes de aire especificado (4% típicamente)
2. Promediar los tres contenidos de asfaltos seleccionados
3. Para el promedio del contenido de asfalto, vea la curva planteada y determine las siguientes propiedades:
 - ✓ Estabilidad Marshall
 - ✓ Flujo
 - ✓ Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VAM
 - ✓ Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA
4. Comparar los valores del paso 3 con criterio para ser aceptado según el siguiente cuadro:

De los dos métodos propuestos, se elige la primera con objeto de comparar las propiedades volumétricas de las granulometrías propuestas para un porcentaje de vacíos de aire de 4% como parámetro ideal.

4.6.2 Método de Diseño Marshall con Polímero

4.6.2.1 Objetivo

- ✓ Determinar las relaciones volumétricas por el Método Marshall para mezclas asfálticas con polímero SBS al 2.5% de modificación con polímero del asfalto 85-100 de las granulometrías estudiadas en la sección anterior el contenido óptimo de asfalto de las mismas.

4.6.3.2 Resumen del método

- ✓ El procedimiento consiste en la elaboración de briquetas (probetas cilíndricas de 101.6 mm. de diámetro y 63.5 mm. de altura, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall determinando su estabilidad y flujo.
- ✓ Se determinará Gravedad específica de la mezcla compactada, porcentaje de vacíos de las mezclas, porcentaje de vacíos de agregado mineral, porcentaje de vacíos llenos de asfalto. Cabe señalar que solo hará un ensayo por granulometría de acuerdo a su porcentaje óptimo de cemento asfáltico de cada una de las estructuras granulares propuestas con el fin de comparar el comportamiento volumétrico de las mezclas asfálticas con polímero.
- ✓ La caracterización de sus propiedades se señaló en la sección anterior, para trabajar en la planilla Marshall como dato inicial es la densidad de 1,004 g/cm³

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA MÉTODO MARSHALL

Gravedad específica del C.A. (Ga) 1,008 Cemento Asfáltico 85-100 Ipiranga
 Gravedad específica bulk agregado(Gsb) 2,546 Granulometría 1 CONVENCION.

% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)					Gravedad Teorica Maxima (Gmm)				Porcentaje de Vacios			Lectura de anillo
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm ³]	Gravedad esp. bulk	Peso de muestra [g]	Peso de frasco + agua [g]	P. frasc.+ muestra+ agua [g]	Gravedad Teorica max.	%VTM (Vacios en Total de	%VAM (Vacios en Agregado	%VLA (Vacios llenos con asfalto)	
A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
					C-D	B/E				G/(G+H-I)	100*(J-F)/J	(F*(100-A)/Gsb)	L-K/LI*100	
4,00	1	195,1	193,1	649,2	543,9	2,197								220
	2	198,2	194,2	664,8	539,4	2,221								230
	3	197,7	190,4	680,5	519,9	2,304	195,3	527,13	5968,6	2,400				220
		Promedio				2,241				2,400	6,65	15,50	57	
4,50	4	192,4	197,4	661,6	535,8	2,225								240
	5	188,0	190,0	659,3	530,7	2,239								230
	6	190,3	198,3	659,9	538,4	2,211	190,2	527,13	5968,0	2,412				220
		Promedio				2,225				2,412	7,75	16,53	53	
5,00	7	192,4	196,2	668,6	527,6	2,260								240
	8	188,0	186,2	656,1	530,1	2,241								235
	9	190,0	194,0	668,4	525,6	2,264	192,6	527,13	6112,5	3,394				230
		Promedio				2,255				2,394	5,82	15,84	63	
5,50	10	183,3	186,3	675,2	511,1	2,315								250
	11	183,6	186,6	665,7	520,9	2,272								245
	12	181,5	184,5	665,7	518,8	2,278	192,9	527,13	6111,3	3,380				240
		Promedio				2,288				2,391	4,30	15,05	71	
6,00	13	174,2	177,2	662,4	514,8	2,281								220
	14	178,4	181,4	664,3	517,1	2,279								240
	15	175,3	178,3	664,4	518,9	2,287	195,0	527,13	5965,8	2,388				230
		Promedio				2,282				2,388	4,42	15,72	72	

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA MÉTODO MARSHALL

Gravedad específica del C.A. (Ga) 1,008 Cemento Asfáltico 85-100 Ipiranga
 Gravedad específica bulk agregado(Gsb) 2,572 Granulometría 1 SUPERPAVE

% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)					Gravedad Teorica Maxima (Gmm)				Porcentaje de Vacios			Lectura de anillo
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm ³]	Gravedad esp. bulk	Peso de muestra [g]	Peso de frasco + agua [g]	P. frasc.+ muestra+ agua [g]	Gravedad Teorica max.	%VTM (Vacios en Total de	%VAM (Vacios en Agregado	%VLA (Vacios llenos con asfalto)	
A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
					C-D	B/E				G/(G+H-I)	100*(J-F)/J	(F*(100-A)/Gsb)	L-K/LI*100	
4,00	1	195,1	195,1	662,0	533,1	2,242								230
	2	199,2	199,2	665,0	534,2	2,245								250
	3	197,7	1201,4	667,2	534,2	2,242	197,5	527,13	5982,0	2,460				236
		Promedio				2,272				2,460	7,64	15,20	50	
4,50	4	191,4	196,4	674,0	522,4	2,281								220
	5	188,0	188,3	670,0	518,3	2,292								210
	6	194,2	197,2	674,4	523,2	2,283	196,7	527,13	5977,9	2,442				230
		Promedio				2,285				2,442	7,64	15,20	50	

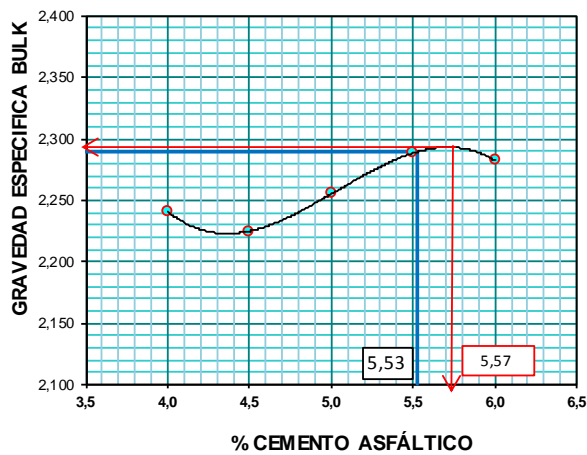
DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA MÉTODO MARSHALL

Gravedad específica del C.A. (Ga) 1,008 Cemento Asfáltico 85-100 Ipiranga
 Gravedad específica bulk agregado(Gsb) 2,564 Granulometría 3 SUPERPAVE DE

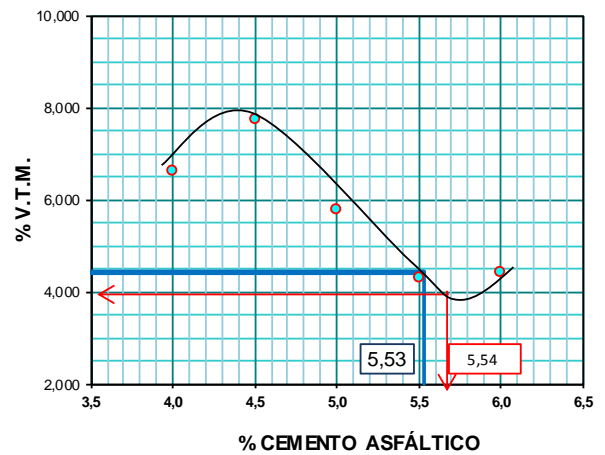
% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)					Gravedad Teorica Maxima (Gmm)				Porcentaje de Vacios			Lectura de anillo
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm3]	Gravedad esp. buk	Peso de muestra [g]	Peso de frasco + agua [g]	P. frasc.+ muestra+ agua [g]	Gravedad Teorica max.	%VTM (Vacios en Total de	%VAM (Vacios en Agregado	%VLA (Vacios llenos con asfalto)	
A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
					C-D	B/E				G/(G+H-I)	100*(J-F)/J	(F*(100-A)/Gsb)	L-K/L*100	
4,00	1	185,1	183,1	673,5	519,6	2,300								230
	2	188,2	1204,2	678,8	525,4	2,281								250
	3	187,7	1200,4	686,5	513,9	2,331	187,4	5271,3	5981,4	2,457				240
		Promedio				2,304				2,458	6,29	13,75	54	
4,50	4	182,4	186,4	685,1	511,3	2,332								250
	5	188,0	1810	685,2	505,8	2,349								250
	6	180,3	189,3	684,1	515,2	2,310	186,4	5271,3	5947,7	2,301				245
		Promedio				2,330				2,440	4,50	13,21	66	
5,00	7	182,4	187,2	689,8	507,4	2,350								230
	8	188,0	186,7	687,4	499,3	2,379								200
	9	180,0	187,0	686,4	500,6	2,377	185,3	5271,3	5977,0	2,442				260
		Promedio				2,369				2,422	2,20	12,24	82	
5,50	10	183,3	186,3	676,0	510,3	2,319								240
	11	183,6	186,6	688,0	498,6	2,374								245
	12	181,5	184,5	685,0	499,5	2,366	185,4	5271,3	5969,4	2,404				230
		Promedio				2,353				2,404	2,14	13,29	84	

