

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN AL TEMA

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL TEMA

1.1. INTRODUCCIÓN

El uso del ligante asfáltico en los pavimentos flexibles debe tener ciertas particularidades estructurales y funcionales que implica en el tiempo de servicio del pavimento para dar mayor seguridad y confiabilidad en las vías de comunicación.

Desde que se empezó a producir asfalto mediante la refinación del petróleo se han realizado estudios en diferentes países para obtener un asfalto de mayor calidad y que a su vez ofrecen ventajas económicas, sociales y ambientales; desarrollando diferentes metodologías que ayudan a la disminución de problemas que se presentan regularmente de acuerdo al ciclo de carga que sirve.

El asfalto espumado fue investigado y desarrollado en los EE.UU. se caracteriza por tener una consistencia, durabilidad, elasticidad y resistencia específica, que permite producir mezclas asfálticas de modo muy diferente a los tradicionales y su comportamiento estructural es similar, pero difieren en su estructura interna con la capacidad de soportar las exigencias del tráfico para el cual se diseña, por ello resulta ser eficiente en la pavimentación de capas de rodadura, estabilización de capas base, en el reciclado de asfaltos viejos y se adapta a cualquier tipo de agregado.

En nuestro país la aplicación de matrices asfálticas finas y asfaltos espumados es poco común que solo hay ciertas investigaciones teóricas que no se emplean en nuestra región como en otros países de la región como Colombia y Chile que estudian y aplican nuevas tecnologías en los pavimentos de acuerdo a estudios desarrollados en Europa o los EE.UU. y estos garantizan métodos confiables que pueden incursionarse en nuestro medio para tener nuevos procesos de investigación, por ello el presente trabajo busca analizar el comportamiento de las matrices finas producidas con asfalto espumado mediante la reología aplicada a la estabilidad y fluencia en la construcción de pavimentos flexibles para ver el comportamiento de las matrices finas utilizando materiales locales para su empleo en proyectos de infraestructura vial.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los pavimentos flexibles son de uso en zonas de tráfico liviano, el problema que presentan hoy en día para lograr menores deformaciones y mayor resistencia y estabilidad, depende del tipo de mezclas y ligantes que son aplicados para mejorar la estructura del pavimento, por efecto la presente investigación surge de la necesidad de estudiar a las matrices asfálticas finas que serán producidas con asfaltos espumado, con el propósito de poder identificar las características reológicas que tienen en los pavimentos flexibles.

Actualmente hay muchos estudios acerca de asfaltos, mezclas modificadas con diferentes adiciones y/o aglomerados, que estos proporcionan métodos convencionales de caracterización de asfalto por eso es importante y necesario estudiar y mejorar las características de los pavimentos flexibles para obtener mezclas resistentes a la deformación y estabilidad, el cual se requiere de una buena dosificación con el asfalto espumado para así lograr ventajas favorables. En nuestro medio no se ha tomado en cuenta la importancia a este tipo de mezclas por lo cual se carece de información para la elaboración de este tipo de mezcla ya que en los manuales y normas que se usa en nuestro medio no cuenta con dichas especificaciones en que basarse para la elaboración, por eso nos basaremos en la norma IRAM-6845 para el diseño de este tipo de mezcla, que es las normas del instituto de racionalización de materiales de Argentina.

El uso de las matrices finas proporciona una cohesión necesaria para mantener la estructura del pavimento y con el asfalto espumado ofrecen mayores servicios de durabilidad y resistencia, evitando que se genere problemas de degradaciones o cambios en las propiedades del pavimento. Por eso la investigación busca aportar información para tener conocimiento sobre la caracterización reológica aplicada a la estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica.

Considerando la alternativa de elaboración de las matrices finas con asfalto espumado se podrá realizar de forma empírica para buscar mejorar sus propiedades reológicas y que se pueda evaluar las características correspondientes, así mismo puede servir como precedente para realizar otros estudios de investigaciones similares o realizadas con otras técnicas e incorporaciones y hacer algunas comparaciones de sus características y propiedades.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación problemática

La composición de las mezclas asfálticas es tanto de agregados gruesos y finos con un ligante o cemento asfáltico y usados para la construcción de pavimentos flexibles teniendo como función de dar una buena capa de rodadura y un servicio vial adecuado.

Tomando en cuenta los problemas más recurrentes que presentan los pavimentos flexibles en nuestro medio como agrietamientos, baches entre otros, son perjudiciales y generan dificultades e inseguridad para el tránsito vehicular y el empleo de pavimentos flexibles ofrece menores costos en su diseño y construcción que a su vez mejoran las condiciones sociales y económicas, pero es necesario contar con las características de la estructura del pavimento para dar un servicio adecuado acorde a las exigencias de los vehículos automotores y estos lleguen a su vida útil proyectada.

Las estructuras viales poseen fallas por diferentes razones el cual son inevitables ya que estas se originan con el asentamiento del material que conforman sus diferentes capas por la circulación vehicular o factores climatológicos que persistentemente estarán presentes en la estructura generando desgastes y deterioro en la capa de rodadura del pavimento, para lo cual se debe buscar soluciones entre los cuales tenemos a los micro pavimentos, sellos polimerizados, matrices finas con asfalto espumado que permitan tener pavimentos óptimos para la circulación segura y rápida.

La dificultad de pavimentar un tramo y hacer el remplazo a corto tiempo por uno nuevo, es un perjuicio ya que provoca deterioros de las capas del suelo y pérdida económica, por ello con esta investigación se plantea la propuesta de estudiar a la matriz fina con asfalto espumado para ver si da mejores beneficios que permita hacer un manteniendo en fallas que presenta el pavimento flexible para tener condiciones favorables en sus niveles de servicio y utilidad sin formar perjuicios en la sociedad.

1.3.2. Problema

¿Si utilizo matrices finas en la conformación de mezclas con asfalto espumado será que se puede determinar propiedades adecuadas para pavimentos flexibles?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la caracterización reológica de las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado en pavimentos flexibles mediante el método Marshall para determinar propiedades de estabilidad y fluencia.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar los componentes y propiedades de las mezclas asfálticas relacionadas con las matrices finas a utilizar en el pavimento flexible.
- Caracterizar los materiales pétreos de acuerdo a su procedencia en los ensayos de laboratorio para la mezcla asfáltica con matriz fina.
- Caracterizar el componente asfáltico convencional que será utilizado en las matrices asfálticas finas.
- Realizar un equipo sencillo para introducir agua al asfalto caliente y determinar las características de relación de expansión y vida media del asfalto espumado.
- Diseñar las proporciones adecuadas de la mezcla asfáltica con matriz fina producida con asfalto espumado para su empleo en pavimentos flexibles.
- Evaluar las propiedades reológicas de mezclas asfálticas con matrices finas aplicadas a la deformación y estabilidad de mezclas en el pavimento asfáltico.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones sobre la investigación realizada en matrices finas con asfalto espumado.

1.5. HIPÓTESIS

Si utilizando las mezclas de matrices finas con asfalto espumado, se obtiene características reológicas adecuadas de estabilidad y fluencia mediante la prensa Marshall.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

Matrices finas producidas con asfalto espumado.

1.6.2. Variable dependiente

Caracterización reológica aplicada a la deformación y estabilidad en matrices finas producidas con asfalto espumado.