TABLA 4. 59 - Cuadro resumen diseño de mezcla asfáltica, Granulometría SUPERPAVE de má
DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL
GRANULOMETRIA 1: CONVENCIONAL C.A. 85-100 Ipiranga

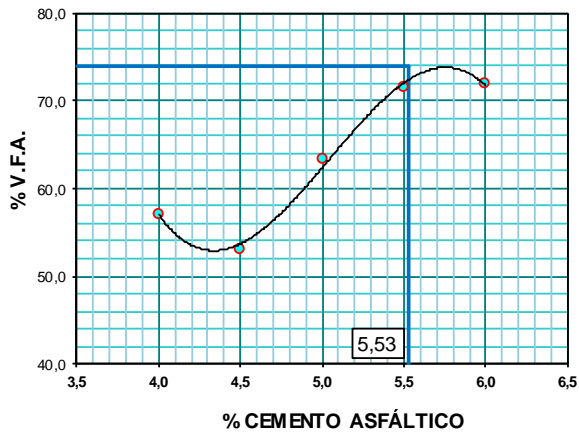
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK VS. % C. ASFÁLTICO



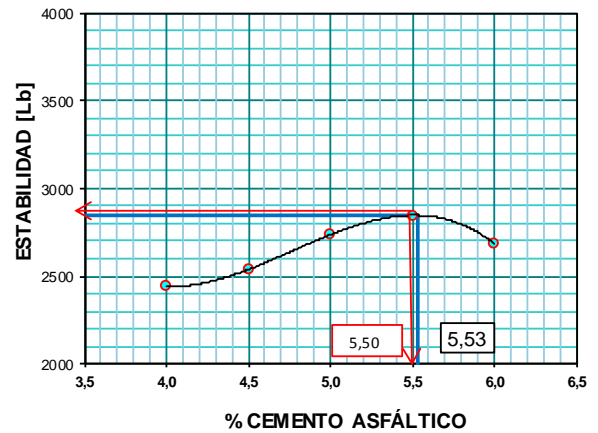
% VACIOS TOTAL EN MEZCLA VS. % C. ASFÁLTICO



% VACIOS LLENOS CON ASFALTO VS. % C. ASFÁLTICO

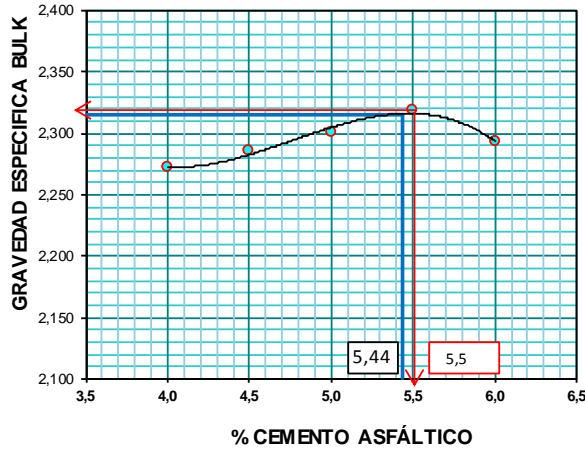


ESTABILIDAD VS. % C. ASFÁLTICO

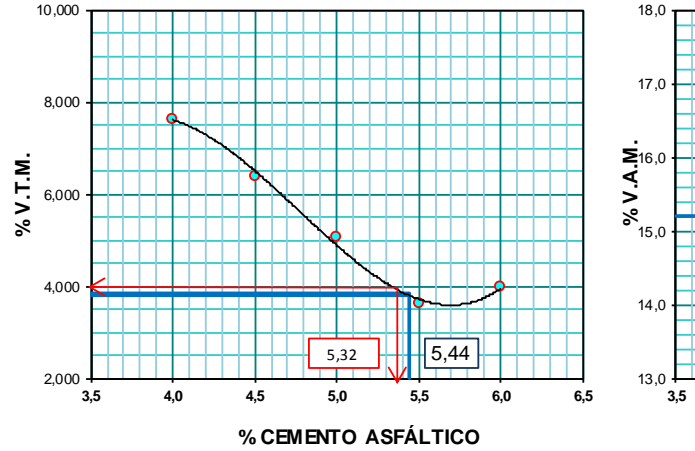


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA METODO MARSHALL
GRANULOMETRIA 2: SUPERPAVE C.A. 85-100 Ipiranga

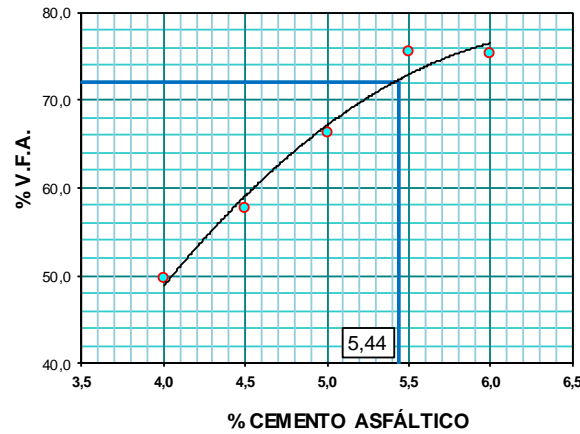
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK VS. % C. ASFÁLTICO



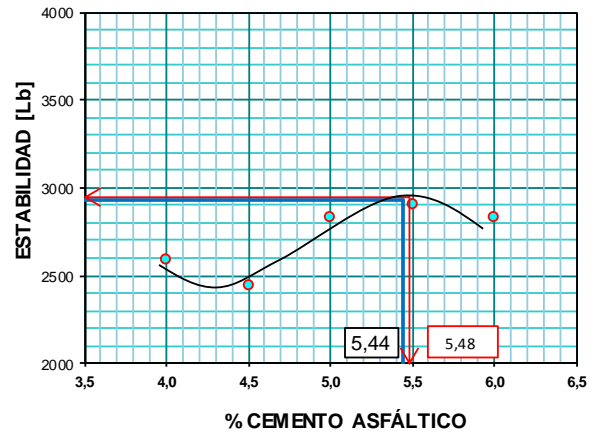
% VACIOS TOTAL EN MEZCLA VS. % C. ASFÁLTICO



% VACIOS LLENOS CON ASFALTO VS. % C. ASFÁLTICO

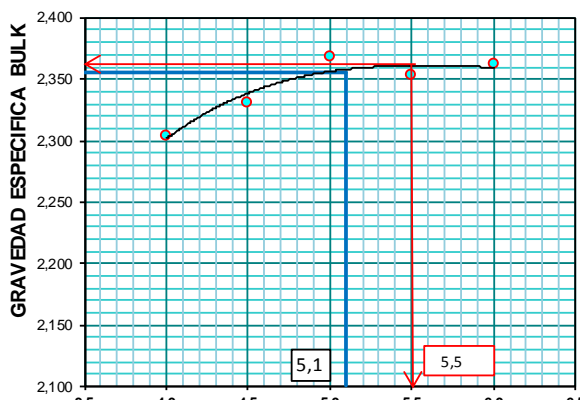


ESTABILIDAD VS. % C. ASFÁLTICO

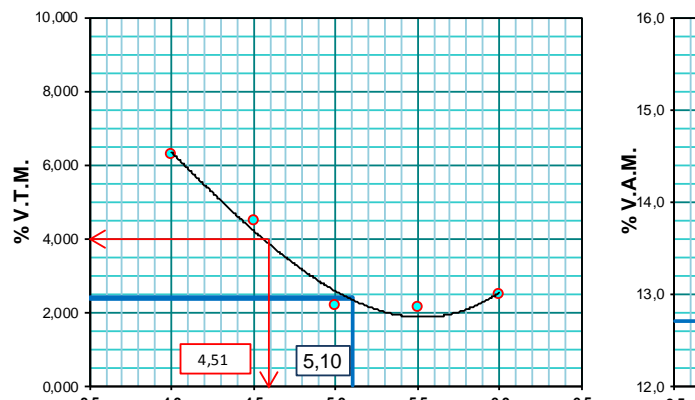


GRAFICA 4. 13 - Relaciones volumétricas de la granulometría SUPERPAVE
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA METODO MARSHALL
GRANULOMETRIA 3: SUPERPAVE MAX. DENSIDAD C.A.