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 1.1 Operacionalización de variables

	Variable	Conceptualización	Medición	Unidad
INDEPENDIENTE	Matrices finas producidas con asfalto espumado	Las matrices finas permiten diseñar y evaluar la capa de rodadura del pavimento flexible.	Análisis granulométrico	%
			Contenido de asfalto	%
			Razón de expansión	N° veces
			Vida media	Seg.
DEPENDIENTE	Caracterización reológica (estabilidad y fluencia)	Es obtener las características y propiedades apropiadas de deformación y estabilidad de mezclas finas producidas con asfalto espumado.	Ensayo Marshall (estabilidad)	Lb.
			Ensayo Marshall (fluencia)	mm
			Vacíos	%

Fuente: Elaboración propia

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Unidad de estudio

La investigación tiene un enfoque en las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

1.7.2. Población

Las mezclas asfálticas en caliente con matrices finas elaborados con asfalto espumado.

1.7.3. Muestra

Las mezclas asfálticas en caliente con matrices finas y asfalto espumado elaborados con materiales locales natural y triturado y el cemento asfáltico convencional, que permitirá evaluar las características más elementales como la estabilidad y la deformación al realizar ensayos de laboratorio necesarios.

1.7.4. Muestreo

Para la ejecución de la muestra se realizará diferentes ensayos de caracterización de las matrices finas producidas con asfalto espumado tanto del material granular de procedencia natural y triturada, así como la caracterización del cemento asfáltico y el asfalto espumado, para dosificar la mezcla y romper las briquetas a diferentes temperaturas con el fin de analizar el parámetro de rotura en cuanto a la estabilidad y fluencia mediante el ensayo Marshall.

1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.8.1. Método

El método a utilizar en la presente investigación es el método inductivo es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares. Se trata del método científico más usual, en el que pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación de los hechos para su registro; la clasificación y el estudio de estos hechos; la derivación inductiva que parte de los hechos y permite llegar a una generalización; y la contrastación.

En el presente trabajo se hará de forma directa donde partiremos de lo particular siendo las características, propiedades, composición de la arena y del cemento asfáltico para

determinar el contenido óptimo y llegar a lo general en este caso son las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado para evaluar la estabilidad y deformación de la mezcla que cumpla con los parámetros necesarios y pueda ser usadas en mantenimientos de pavimentos flexibles.

1.8.2. Técnicas

Las técnicas a emplear para el muestreo en este proyecto serán de manera evaluativa, es decir los diversos procedimientos y tareas experimentales que permitirán obtener los datos que serán analizados e interpretados.

Para la investigación se hará ensayos de laboratorio para caracterizar los materiales de las matrices finas el cual se debe caracterizar mediante un análisis granulométrico y tener mezclas homogéneas con el asfalto espumado y también se empleará los ensayos en la prensa Marshall para determinar la estabilidad y fluencia, para ser usados como una alternativa de mantenimiento en pavimentos flexibles.

1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance general de este proyecto de investigación: “caracterización reológica de matrices finas producidas con asfalto espumado en pavimentos flexibles” tiene por objeto evaluar las características reológicas de estabilidad y fluencia a diferentes temperaturas, utilizando materiales locales como arena triturada y natural así establecer un análisis comparativo entre el uso de ambos materiales en la conformación de matrices finas convencionales y con asfalto espumado, para lo cual se planteó un problema, objetivos, una justificación y otras definiciones para la mejor comprensión de esta investigación.

De acuerdo a la conformación de una matriz fina se buscará algún manual que cuente con las especificaciones correspondientes para la elaboración de este tipo de mezcla, después ubicar las zonas de los materiales que lo componen esta mezcla y así realizar ensayos de caracterización correspondientes asimismo la caracterización del asfalto espumado, desarrollando cada paso para llegar a obtener el contenido óptimo de asfalto para las mezclas de matrices finas.

Posterior a ello se diseñará briquetas con el contenido óptimo y con el óptimo se realizara un espumado para llegar a conocer las propiedades reológicas de estabilidad y fluencia

para ambos tipos de mezclas, tomando en cuenta que las roturas de las mismas serán a diferentes temperaturas para ver cómo es su comportamiento cuando no solamente se rompen a 60°C como lo indica Marshall, asimismo con los resultados logrados se realizará un análisis comparativo para ver si se logra llegar al objetivo general planteado y si cumple con los parámetros que se requiere para este tipo de mezcla.

Por último, se presentarán las conclusiones basadas en los resultados obtenidos teniendo un análisis previo para dar recomendaciones oportunas de acuerdo a la investigación realizada.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE MATRICES

FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO

ESPUMADO

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO

2.1. PAVIMENTO

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general, está conformada por capa de rodadura, base y sub base.

La función de un pavimento es la de proveer una superficie de rodamiento al tránsito y distribuir las cargas aplicadas por el mismo, sin que se sobrepasen las tensiones admisibles de las distintas capas del pavimento y de los suelos de fundación.

2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE

Un pavimento flexible es un pavimento elaborado por una capa asfáltica a base de una mezcla bituminosa en caliente o frío, aplicada sobre una capa de base y una capa de subbase, está construido con materiales débiles y menos rígidos (que el hormigón), más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo.

2.2.1. Características del pavimento flexible

Se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y sub base; sin embargo, es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la sub rasante y de las necesidades de cada obra.

Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior. Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga, con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto, la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material (y la más cara) y la de más baja capacidad de carga de material (y más barata) irá en la parte inferior.

2.2.2. Capas del pavimento flexible

Figura 2.1 Estructura del pavimento flexible



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/10916850/> Pavimentos flexibles

- **Carpeta asfáltica:** Está compuesta por mezclas asfálticas y materiales pétreos. Esta capa recibe directamente las cargas vehiculares y los efectos ambientales como la lluvia y la radiación solar. Proporciona una superficie cómoda y segura para el usuario de la vía, además sirve como una capa impermeabilizante que protege las demás capas.
- **Base:** Es una capa granular ubicada bajo la carpeta asfáltica, su función es distribuir los esfuerzos generados por el tránsito hacia las capas inferiores.
- **Sub base:** Es una capa granular construida con materiales más económicos que los de las anteriores capas, esta capa facilita el drenaje del agua que pueda filtrarse por la superficie o ascienda por capilaridad.
- **Sub rasante:** Es la superficie que soporta la estructura de pavimento, está compuesta por terreno natural, aunque en ocasiones es necesario mejorar las características del terreno para lo cual se requiere un proceso de mejoramiento.

2.2.3. Ventajas y desventajas del uso de pavimentos flexibles

- Las mezclas asfálticas de granulometría abierta proporcionan una rentabilidad mayor al permitir el desalojo del agua transversalmente sobre la macro textura superficial que presentan, reduciendo el hidropiano y la proyección de agua.

- La sensación de confort que experimentan los pasajeros a bordo del vehículo es mayor sobre pavimentos asfálticos que sobre rígidos, debido a la naturaleza misma del pavimento asfáltico, su flexibilidad y a que las mezclas asfálticas se disponen en varias capas como la carpeta asfáltica, base y sub base y no solo en una como en el concreto.
- Aumenta la vida útil del pavimento flexible y facilita el reciclaje.
- Entre las desventajas se tiene: deformaciones permanentes, agrietamientos por fatiga y por bajas temperaturas.

2.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.3.1. Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos.

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 (cemento asfáltico). Estos componentes son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica.

2.3.2. Clasificación de mezclas asfálticas

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

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado

- Masilla asfáltica: polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: agregado grueso más mortero.

- Macadam asfáltico: agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra

- **Mezclas asfálticas en caliente:** se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- **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.

c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica. - este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas o densas: la proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos entre 6 % y 10 %.
- Mezclas abiertas: la proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo

- Mezclas gruesas: el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas finas: también llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la 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 se denominan concretos asfálticos, una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

- Mezclas sin esqueleto mineral resistente es debida a la cohesión de la masilla.

f) Por la Granulometría

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

2.3.3. Tipos de mezclas asfálticas

2.3.3.1. Mezclas asfálticas en caliente

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

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

2.3.3.2. Mezcla asfáltica en frío

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado.