GRAVEDAD ESPECIFICA BULK VS. % C. ASFÁLTICO



% VACIOS TOTAL EN MEZCLA VS. % C. ASFÁLTICO



GRAFICA 4. 14 - Relaciones volumétricas de la granulometría SUPERPAVE de ma

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA CON POLÍMERO MÉTODO MA

Gravedad específica del C.A. (Ga) 1,004 Cemento Asfáltico 85-100 Modifi
 Gravedad específica bulk agregado(Gsb) 2,546 Granulometria 1 CONVENCIO

% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica a Bulk (Gmb)					Gravedad Teorica Maxima (Gmm)				Porcentaje de Vacios				Lectura de anillo
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm ³]	Gravedad esp. bulk	Peso de muestra [g]	Peso de frasco + agua [g]	P. frasco+ muestra+ agua [g]	Gravedad Teorica max.	%VTM (Vacios en Total de Mezclas)	%VAM (Vacios en Agregado Mineral)	%VLA (Vacios llenos con asfalto)		
5,53	1	195,1	193,1	6712	5219	2,290									360
	2	198,2	202,2	6712	5310	2,256									380
	3	199,7	200,4	687,1	513,3	2,337	198,2	5271,3	5971,3	2,405					370
Promedio						2,294				2,405	4,58	14,85	69		

Gravedad específica del C.A. (Ga) 1,004 Cemento Asfáltico 85-100 Modifi
 Gravedad específica bulk agregado(Gsb) 2,572 Granulometria 2 SUPERPAVE

% de C.A.	BRIQUETA	Gravedad Especifica a Bulk (Gmb)					Gravedad Teorica Maxima (Gmm)				Porcentaje de Vacios				Lectura de anillo
		Peso al aire [g]	Peso s.s.s [g]	Peso en agua [g]	Volumen [cm ³]	Gravedad esp. bulk	Peso de muestra [g]	Peso de frasco + agua [g]	P. frasco+ muestra+ agua [g]	Gravedad Teorica max.	%VTM (Vacios en Total de Mezclas)	%VAM (Vacios en Agregado Mineral)	%VLA (Vacios llenos con asfalto)		
5,44	4	192,4	197,4	683,4	514,0	2,320									390
	5	198,0	190,0	680,3	509,7	2,331									380
	6	190,3	198,3	682,9	515,4	2,309	195,4	5271,3	6444,1	2,426					395
Promedio						2,321				2,420	4,09	13,78	70		

TABLA 4. 60 - Cuadro resumen de diseño de mezcla asfáltica con polímero de las tres granulomet

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Granulometría Convencional

Contenido de asfalto en la densidad máxima	= 5,57 %
Contenido de asfalto en la máxima estabilidad	= 5,51 %
Contenido de asfalto volúmenes de hueco de aire especificado 4%	=5,50 %
PROMEDIO % C.A.	= 5,53%

Granulometría SUPERPAVE

Contenido de asfalto en la densidad máxima	= 5,5 %
Contenido de asfalto en la máxima estabilidad	= 5,32 %
Contenido de asfalto volúmenes de hueco de aire especificado 4%	=5,49 %
PROMEDIO % C.A.	= 5,44%

Granulometría SUPERPAVE de máxima densidad

Contenido de asfalto en la densidad máxima	= 5,5 %
Contenido de asfalto en la máxima estabilidad	= 4,5 %
Contenido de asfalto volúmenes de hueco de aire especificado 4%	=5,2 %
PROMEDIO % C.A.	= 5,10 %

4.8 ANALISIS DE RESULTADOS

Verificar la caracterización de los materiales pétreos de acuerdo a las especificaciones de las mismas y posteriormente verificar el control de calidad del asfalto convencional y con polímero y si mismo comparar los resultados.

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas con asfalto convencional se dispone de la gradación de áridos de granulometría convencional y las granulometrías SUPERPAVE.

Posteriormente se evalúa las propiedades volumétricas de mezcla asfáltica con asfalto convencional y asfalto modificado con polímero, con las mismas granulometrías mencionadas anteriormente, para realizar un análisis comparativo de resultados, que el

mismo que es importante para determinar las mejoras de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional, para el efecto de análisis se realizaron tablas y gráficos que muestran la diferencia de resultados entre las mezclas.

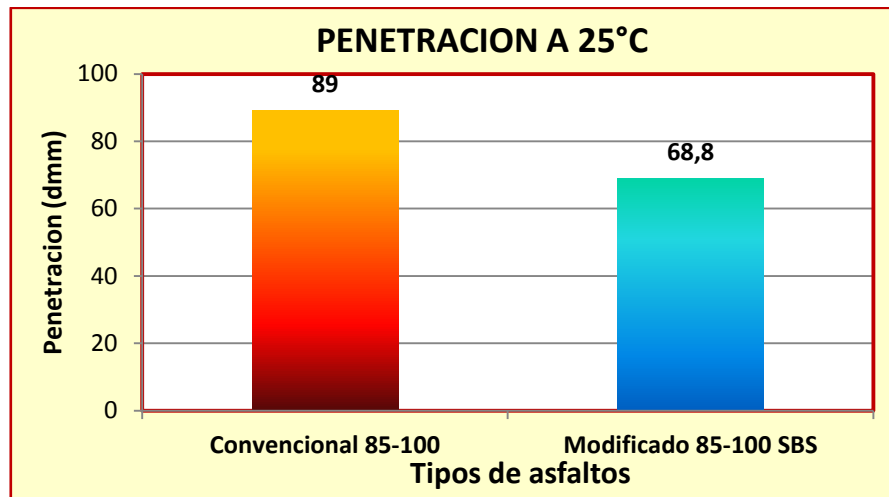
Además de disponer de la información suficiente para que el análisis de resultados sea confiable, se fabricaron 45 briquetas Marshall en la mezcla convencional, 15 briquetas por las granulometrías (Granulometría convencional, Superpave y Superpave de máxima densidad), 3 briquetas por punto y 5 puntos por granulometría; para cada biqueta se determina las relaciones volumétricas estabilidad y flujo. Para el análisis de la mezcla modificada se fabricaron 9 briquetas Marshall, las mismas que fueron elaboradas con la información del contenido óptimo de asfalto de las granulometrías convencionales y por eso solo se dispuso un punto por granulometría y 3 briquetas por el punto.

4.8.1 Caracterización de los materiales pétreos

Los materiales pétreos que se utilizaron para la elaboración de la mezcla asfáltica provienen de banco de materiales “San José Charaja”, ubicado en el valle concepción del departamento de Tarija, presenta la roca triturada seleccionada en tres fuentes de áridos, grava $\frac{3}{4}$ ”, gravilla de $\frac{3}{8}$ ” y arena. Se ensayaron los siguientes pruebas: Angularidad de agregado grueso, partículas planas - alargadas, equivalente de arena, desgaste de los ángeles, Intemperismo acelerado, gravedad específica de agregado grueso, absorción de agregado grueso, gravedad específica de agregado fino y absorción de agregado fino ,un total de 9 ensayos las cuales cumple con las especificaciones estándares.

4.8.2 Caracterización de cemento asfáltico

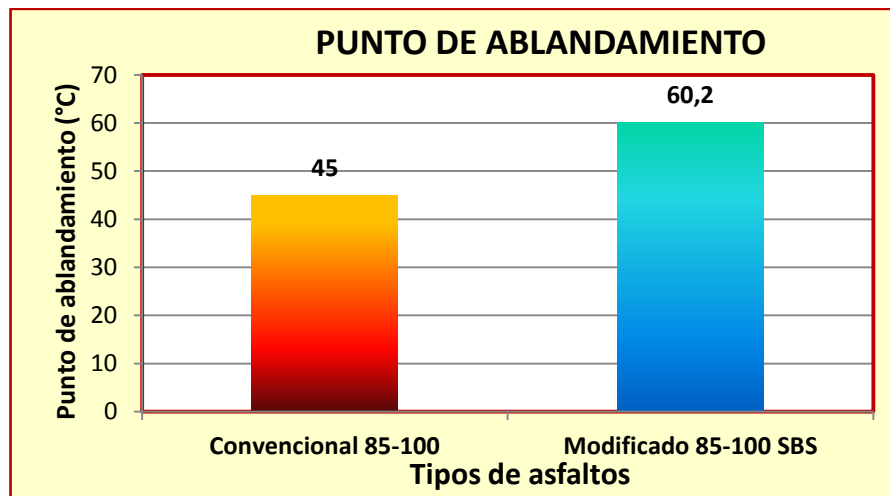
A continuación se presentan gráficas de las propiedades más significativas de los cementos asfálticos evaluados.