2.3.3.3. Mezcla porosa o drenante

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

2.3.3.4. Microaglomerados

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm., lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los microaglomerados en frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor. Hay microaglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

2.3.3.5. Masillas

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que, si hay agregado grueso, se haya disperso en la masilla formada por aquellos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.

Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral, dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Los asfaltos fundidos, son de este tipo, son mezclas de

gran calidad, pero su empleo está justificado únicamente en los tableros de los puentes y en las vías urbanas, incluso en aceras, de los países con climas fríos y húmedos.

2.3.3.6. Mezclas de alto módulo

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15 cm., tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta.

2.4. AGREGADOS PÉTREOS

2.4.1. Definición

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos (cementos asfálticos y emulsiones).

Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85%, en volumen de la mayoría de estructuras de pavimentos. 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 portante de la estructura de pavimento.

2.4.2. Tipos de agregados

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

2.4.2.1. 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 pavimentos son la grava y la arena.

La grava se define usualmente, como partículas de tamaño igual o mayor que 4,75 mm (N°4). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 4,75 mm (N°4) pero mayor que 0,075 mm (N°200). Las partículas menores de 0,075 mm (N°200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de cantera de ríos. Los depósitos de grava varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente alguna cantidad de arcilla y limo.

2.4.2.2. 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 canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas. Existen dos fuentes principales de agregados procesados o de trituración; estas son: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y 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.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste principalmente en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones de economía, el material triturado es utilizado tal como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. El agregado triturado sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores a 6.35 mm (1/4 pulg), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (No 30).

2.4.2.3. Agregados sintéticos o artificiales

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 caso del refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

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 presentan 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.

2.4.2.4. Agregados marginales

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

2.4.3. Agregados usados en mezclas asfálticas

2.4.3.1. Agregado grueso (grava)

Es aquel material que pasa por la malla de 3" y se retiene en la malla N°4 Los agregados gruesos son partículas grandes, aproximadamente a 2,50 mm, normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de ríos, rocas trituradas y zarandeadas.

La grava triturada son piezas trituradas de canto rodado o grava para hacerlo más apropiado para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación. La calidad puede ser mejorada por medio de la trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas redondeadas en partículas angulosas con mejoras además en la distribución o rangos de tamaños de las partículas.

2.4.3.2. Agregado fino (arena)

Es aquel material que pasa por la malla N° 4 (4,75 mm) y se retiene en la malla N° 200 (75 μ m) Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2,5 mm (0,1plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las fracciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas.

2.4.3.3. Filler

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

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

2.4.4. Propiedades de los agregados para mezclas asfálticas

Las propiedades más comunes para considerar apropiado un agregado para concreto asfáltico de buena calidad, son las siguientes:

2.4.4.1. Graduación y tamaño máximo de la partícula

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertos porcentajes en una serie de tamices.

2.4.4.2. Tamaño de las partículas

Existen dos formas de designar el tamaño máximo del agregado:

- **Tamaño máximo nominal de partícula:** designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- **Tamaño máximo de partícula:** designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

2.4.4.3. Textura superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es un factor que determina no solo la trabajabilidad y la resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también la resistencia que tiene esta al deslizamiento en la superficie de la carpeta de rodadura. Una textura áspera, como el papel de lija, aumenta de forma significativa 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.

2.4.4.4. Limpieza

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, etc.) en el agregado, que provoquen deterioro cuando estos se apliquen para la producción de mezclas asfálticas. La limpieza del agregado puede determinarse mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (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 (N° 200). Con el ensayo del Equivalente de Arena se puede determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4).

2.4.4.5. Capacidad de absorción

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 más grandes de asfalto que un agregado menos poroso, las absorciones altas indicaran agregados con alto contenido de poros permeables, lo que los vuelve de mala calidad para su uso en mezclas asfálticas.

El ensayo utilizado para medir esta propiedad física es: el ensayo de gravedad específica y absorción del agregado. El valor de gravedad específica y absorción son utilizados en el diseño de mezclas para superficie, por ejemplo; la gravedad específica es utilizada en el análisis de densidad-vacíos de las mezclas asfálticas.

2.4.4.6. Dureza

Es la resistencia de los agregados a resistir los efectos de abrasión e intemperie a los cuales serán sometidos en los procesos de producción, colocación, compactación y en su vida de servicio. La resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión es medida a partir del ensayo en la Máquina de los Ángeles. Una medida indirecta de la dureza, también la proporciona la prueba de sanidad de agregados por Sulfato de Sodio, ya que mide la resistencia de este a una simulación de intemperismo agresivo.

2.4.4.7. Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto. La afinidad debe ser tal que garantice una fuerza que permita, tanto al agregado como al asfalto, mantenerse unidos ante las condiciones ambientales a las que se verá expuesta la mezcla asfáltica.

2.4.4.8. Forma de la partícula

Las exigencias de forma de la partícula varían ligeramente para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas redondas, planas, alargadas y en forma de lascas, ya que este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

2.4.4.9. Peso específico

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. Es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales que son 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 y ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son: peso específico Bulk, peso específico aparente y peso específico efectivo. La determinación de esta propiedad (peso específico) se logra mediante el ensayo de gravedad específica y absorción del agregado.

2.5. CEMENTO ASFÁLTICO

2.5.1. Historia del asfalto

El asfalto es sin lugar a dudas, uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. La palabra asfalto, deriva del acadio, lengua hablada en Asiría, entre los años 1400 y 600 A.C. en esta zona se encuentra en efecto la palabra “Sphalto” que significa “lo que hace caer”. Luego la palabra fue adoptada por el griego, pasó a latín y, más adelante, al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalte).

En el sector de la construcción, la utilización más antigua se remonta aproximadamente al año 3200 A.C. excavaciones efectuadas en Tell Asmer, a 80 km. al noroeste de Bagdad, permitieron constatar que los Sumerios habían utilizado un mastic de asfalto para la

construcción, dicho mastic, compuesto por betún, finos minerales y paja, se utilizaba en la pega de ladrillos, en la realización de pavimentos interiores y como revestimiento impermeable. Los egipcios le habían encontrado otra aplicación al betún, como relleno del cuerpo en trabajos de momificación, práctica que se extiende aproximadamente hasta el año 300 A.C. Los árabes desarrollaron un uso medicinal al asfalto, el cual se extendió hasta nuestra época.

El betún natural fue descubierto a mediados del siglo XVI, en la isla de Trinidad, por Cristóbal Colón, un siglo más tarde, Sir Walter Raleigh quedó asombrado ante este lago de betún y tomó posesión de él para la Corona Británica. Mientras tanto, en 1712, el griego Eirini D'Eyrinis hizo otro descubrimiento: el yacimiento de asfalto de Val de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle de Ródano, a partir de estos yacimientos se elaboró el “mastic de asfalto”, aplicado a revestimientos de caminos y senderos. Sin embargo, el primer antecedente en el cual se usó un tipo de asfalto fue en Francia en 1802.

En 1852, la construcción de la carretera Paris – Perpiñán utilizó el asfalto Val Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial. En 1869, se introduce el procedimiento en Londres (con asfalto de Val de Travers), y en 1870 en Estados Unidos con similar ligante. Desde esta época, el “asfalto” se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició su uso vial. La construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalte, ocurre en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado. En 1900, aparece la primera mezcla en caliente, utilizada en la rue du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue confeccionada con asfalto natural de la isla de Trinidad. A partir del año 1902, se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, por sus características de pureza y economía en relación a los asfaltos naturales, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento.

2.5.2. Obtención del asfalto

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.