GRAFICA 4. 15 – Penetración de los asfaltos

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.15 se observa que el asfalto modificado con polímero SBS es más viscoso; se reduce en 22,7 % de la penetración convencional, mejorando de propiedad de consistencia de termoplástica.

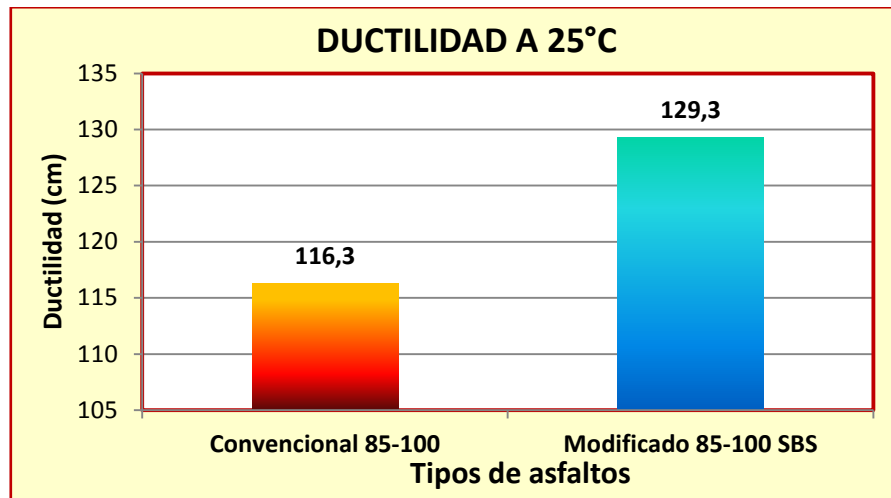


GRAFICA 4. 16 – Punto de ablandamiento de los asfaltos

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.16 se constata que la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos, la convencional a los 45°C y la modificada a 60°C, esto indica que el modificado es

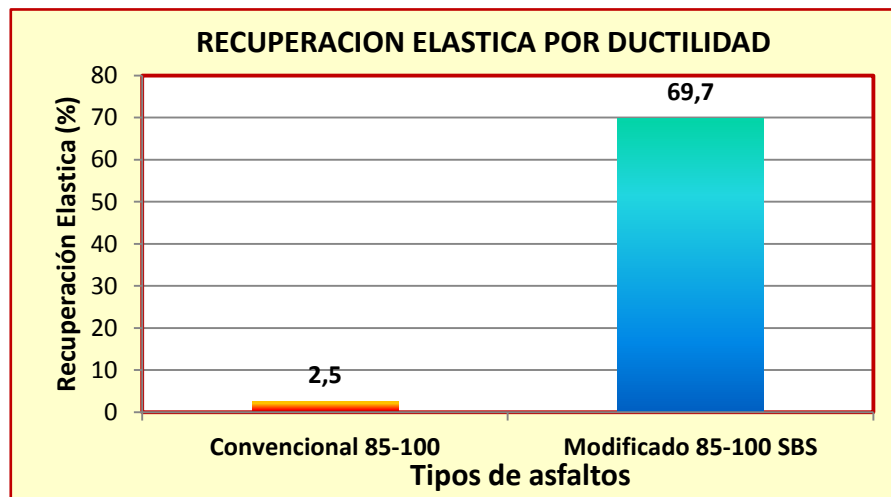
menos susceptible a la temperatura con un incremento de 25,5 % respecto a la convencional.



GRAFICA 4. 17 – Ductilidad de los asfalto

Fuente: Elaboración propia

La ductilidad es la propiedad en que los asfaltos, bajo la acción de una fuerza se deforman plásticamente hasta la ruptura, se observa en el grafico 4.17 un incremento relativo de 10,5 % de ductilidad convencional a modificada.



GRAFICA 4. 18 – Recuperación elástica de los asfaltos

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.18 se observa que el asfalto convencional no tiene recuperación elástica, el 2,5% no es significativo. La recuperación elástica de 69,7% del asfalto modificado es la pruebas significativa en comparación a la convencional tiene un incremento de 96,4%.

Es de conocimiento que el envejecimiento o endurecimiento de los asfaltos ocurre durante los procesos de mezclado y colocación de las mezclas se entiende como envejecimiento a corto plazo, la prueba que simula esta característica es la película delgada TFOT, como es muestra en el siguiente cuadro.

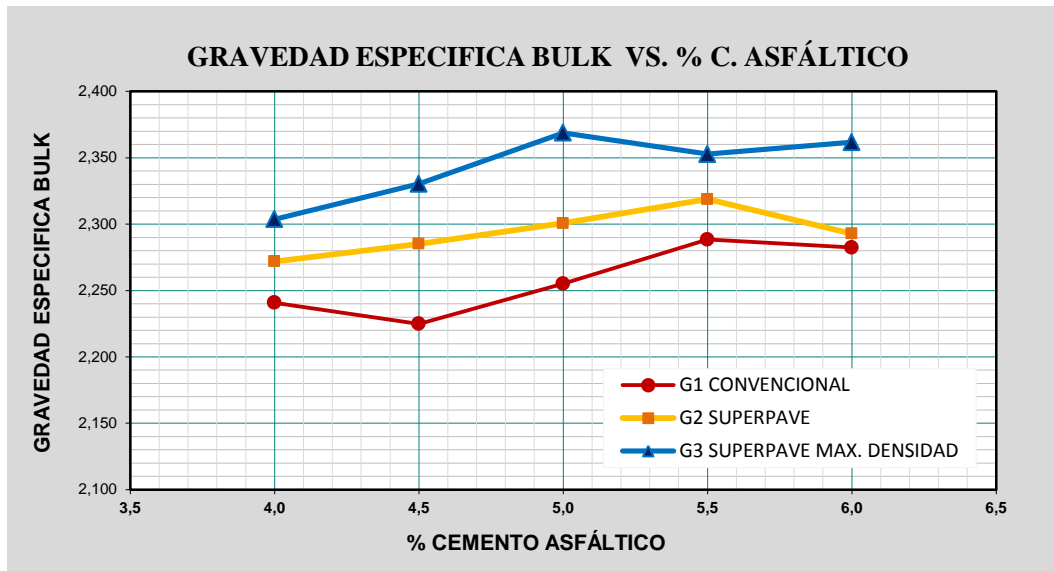
% Perdida por peso	0,18	0,25
% perdida por penetracion	28,3	21,6
% pérdida por ductilidad	22,69	16,1

TABLA 4. 61 – Perdidas de peso, penetración y ductilidad

Fuente: Elaboración propia

4.8.3 Comparación de propiedades volumétricas mezcla asfáltica convencional

Los valores de estos análisis se representan en siguiente orden: 1 Gravedad específica seca compactada (Gmb); 2 Porcentajes de vacíos de aire (V.T.M.); 3 Porcentajes de vacíos en el agregado mineral (V.A.M); 4 Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (V.F.A); 5 Estabilidad (Lb) y 6 Fluencia (0,01 Plg.). Los puntos que representan los diferentes valores son conectados mediante líneas para formar líneas suaves.

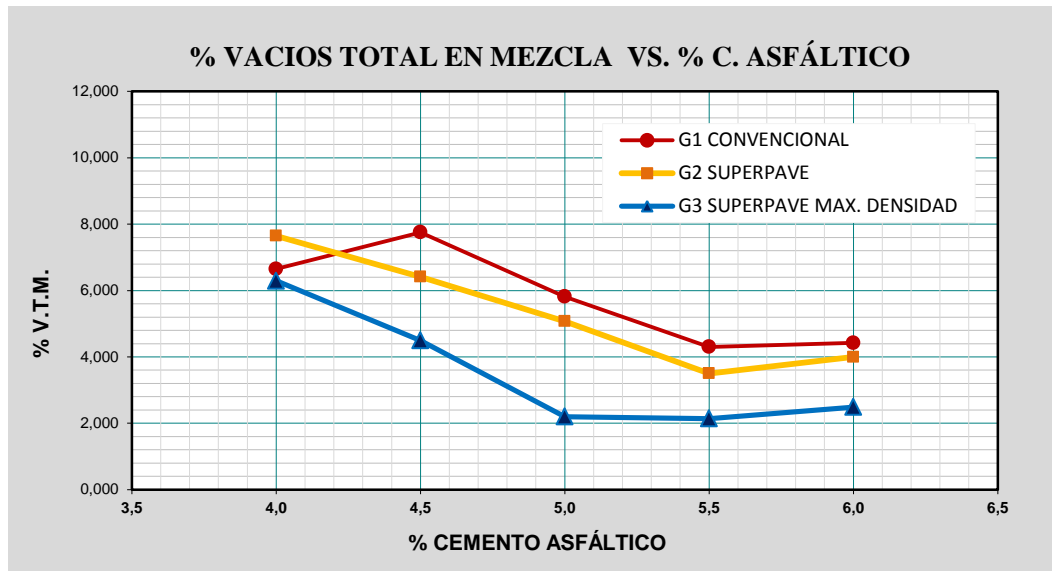


GRAFICA 4. 19 – Comparaciones volumétricas de Gravedades específicas

Fuente: Elaboración propia

Gravedad específica: Se observa del gráfico 4.19 que de acuerdo a la variación del porcentaje de cemento asfáltico en las granulometrías propuestas, esta aumenta desde 2,220 hasta un cierto porcentaje de asfalto 2,370 luego tiende a disminuir hasta 2,250.