2.5.2.1. Destilación primaria

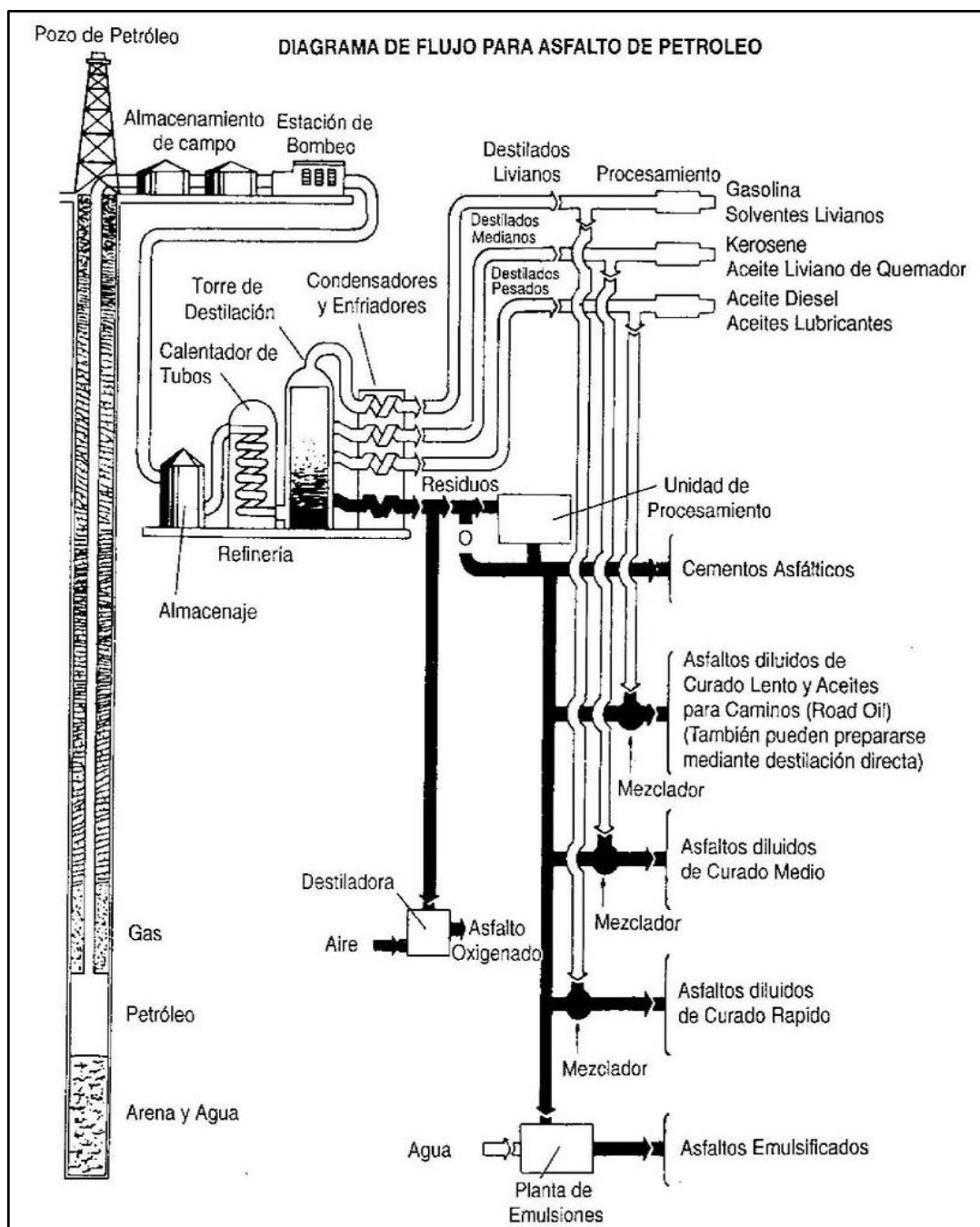
Es la operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, kerosén, gas oíl), hierven hasta esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionada. 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.

2.5.2.2. 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 fraccionada, 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, es 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.

Figura 2.2 Proceso de refinación del petróleo para obtener asfalto

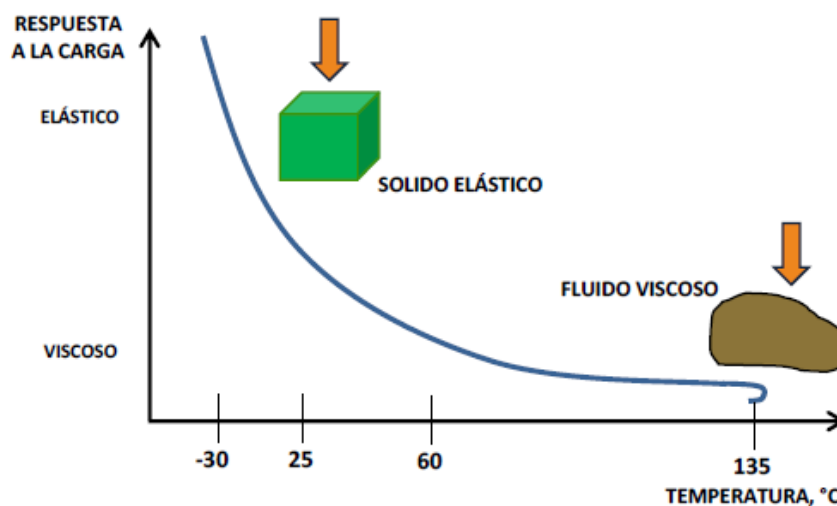


Fuente: Instituto del Asfalto. Manual del Asfalto

2.5.3. Definición

El asfalto, o cemento asfáltico (CA), es un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo, de comportamiento reológico viscoelástico, es decir, tiene un comportamiento elástico y plástico simultáneamente. Su viscosidad varía en función de su temperatura, cuyo comportamiento visco-elástico se muestra en la figura 2.3

Figura 2.3 Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico



Fuente: Manual de prácticas de asfalto - Universidad de Los Andes

Su principal uso es para la construcción de pavimentos asfálticos en obras viales y aeroportuarias. El cemento asfáltico en conjunto con los agregados pétreos, conforman las mezclas asfálticas que son las que otorgan soporte estructural y funcionalidad a los pavimentos.

2.5.4. Propiedades del asfalto

2.5.4.1. Propiedades químicas

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano puede separarse en dos partes principales:

- **Asfáltenos:** son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones. Los asfáltenos le dan las características de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los máltenos.
- **Máltenos:** están constituidos por resinas y aceites. Los máltenos están ligados a las propiedades elásticas del asfalto. Las resinas son moléculas de menor peso molecular, que tienen un mayor número de ramificaciones en las cadenas y también se observa la presencia de azufre y nitrógeno en sus cadenas, pero en menor frecuencia y alguna presencia de parafina que influye negativamente en las propiedades reológicas del asfalto. La estructura cristalina de la parafina sólida ocasiona un endurecimiento mayor en el asfalto; a temperaturas más elevadas la parafina se licua, lo que ocasiona una variación sensible en las viscosidades del asfalto. También disminuye la adhesividad de los asfaltos en los agregados y una elevada cantidad de ella, puede provocar un envejecimiento prematuro del ligante, influyendo sobre la duración y tiempo de vida útil del pavimento.

2.5.4.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

2.5.5. Características deseables del cemento asfáltico

- **Consistencia:** los cementos asfálticos son materiales termoplásticos, por lo que es necesario determinar su grado de fluidez a una temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.
- **Pureza:** el cemento asfáltico se compone casi enteramente de betunes, los cuales por definición son solubles en bisulfuro de carbono. Si hay impurezas estas son inertes.
- **Seguridad:** el cemento asfáltico, debe tener la capacidad de ser manejado a altas temperaturas sin peligros de inflamación porque si se lo somete a temperaturas suficientemente elevadas, despiden vapores que arden en presencia de una chispa o llama.

2.5.6. Reología del cemento asfáltico

El comportamiento reológico del cemento asfáltico se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en función bajo la aplicación de una fuerza externa y la temperatura. La reología del asfalto describe y caracteriza completamente las propiedades de estabilidad y fluencia en función de la temperatura y la carga aplicada

El asfalto ideal es aquel que, a temperaturas intermedias entre 0° y 45° C, los asfaltos son más duros y elásticos que a mayores temperaturas y el mayor problema es la fisuración por fatiga causada por la repetición de ciclos de cargas. A temperaturas por debajo de los 0° C, el mayor problema es la fisuración térmica, debido a las tensiones que se producen en las capas de pavimento por la contracción térmica que ocurre al bajar las temperaturas.

Existen deterioros del pavimento asfáltico relacionados con la reología como:

- **Desintegración:** la desintegración progresiva, como resultado del desprendimiento de las partículas, el excesivo envejecimiento produce fragilidad y falta de adherencia del asfalto con el agregado.
- **Agrietamiento por fatiga:** el cemento asfáltico excesivamente rígido por envejecimiento puede presentar un pobre desempeño a fatiga, entendida como el daño acumulado por la acción repetida de las cargas.
- **Agrietamiento térmico:** los pavimentos sometidos a bajas temperaturas desarrollan esfuerzos de tensión en la superficie debido a la contracción, resultando en agrietamiento no asociados a la repetición de cargas.
- **Ahuellamiento:** se refiere como el movimiento de las partículas bajo cargas repetidas y se produce por la pobre compactación durante la construcción y es compensada por el tráfico, la resistencia al ahuellamiento puede ser optimizada usando el tamaño de agregado adecuado partículas gruesas y finas angulares.
- **Daño inducido por humedad:** es el debilitamiento o pérdida de la capacidad del ligante en presencia de humedad entre la superficie del agregado y el asfalto.

2.5.7. Uso del asfalto en función del clima

Las condiciones climáticas pueden determinar el uso de un asfalto base más blando o más duro. El asfalto es un coloide compuesto de varias fracciones, siendo las principales los

asfáltenos y los máltenos. La constitución coloidal del asfalto depende de la naturaleza química; los asfáltenos son la fase dispersa del asfalto, mientras que los máltenos son la fase continua. Se concibe que los asfáltenos suministren la dureza mientras se cree que los máltenos confieren al asfalto las propiedades de adhesividad y ductilidad que tienen incidencia en la viscosidad y propiedades de flujo del asfalto.

Tabla 2.1 Tipo de asfalto en función del clima

Uso de cementos asfálticos graduados por penetración en función al clima					
Pavimentación	Clima				
	Muy cálido	Cálido	Moderado	Frio	Frígido
AEROPUERTOS					
Pistas de despegue	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Caminos auxiliares	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Aparcamientos	60-70	60-70	60-70	85-100	85-100
CARRETERAS					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Trafico medio ligero	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
CALLES					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Trafico medio ligero	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150
CAMINOS PARTICULARES					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales estación servicio	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
APARCAMIENTOS					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales estación servicio	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
ZONA DE RECREO					
Pista de tenis	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
Terrenos de juego	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
BORDILLOS	40-50	40-50	60-70	85-100	85-100

Fuente: Manual de asfalto USA

2.6. ASFALTO ESPUMADO

2.6.1. Introducción

El asfalto espumado es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales. Las mezclas producidas con asfalto espumado tienen un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional (Macarrone et., 1993), pero difieren en su estructura interna, presentando ventajas favorables en las mezclas. Desde el punto de vista constructivo, el empleo de nuevas técnicas y equipos de construcción especialmente desarrollados para este tipo de aplicación, puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y en materiales asfáltico reciclados y pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en una planta central.

2.6.2. Origen y desarrollo del asfalto espumado

El origen del asfalto espumado se remonta al año 1956 en la Universidad estatal de IOWA, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la organización Mobil Oil en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención y desarrollar la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto caliente para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. A pesar de ser una tecnología desarrollada hace más de 40 años, su uso se masificó sólo a partir del año 1991, al expirar en ese año los derechos sobre la patente de invención de esta tecnología. Desde los años 90, WIRTGEN trabaja con este ligante innovador ofreciendo tecnologías para el tratamiento en planta o la reparación in situ.

2.6.3. Producción del asfalto espumado

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular o ligante expandido), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (2 a 4% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (140° C - 180° C), dentro de una cámara de expansión (figura 2.4), generando espontáneamente espuma.

Figura 2.4 Esquema de producción de asfalto espumado



Fuente: Tecnología del asfalto espumado - WIRGTEN

El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua que eleva la temperatura del agua a más de 100°C y la evapora instantáneamente, se crean burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto. Esta mezcla se libera a través de la boquilla y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto aumentando su volumen (12 a 20 veces mayor) que alcanza el equilibrio debido a la tensión superficial. Este proceso reduce la viscosidad del asfalto lo que permite el mezclado con los agregados humedecidos a temperatura ambiente. Sin embargo, este equilibrio dura menos de 1 minuto debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua. Una vez que el asfalto espumado llega a temperatura ambiente las burbujas de vapor colapsan por condensación y se desintegra la espuma, el asfalto recupera su volumen inicial (Thenoux y Jamet, 2002).

Para la producción de mezclas con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0,075 mm), produciendo una mezcla

asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas.

2.6.4. Propiedades del asfalto espumado

El asfalto espumado es caracterizado por medio de dos propiedades:

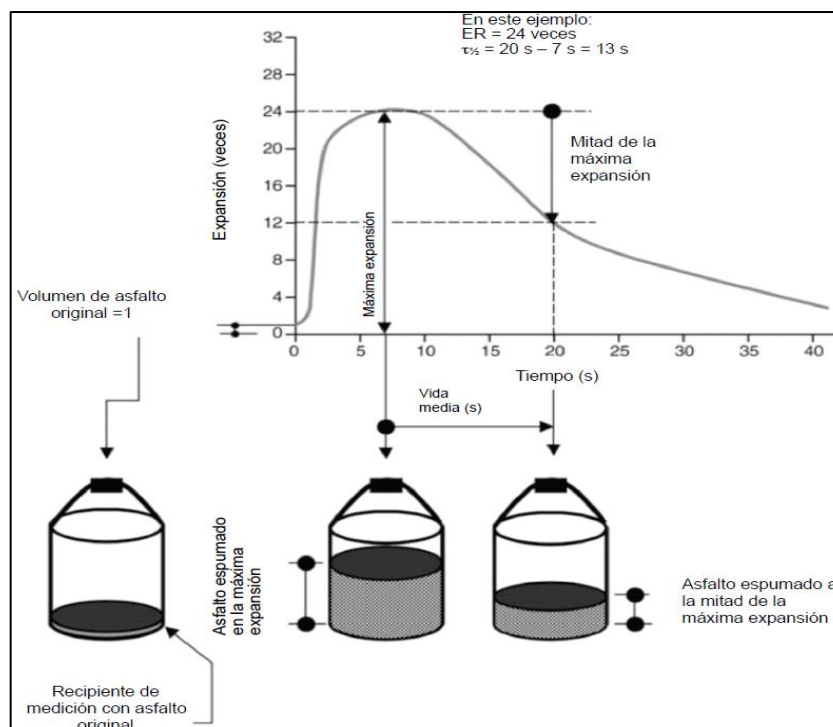
2.6.4.1. Razón de expansión (Ex)

Es la medida de viscosidad de la espuma y determina que tan bien está dispersa la mezcla. La razón de expansión indica la trabajabilidad del asfalto y su capacidad de recubrir los agregados. Se calcula como la división del volumen máximo de asfalto espumado entre el volumen original de asfalto.