Las gravedades específicas son diferentes, la granulometría Superpave de máxima densidad presenta valores de densificaciones mayores con un máximo de 2,375 y posteriormente la granulometría Superpave se sitúa en la intermedia con valor máximo de 2,320 y la Convencional con menores densidades hasta alcanzar 2,280, por lo tanto la Granulometría Superpave tiene mejor densidad. Como se mencionó en el fundamento teórico si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable, pero si la densidad es baja los vacíos son mayores, por tanto la mezcla compactada será vulnerable al agua.



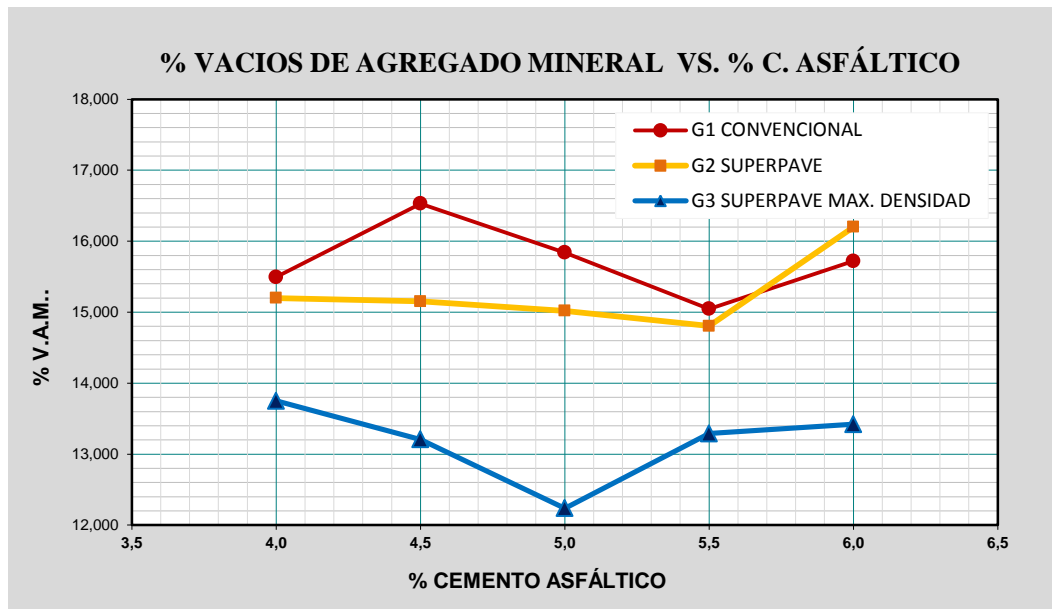
GRAFICA 4. 20 – Comparación de porcentaje de vacíos mezcla convencional

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de vacíos de aire: Los valores de vacíos de aire para las granulometrías deben estar dentro de los parámetros considerados de 3-5 % de vacíos, se puede apreciar que la granulometría convencional para los porcentaje de cemento asfáltico presenta valores superiores y un máximo de 7,6% y mínimo de 4,1%; la granulometría Superpave se sitúa en labores medios con un máximo de 7,6% y mínimo de 3,4% , la Granulometria de Superpave de máxima densidad tiene un vacío insuficientes los tres puntos finales tiene 2,2% de no cumple con la especificación.

Con relación al fundamento teórico la permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.



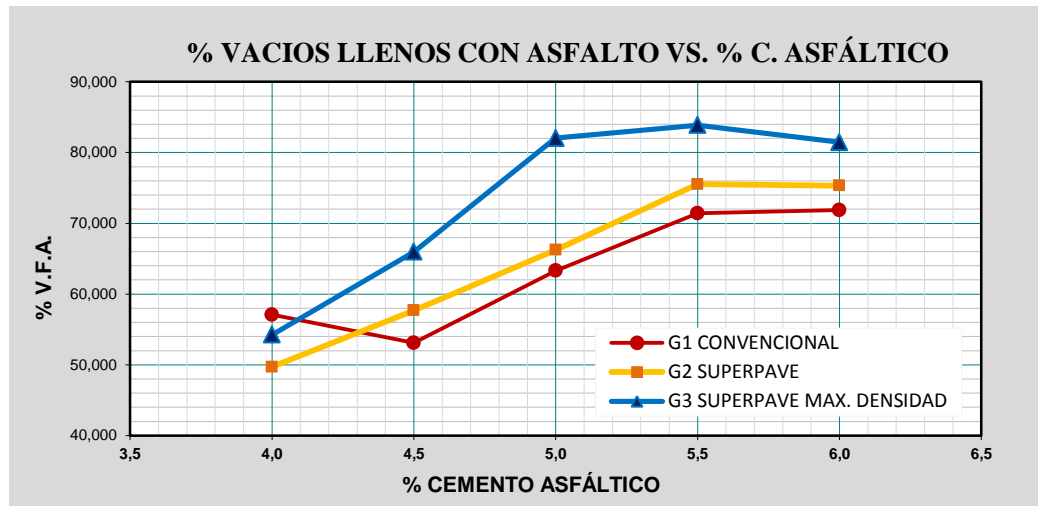
GRAFICA 4. 21 - Comparación de porcentaje de vacíos de agregado mezcla convencional

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de vacíos de agregado mineral: Para el caso particular la granulometría Convencional situada en la parte superior con máximo de 15,5 % y Superpave en la parte intermedia con máximo 16,2% ; la granulometría Superpave de máxima densidad menos vacíos intergranulares presenta una curva por debajo de la especificación 13% y un valor mínimo de 12,2%

Cuando el fondo de la curva VMA en forma de U cae por debajo del nivel del criterio mínimo requerido para el tamaño del agregado máximo nominal, ésta es una indicación de que se necesitará realizar cambios en las fórmulas de trabajo. (*Aspectos volumétricos de mezcla asfáltica caliente, Paul Garnica, Mexico-2004*).

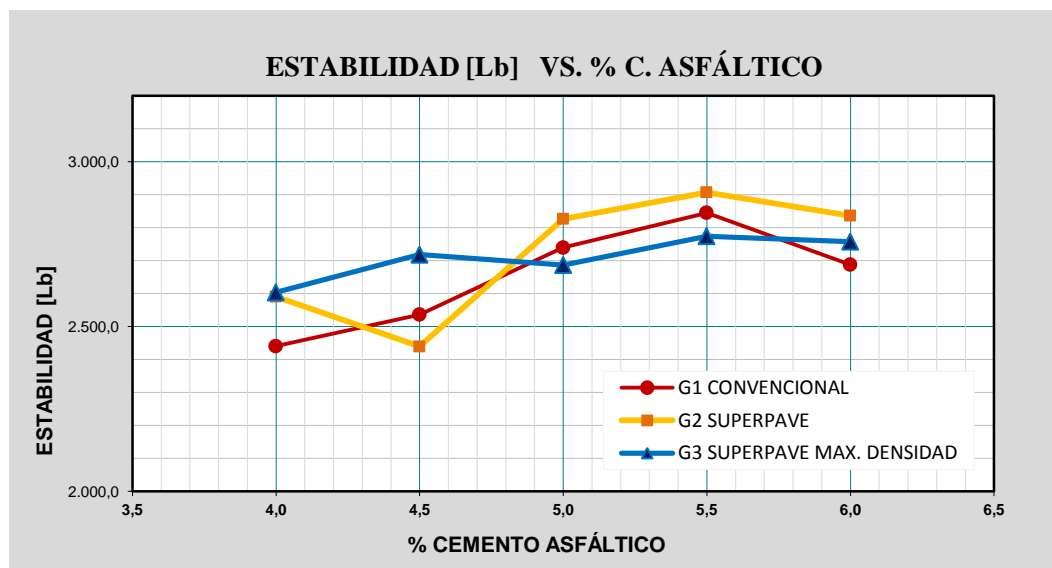
Cuando la curva VMA, en forma de U es muy plana, significando que las mezclas compactadas no son tan sensibles al contenido del asfalto en este rango como algunos otros factores. En el rango normal de los contenidos de asfalto, la compatibilidad es más influenciada por las propiedades de los agregados y propiamente de la gradación de las mismas. (*Aspectos volumétricos de mezcla asfáltica caliente, Paul Garnica, Mexico-2004*).