2.6.4.2. Vida media ($t_{1/2}$)

La vida media es la medida de la estabilidad del asfalto espumado e indica la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo en segundo que toma el asfalto espumado en colapsar a la mitad de su volumen máximo como se muestra en la figura 2.5

Figura 2.5 Razón de expansión y vida media del asfalto espumado



Fuente: Boletín técnico – PITRA (Wirtgen 2004)

Se ven afectadas en orden de influencia por: la temperatura del asfalto, que a mayor temperatura mejor “espumación” se consigue, es recomendable utilizar temperaturas mayores a 149 °C (Abel, 1978); la cantidad de agua adicionada, al aumentar la cantidad de agua incrementa el volumen de espuma hasta 1500 veces (Wirtgen, 2004), pero esto produce que la vida media se reduzca, por lo tanto estas dos características están inversamente relacionadas con respecto a la cantidad de agua añadida; el uso de aditivos, por ejemplo, los compuestos de silicona hacen perder la capacidad de espumación del asfalto; la presión del asfalto y agua, mayores presiones permiten una mejor “atomización” de las partículas que mejora la uniformidad de la espuma; y la viscosidad del asfalto, no es concluyente la influencia de esta propiedad sobre la razón de expansión y la vida media.

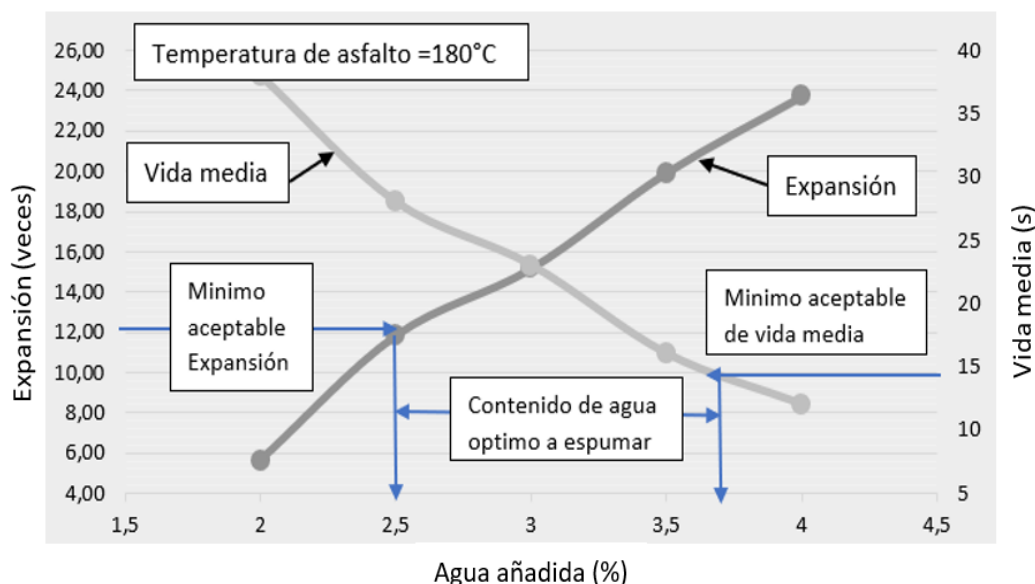
En cuanto a la medición de estos parámetros en el laboratorio los resultados dependen del tamaño del recipiente donde se mide la espumación, por lo que es muy importante, estandarizar el tamaño para obtener resultados reproducibles.

2.6.5. Especificaciones aceptables del asfalto espumado

Las especificaciones mínimas aceptables (Wirtgen 2004) para una estabilidad efectiva del espumado son:

- Razón de expansión = 12 a 20 veces mayor
- Vida media = 15 segundos (mínimo)

Si estas no se cumplen, se tiene que descartar el asfalto pues no es adecuado para espumar. Como se ve que el contenido de agua a añadir es tan importante para la espumación, esta se debe diseñar por lo que, en el laboratorio se deben adicionar distintos porcentajes de agua sobre masa de asfalto y graficar la expansión y la vida media para obtener el contenido de agua a utilizar en la planta de producción. Se pueden usar los siguientes porcentajes: 2%, 3% y 4% por ejemplo, y graficar ambas características en un mismo gráfico como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6 Optimización de la razón de expansión y vida media

Fuente: Boletín técnico – PITRA (Wirtgen 2004)

Cuando las características de espumado son extremadamente pobres (una razón de expansión menor que 12 y una vida media bajo los 15 segundos), es difícil obtener una mezcla aceptable. Las consideraciones deberían entonces estar orientadas a emplear un asfalto de un origen distinto o incluir un agente espumante.

2.6.6. Consideraciones para el diseño de mezclas con asfalto espumado

2.6.6.1. Elección del grado de asfalto

En general, los asfaltos blandos tienen mejores características de espumación, sin embargo, no existen diferencias apreciables entre las propiedades de espumación medidas en relación al grado de asfalto empleado. La base espumada es siempre la segunda capa, por lo cual dependiendo del tipo de carpeta de rodado (tratamientos de superficie tipo sellos o carpetas estructurales) el efecto de la temperatura ambiente en conjunto con las cargas de tránsito puede ser más o menos influyente (este efecto se encuentra actualmente en estudio). El proceso de envejecimiento instantáneo del espumado puede ser suficiente para otorgar las propiedades viscoelásticas requeridas, por lo tanto, la elección del grado del asfalto puede ser eventualmente sólo función de las propiedades de la espuma (el

estudio del envejecimiento instantáneo del asfalto espumado se encuentra en etapa de estudio).

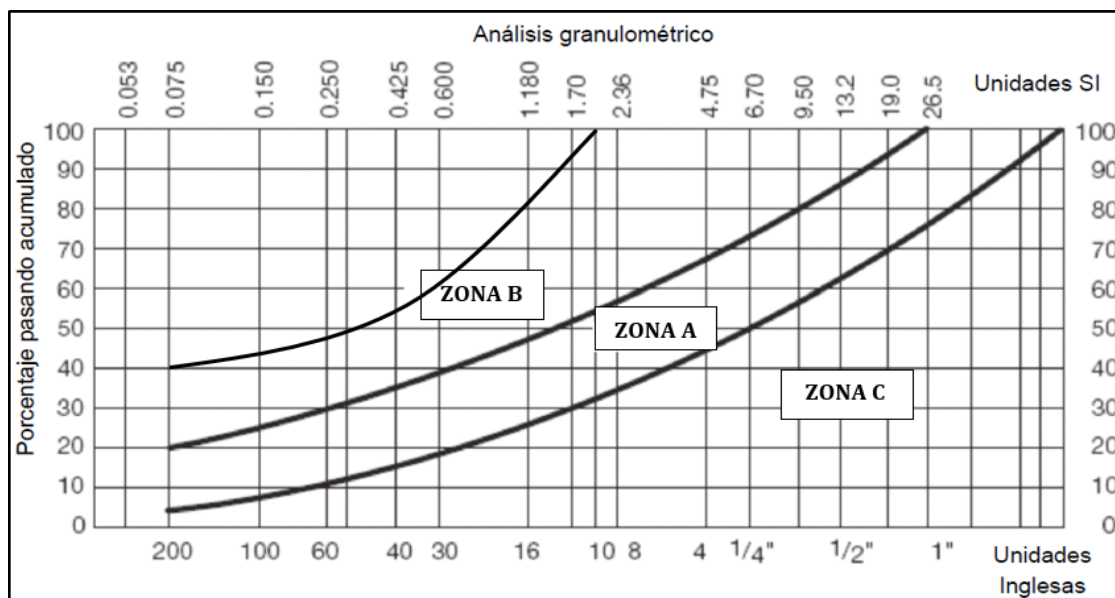
2.6.6.2. Temperatura del asfalto y porcentaje de agua de inyección

La temperatura del asfalto y el porcentaje de agua a inyectar se determinan en función de la razón de expansión y vida media. El porcentaje de agua de inyección es independiente del agua empleada para la compactación de la mezcla.