GRAFICA 4. 22- Comparación de porcentaje de vacíos llenos con asfalto

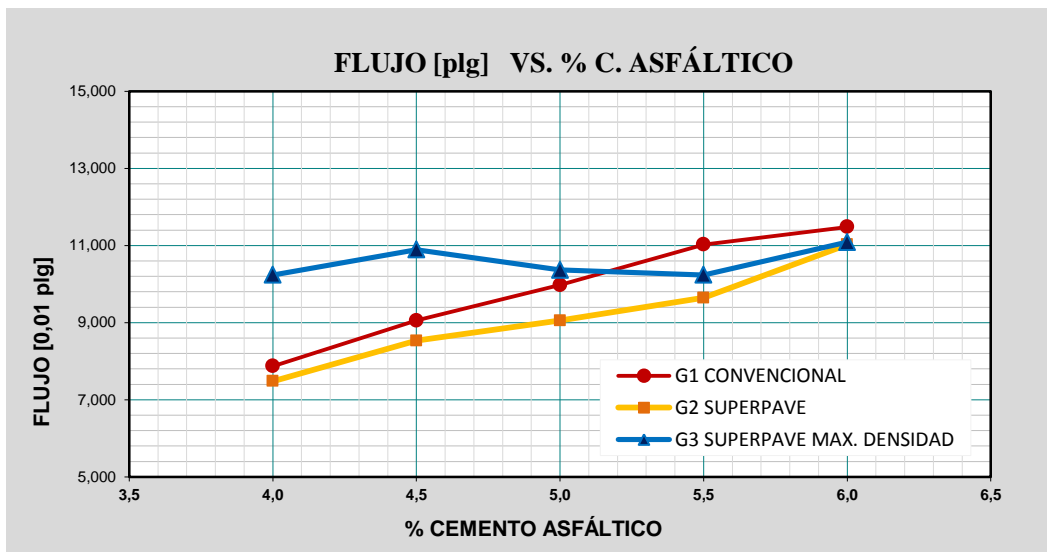
Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de vacíos llenos con asfalto: Estos valores son un reflejo de las demás propiedades volumétricas, ya que al haber mayor densificación de una probeta asfáltica se reducen los vacíos intergranulares y por lo tanto para un contenido de asfalto dado se tiene un menor grado de saturación; en ese sentido la granulometría Superpave de máxima densidad se ubica en la parte superior con máximo de 84%, Superpave en la parte intermedia con máximo de 75% y la convencional en la parte inferior con máximo de 72%.



GRAFICA 4. 23 – Comparación de estabilidades mezcla convencional

La estabilidad: La medición de estabilidad y flujo Marshall tiene la función de evaluar la resistencia a la deformación que presenta la mezcla asfáltica, la resistencia se debe principalmente a las propiedades del agregado mineral y el cemento asfáltico, en el gráfico 4.23 se observa que la granulometría Superpave de máxima densidad tiene una tendencia de estabilidad constante de 2700 Lb con respecto al contenido de asfalto, el esqueleto granular generado por la granulometría convencional alcanza una máxima de 2850 Lb y la de mejor tendencia es la granulometría Superpave alcanzando una máxima de 2900 Lb.



GRAFICA 4. 24 – Comparación de flujos en mezclas convencionales

Fuente: Elaboración propia

El flujo: propiamente es medido en centésimas de pulgada, lo cual representa la deformación de la briqueta, la deformación indica por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. En la gráfica 2.24 se observa deformación constante de 10 a 11 centésimas de pulgadas en la granulometría Superpave de máxima densidad; la granulometría convencional alcanza una deformación máxima de 11,4 centésimas de pulgadas y Superpave de 11 centésimas de pulgadas.

Estabilidades muy altos no implican que la mezcla tenga mayor durabilidad durante la operación, por el contrario valores de flujo bajos y de estabilidad muy alto producen pavimentos frágiles y rígidos. (*Diseño de mezclas Caliente Sirie de manuales N° 22. Asphalt Institute*)

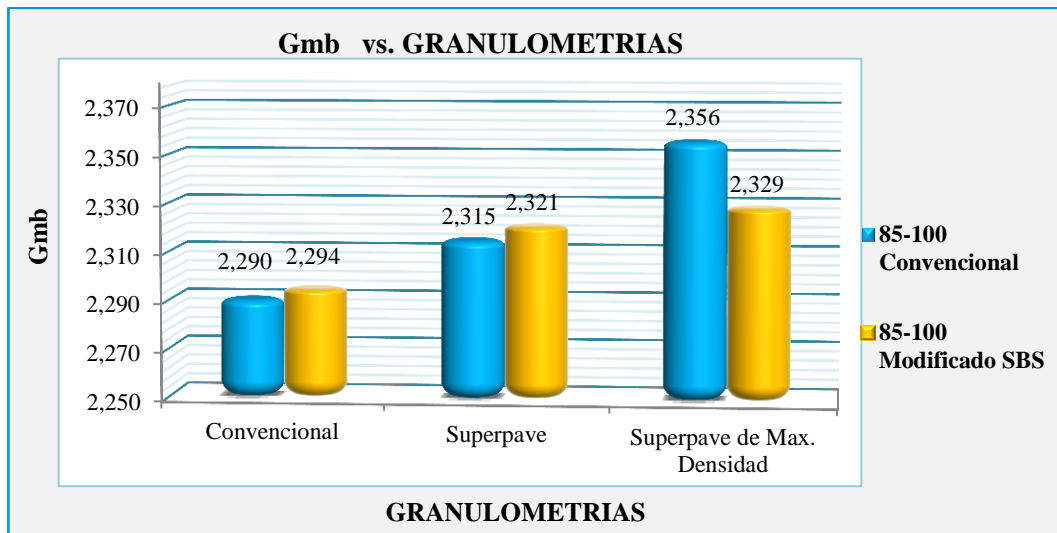
Propiedades volumétricas	G1	G2	G3	Especificación
	Convencional	Superpave	Superpave de max. Den.	
% V.T.M.	4,45	3,85	2,40	3-5 %
Gmb	2,29	2,315	2,356	-----
% V.A.M.	15,62	15,2	12,7	> 13 %
% V.F.A.	74	72	82	65- 75%
Estabilidad [Lb]	2850	2930	2750	>1800 [Lb]
Flujo [0,01 plg]	9,8	10,7	10,48	8-14 [0,01plg]
Contenido óptimo C.A.	5,53	5,44	5,1	< 6%

TABLA 4. 62 – Resumen de las propiedades volumétricas de diseño mezclas convencionales

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las especificaciones de mezclas compactadas por el procedimiento Marshall, se constata que la granulometría Superpave es el diseño más adecuado en término medio de las especificaciones, la granulometría convencional cumple con las especificaciones pero algunos valores como 74 % vacíos llenos con asfalto está en la frontera de los límites y la granulometría de Superpave de máxima densidad no cumple con la especificación de vacíos.

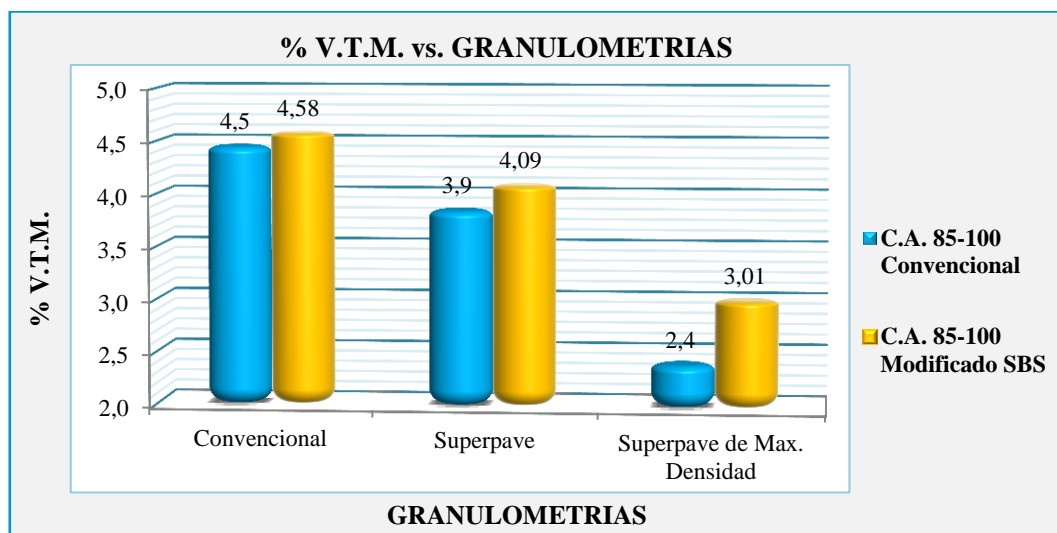
4.8.4 Comparación de propiedades volumétricas de mezcla asfáltica con asfalto convencional y asfalto con polímero.



GRAFICA 4. 25 – Gravedades específicas en mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

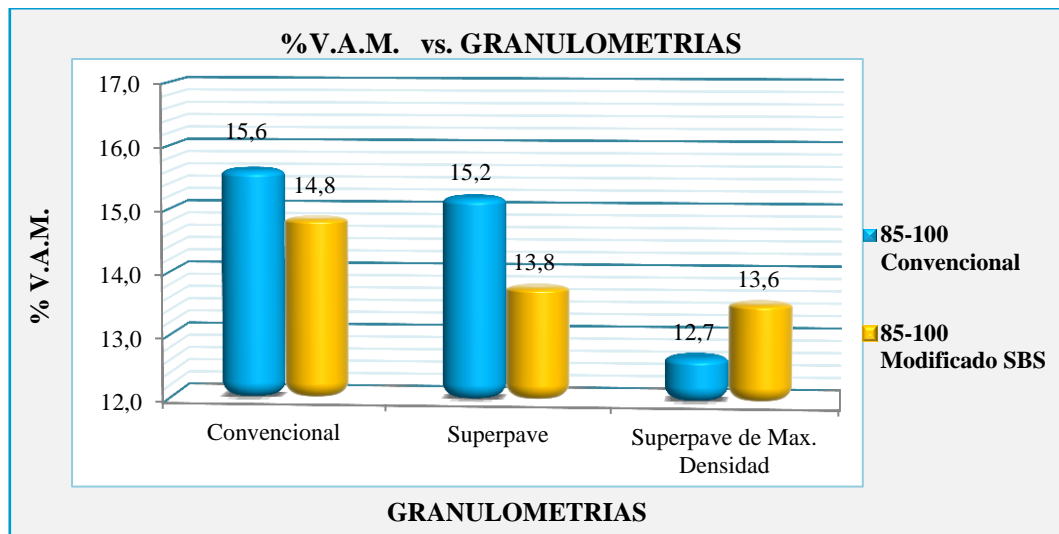
En el gráfico 4.25 se puede observar que efectivamente la granulometría Superpave de máxima densidad en la mezcla asfáltica, con asfalto convencional y con polímero mayor densidad de 2,356 y 2,329 respectivamente. Luego la granulometría de Superpave con 2,315 y 2,321 y finalmente la granulometría convencional con densidad menor de 2,290 y 2,294.



GRAFICA 4. 26 – Porcentajes de vacíos de aire en las mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

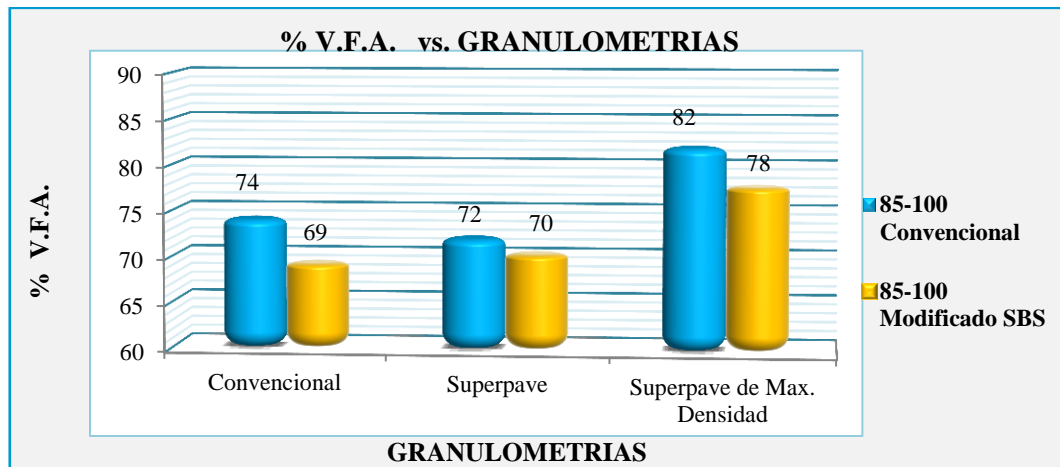
La mezcla asfáltica con asfalto con polímero tiene una variación gradual de decremento pero mayores a las mezclas con asfalto convencional, la granulometría convencional tiene mayor porcentaje de 4,5 % y 4,58% vacíos de aire en la mezcla convencional y modificado respectivamente, seguidamente la granulometría Superpave de 3,9% y 4,09% vacíos de aire y finalmente Superpave de máxima densidad de 2,4% y 3,01% vacíos de aire.



GRAFICA 4. 27 – Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral en mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

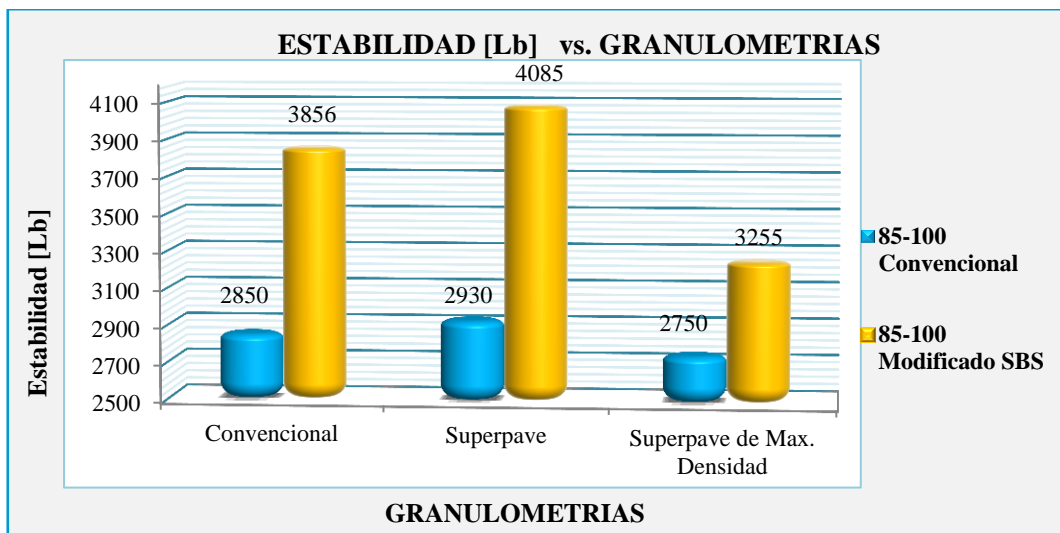
El valor mínimo de % V.A.M. especificado es 13 para mezclas asfálticas, la granulometría convencional tiene 15,6% y 14,8 % de vacíos de agregado mineral con asfalto convencional y asfalto modificado respectivamente cumple con la especificación. La granulometría Superpave de 15,2% y 13,8% cumple con la especificación. La gradación de Superpave de máxima densidad tiene 12,7% vacíos de agregado mineral con asfalto convencional cumple la especificación; 13,6% con asfalto modificado con polímero, no cumple la especificación.