2.6.6.3. Características de agregado

Se puede realizar una mezcla de acuerdo a la caracterización del agregado ya que el asfalto espumado se puede mezclar con distintos tipos de agregados, desde arenas hasta gravas quebradas y material de reciclado de pavimentos antiguos (RAP). Se debe estudiar la granulometría de los materiales. Es muy importante hacer notar que materiales con poca cantidad de finos no se mezclará bien con el asfalto espumado, por lo que se especifica un mínimo de 5 % pasando el tamiz de 0,075 mm (N° 200). Cuando el material es deficiente en la cantidad de finos se recomienda utilizar cemento o cal u otro material fino. Se presenta en la figura 2.7 las especificaciones de granulometría de los materiales para establecer si son adecuados para mezclar con el asfalto espumado.

Figura 2.7 Clasificación de materiales granulares para uso de asfalto espumado



Fuente: Revista ingeniería de construcción (Akeroyd y Hicks, 1988)

Los materiales comprendidos de acuerdo a la zona indican que:

- **Zona A:** los materiales de esta zona de esta clasificación, son adecuados para ser empleados en la estabilización o diseño de mezclas asfálticas para carreteras con tráfico pesado.
- **Zona B:** los materiales de esta zona son finos, generalmente son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas.
- **Zona C:** los materiales de esta zona son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos (cemento o cal).

2.6.7. Ventajas y desventajas del asfalto espumado

2.6.7.1. Ventajas

- Como estabilizante puede utilizarse junto con variedad de tipos de agregados.
- Aumenta la resistencia y reduce la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, da mayor rigidez a la capa de base volviéndola flexible y resistente a la fatiga.
- Reduce los costos de transporte y ligante, pues el asfalto espumado requiere menor cantidad de ligante y agua comparada con otras técnicas de mezclas en frío.
- Ahorro en los tiempos de puesta en servicio, pues se puede abrir al tránsito casi inmediatamente después de haber sido compactada la capa.
- Conservación de energía, solo se necesita calentar el asfalto antes de ser espumado, los agregados se pueden mezclar en frío y húmedos (no requieren de secado).
- Es amigable con el ambiente, no se presenta evaporación de volátiles en todo el proceso desde el mezclado hasta el curado.
- Se puede apilar la mezcla sin riesgo de que el asfalto exude, pues se mantiene la mezcla trabajable por largos periodos lo que además evita las restricciones de tiempo en conformación, compactación y acabado de la capa de ruedo.
- Las ventajas energéticas del asfalto espumado en la reconstrucción de pavimentos asfálticos requieren de un reducido consumo energético en comparación con los métodos tradicionales de mezcla asfáltica en caliente.

2.6.7.2. Desventajas

- Como desventajas podemos mencionar que presenta una apariencia engañosa pues tiene un aspecto café más que negro y brillante, con el tiempo es que se pone de color negro. Por su simplicidad puede ocasionar que los controles de calidad sean menospreciados, pero como todo proyecto de pavimentación se requiere de la atención y cuidado de todo el proceso.
- Como toda nueva tecnología hay aspectos por investigar y acumular experiencia, pero definitivamente sí es factible el uso de asfaltos espumados en nuestro país.

2.6.8. Aplicaciones del asfalto espumado

Los asfaltos espumados se pueden utilizar para la fabricación de capas de ruedo, y las aplicaciones principales de esta técnica es el reciclado en frío de capas asfálticas existentes y la estabilización de suelos, esto puede realizarse en el sitio de la pavimentación o en planta dependiendo de la importancia del proyecto.

Es posible también aplicar algún tipo de sello sobre la superficie de tipo lechada asfáltica.

2.6.9. Procedimiento del diseño de mezcla con asfalto espumado

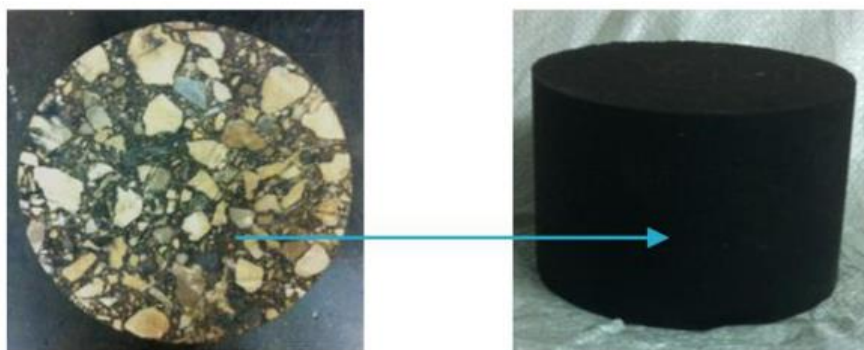
El procedimiento de diseño de la mezcla requiere el uso de una pequeña planta de laboratorio para poder producir el asfalto espumado, es importante que este equipo simule el asfalto espumado que será producido durante la producción a gran escala. La planta de laboratorio de asfalto espumado consiste esencialmente en una olla para calentar el asfalto y dos sistemas de bombeos calibrado uno para el asfalto caliente y otro usado para el agua en la producción de espuma. Es importante mencionar que, para el diseño de la mezcla, en la ejecución de la investigación se fabricó un equipo no estandarizado, pero que simula satisfactoriamente las características mencionadas anteriormente. Predeterminadas cantidades de asfalto caliente y agua fría son inyectadas a una cámara de expansión especialmente diseñada donde el asfalto es espumado antes de ser descargado a través de una boquilla. La relación de expansión y vida media de un asfalto espumado puede ser variada por la alteración de las proporciones de agua que se adicionan al asfalto o por la adición de aditivos químicos.

En el diseño de las mezclas con asfalto espumado es necesario optimizar las características de espumado del cemento asfáltico que vaya a ser usado, ello se logra midiendo la relación de expansión y vida media de las espumas elaboradas bajo diferentes condiciones de temperatura, presión de aire y concentración de agua. Algunas veces puede ser necesario el uso de aditivos para contrarrestar el efecto de deletéreo de siliconas presentes en el asfalto y causantes de características pobres de espumado en el mismo. Tanto la relación de expansión como la vida media de las espumas se evalúan a temperaturas en el rango de 140°C a 180°C con presiones de aire entre 1 y 5 bares (1bar=14.5psi) y concentraciones de agua desde 2% al 4% usando incrementos de 0,5%, el procedimiento y caracterización se detalla en el capítulo III. Una vez la relación agua-asfalto haya sido determinada, un volumen predeterminado de asfalto se descarga directamente sobre la muestra de agregado mientras se está agitando y homogéneamente mezclando y luego a compactar la mezcla

2.7. MATRIZ ASFÁLTICA FINA

Una matriz asfáltica fina o FAM está compuesta por una mezcla de cemento asfáltico con agregados finos que pasa desde el tamiz N°16 (1,18 mm). El diseño de las FAM puede estar sujeto también al diseño de una mezcla asfáltica completa para que efectivamente represente su matriz fina.

Figura 2.8 Representación de FAM a partir de una mezcla completa



Fuente: Universidad de Los Andes / influencias en FAM

Las mezclas asfálticas finas pueden también denominarse como morteros asfálticos, pues estos son mezclas formadas por áridos finos incluyendo el filler y un ligante asfáltico.