GRAFICA 4.28 - Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto en mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

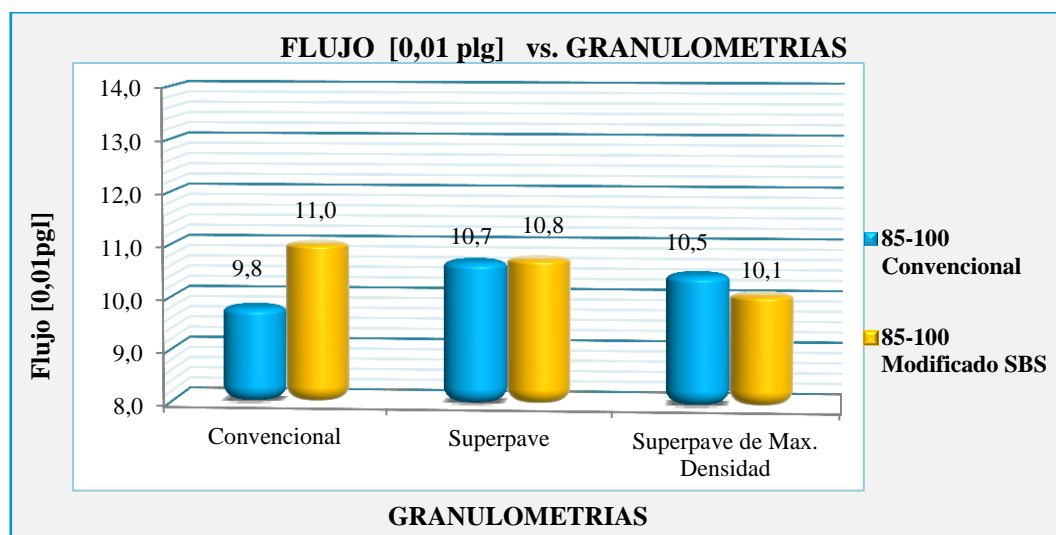
La especificación de porcentaje de vacíos llenos de asfalto es 65 a 75 %, se puede observar en la gráfica 4.28 que la granulometría convencional tiene 74% y 69% de vacíos llenos de asfalto en el asfalto convencional y asfalto modificado respectivamente. La granulometría Superpave de máxima densidad de 82% y 78% de vacíos llenos de asfalto en el asfalto convencional y asfalto modificado respectivamente no cumple la especificación. La granulometría Superpave considerado para tráfico pesado es la que tiene un valor medio de 72% y 70% dentro de la especificación para mezcla convencional y con polímero.



GRAFICA 4. 29 - Estabilidades en mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

La grafica 4.29 de estabilidad de mezcla asfáltica convencional con respecto a mezcla asfáltica con polímero tiene un incremento notable más, que las propiedades volumétricas analizadas anteriormente. La granulometría convencional tiene un incremento de 26,1% de estabilidad de mezcla convencional a mezcla modificada, Superpave con incremento porcentual de 28,27% y Superpave de máxima densidad con incremento porcentual de 15,51%.



GRAFICA 4. 30 - Flujos en mezclas asfálticas convencionales y modificadas

Fuente: Elaboración propia

Es importante notar que los requisitos de fluencia tiene rango de 8 a 14 centésimas de pulgada, en el grafico 4,30 se observa que cumplen para todas las granulometrías compactadas en mezcla convencional y con polímero, además se puede evidenciar que la mezcla asfáltica convencional y modificado SBS tiene un incremento respecto a la deformación para la granulometría convencional y Superpave. Pero en la granulometría Superpave de máxima densidad tiene menor fluencia de mezcla convencional a modificada de 10,5 a 10,1 centésimas de pulgadas.

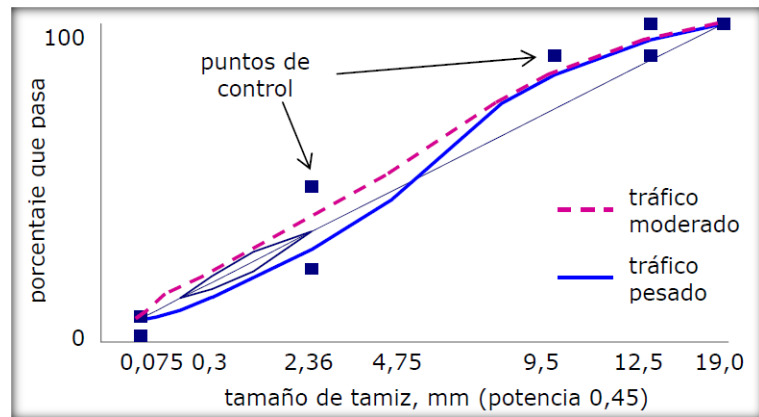


FIGURA 4. 34 - Granulometría para tráfico pesado y moderado.

Finalmente en relación a la granulometría de la banda de Superpave para tamaño máximo nominal 19 mm, la metodología hace referencia que a medida que el tráfico aumenta, la granulometría se acerque al límite inferior de la banda en los tamaños finos (a partir de 4,75 o 2,36), como muestra la figura 4.34 considerado granulometría de tráfico pesado, y cuando está por encima de la línea de máxima densidad (granulometría convencional Tipo C) es considerada para tráfico liviano, y se evidencia que se debe evitar la gradación de la línea de máxima densidad puesto que no cumple con algunas especificaciones como vacíos de aire y vacíos llenos de asfalto.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La gradación de áridos de Superpave para mezclas asfálticas convencionales y con polímeros compatibilizan los aspectos constructivos de desempeño en el servicio del pavimento, puesto que el comportamiento volumétrico de la granulometría Superpave es relativamente mejor en relación a la convencional.

La granulometría Superpave de máxima densidad en la mezcla asfáltica, con asfalto convencional y con polímero mayor gravedad específica de 2,356 y 2,329 respectivamente, luego la granulometría de Superpave con 2,315 y 2,321 y finalmente la granulometría convencional con densidad menor de 2,290 y 2,294.

La granulometría convencional tiene mayores de vacíos de aire de 4,5% y 4,58% en la mezcla convencional y modificada respectivamente, la granulometría Superpave de 3,9% y 4,09% de vacíos de aire valores en el intermedio de la especificación por tanto de mejor comportamiento. La granulometría de Superpave de máxima densidad no cumple con la especificación de 3-5% de vacíos, puesto que tiene 2,4% en mezcla convencional y 3,01% vacíos de aire con asfalto modificado, valor en la frontera inferior de la especificación.

Respecto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral, propiedad que depende del agregado (forma y granulometría) y del contenido asfáltico. Valores de granulometría convencional y Superpave cumple con las especificaciones mayores a 13% vacíos en el agregado mineral las mezclas asfálticas con asfalto convencional y asfalto modificado con polímero SBS. La granulometría Superpave de máxima densidad de 12,7% y 13,6% con asfalto convencional y asfalto modificado

respectivamente indica que en terreno el asfalto no tendrá suficiente espacio y que por lo tanto podría exudar, de manera similar es el comportamiento referente a los porcentajes vacíos llenos con asfalto en las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas con asfalto modificado con polímero respecto con asfalto convencional tiene incrementos relativos en las propiedades volumétricas como se resume en la tabla 4.63, señalando que la mayor incidencia está en la estabilidad, por tanto las mezclas asfálticas modificadas con polímero tienen mejor comportamiento en el diseño mezclas compactadas utilizando el procedimiento Marshall.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS	GRANULOMETRIAS			VARIACIÓN
	Convencional	Superpave	Superpave de max. Densidad	
Vacíos de aire	2,8%	5,4%	20,3%	incremento
Vacíos de agregado mineral	4,9%	9,3%	6,3%	decremento
Vacíos llenos de asfalto	6,5%	2,3%	5,1%	decremento
Estabilidad	26,1%	28,3%	15,5%	incremento
Fluencia	11,1%	0,6%	3,7%	incremento

TABLA 5. 1– Variación porcentual de propiedades volumétricas en las mezclas asfálticas

Se concluye utilizar granulometrías que se acerquen al límite inferior de las bandas del Manual de Carreteras. La banda Tipo C puede ser especialmente útil, puesto que permite acercarse a la recomendación Superpave para alto tráfico. Por otro lado, es posible mejorar sustancialmente el desempeño de las mezclas asfálticas utilizando agregados mayor a 95% de chancados, con un mínimo porcentaje de agregado alargado o lajeado.

En resumen las especificaciones y métodos utilizados en nuestro País pueden ser mejorados incorporando algunos elementos y criterios del sistema Superpave. La incorporación del sistema Superpave completo sería también un gran avance para construir mezclas más durables en carreteras sometidas a altas exigencias, como es el caso de las carreteras troncales.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Considerar en las especificaciones las granulometrías de la Metodología Superpave para el diseño de la mezcla asfáltica con asfalto convencional y asfalto modificado con polímero.
2. Se recomienda seguir investigando las granulometrías de Superpave con asfaltos modificados con diferentes polímeros.
3. Las propiedades físicas del agregado pétreo ya sea en forma individual o mediante interacción de las mismas ocasionan alteraciones en la característica de compactación de la mezclas asfáltica, las cuales pueden inducir errores durante la determinación de las propiedades volumétricas.
4. En laboratorio Es recomendable observar la temperatura de compactación de la mezcla modificada, se deben evitar temperaturas menores a 132°C (270°F). De lo contrario la mezcla se vuelve muy viscosa por lo tanto no es trabajable.