2.7.1. Ensayos de caracterización de las matrices finas

Para caracterizar a los componentes de una matriz fina se desarrollará los siguientes ensayos y ver la calidad de las mismas determinando según las normas establecidas si cumplen y si son aptas para el diseño de una matriz fina.

2.7.1.1. Ensayos de caracterización de la arena

➤ Granulometría de una matriz fina

Mediante la distribución granulométrica de las matrices finas se pretende conocer los porcentajes retenidos en cada tamiz viendo que cumpla con la norma N-CMT, es una norma mexicana de caracterización de calidad de los materiales pétreos para morteros asfálticos, ya que trabaja con el material fino que pasa el cien por ciento por el tamiz N°16. Considerando que la granulometría a cumplir de matrices finas es igual a la de un mortero por eso se toma como referencia esta normativa.

De acuerdo a la norma IRAM 1501 para mezclas con arena, la granulometría trabaja a partir del tamiz N°4 pasando en su totalidad sin embargo en el resto de tamices pasa y cumple con algunos rangos similares a la norma mexicana. (Anexo E)

Los rangos que deben cumplir para la conformación de una matriz fina son de acuerdo a la siguiente tabla 2.2.

Tabla 2.2 Requisitos granulométricos para las matrices finas

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
1,180	N°16	100
0,595	N°30	43-72
0,425	N°40	26-53
0,297	N°50	17-41
0,150	N°100	10-30
0,075	N°200	5-10

Fuente: Instituto mexicano de características de los materiales

- **Peso específico y absorción de la arena:** el cálculo del peso específico de la muestra seca de agregados finos establece un punto de referencia para medir los

pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

- **Equivalente de arena:** por medio de este ensayo se podrá determinar la limpieza de la arena si tiene limos o arcillas excesivas, cuanto mayor es el equivalente de arena mejor es la calidad del material.
- **Pérdida por ataque de sulfatos:** los ensayos de durabilidad por sulfatos nos sirven para determinar la resistencia de una muestra a la pérdida de sus propiedades físicas o de apariencia.

Todos los ensayos de calidad de la arena deben estar sujetos a las mismas especificaciones que deben cumplir con los criterios de acuerdo a la tabla 2.3 y están desarrollado el procedimiento detallado en el capítulo III.

Tabla 2.3 Requisitos de calidad de la arena para matrices finas N-CMT

Características	Valor
Determinación de la densidad relativa y densidad aparente	---
Absorción de la arena	$\leq 1,2\%$
Equivalente de arena, mínimo	50%
Pérdidas por ataque de sulfatos, máximo	10%
Ensayo azul de metileno	≤ 7 gr

Fuente: Instituto mexicano de características de los materiales

Nota:

- El ensayo de durabilidad de pérdidas por ataque de sulfatos solo se debe realizar en caso de que la absorción de la arena arroje un valor superior a lo especificado.
- El ensayo de azul de metileno se debe hacer solo en caso de el ensayo de equivalente de arena arroje un resultado menor al 50% y/o $\geq 45\%$.

2.7.1.2. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico 85/100

El asfalto es un material de propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, tiene características de flexibilidad, consistencia, adhesividad y durabilidad, pero es susceptible a cambios de temperatura. Por ello se realizan los siguientes ensayos de calidad según las normas en laboratorio y provista por el fabricante que es la ASTM y AASHTO.

Los requisitos de calidad se muestran en la tabla 2.4 el desarrollo de cada ensayo se encuentra detallado en el capítulo III.

- **Ensayo de peso específico del cemento asfáltico:** determina el peso específico del cemento asfáltico utilizando el picnómetro con agua a 25°C.
- **Ensayo de penetración:** determina la dureza de del cemento asfáltico y clasificar a que tipo corresponde.
- **Ensayo de ductilidad:** este ensayo permite determinar la ductilidad o estado de alargamiento de los cementos asfálticos, este proceso se efectúa a una temperatura normalizada de 25°C y a una velocidad de 5 cm/min.
- **Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol:** permite conocer los valores de la resistencia del asfalto a fluir a una temperatura de 135°C.
- **Ensayo de punto de inflamación:** este ensayo se determina el punto de ignición o punto de llama del betún en estudio.
- **Ensayo de punto de ablandamiento:** con este equipo se determina el punto en que se reblandece el asfalto a temperaturas reales de la puesta en obra.
- **Ensayo de película delgada:** nos sirve para determinar la pérdida de masa que sufre el cemento asfáltico usando un horno rotatorio.

Tabla 2.4 Requisitos para el cemento asfáltico 85-100

Ensayo	Exigencias		Norma	
	mínimo	máximo	ASTM	AASHTO
Peso específico	1	1,05	D70-76	T228-93
Penetración	85	100	D-5	T49-97
Ductilidad	100	-	D-113	T51-00
Viscosidad Saybolt Furol	85	-	E-102	T-72
Punto de inflamación	230	-	D-92	T48-04
Punto de ablandamiento	42	53	D-36	T53-96
Película delgada	-	1	D-1754	T179-05
Penetración del residuo	50	-	D-5	T49-97

Fuente: Elaboración propia

2.7.2. Característica y propiedades de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está

enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla, como: la densidad de la mezcla, vacíos de aire o simplemente vacíos, vacíos del agregado mineral y el contenido de asfalto.

2.7.2.1. Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

2.7.2.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5%, dependiendo del diseño específico o difieren cuando son mezclas solamente con arena que varían entre 2 a 4% de vacíos.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

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

2.7.2.3. Vacíos en el agregado mineral VAM

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los

espacios que están llenos de asfalto. Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

La relación betún vacíos RBV; expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta, esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM) que contiene asfalto.

2.7.2.4. Contenido de asfalto

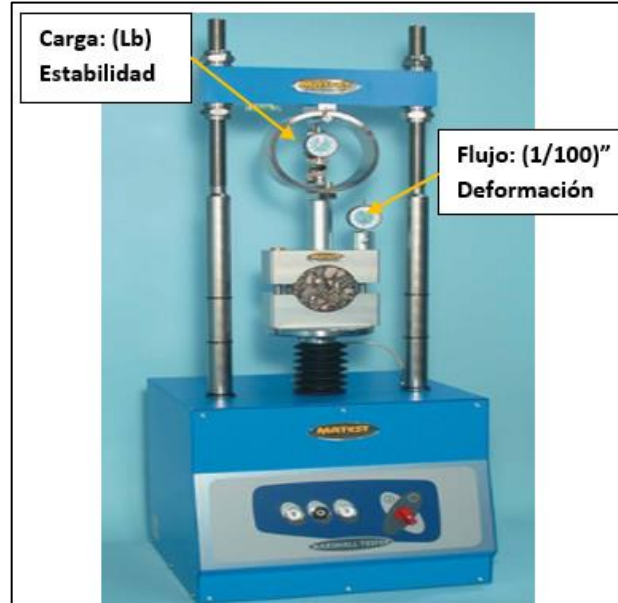
El contenido de asfalto en una mezcla es muy importante ya que en gran parte las características del agregado como la granulometría está directamente relacionado con el contenido óptimo de asfalto. Entre más fino contenga la graduación de la mezcla mayor será el área superficial total y mayor será a cantidad de asfalto a cubrir uniformemente todas las partículas y para las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial a cubrir.

2.7.3. Propiedades consideradas en el diseño Marshall de mezclas asfálticas

El ensayo Marshall simula la resistencia de la mezcla compactada a soportar cargas y su comportamiento plástico ante las solicitaciones mediante la máquina Marshall. Los parámetros que se obtienen son dos: la “estabilidad” [kg o libras] y la “fluencia” [mm o centésimas de pulgada].

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto.

Figura 2.9 Prensa Marshall



Fuente: <https://jlz-logistica.com/web/product/prensa-marshall-30-kn/>

2.7.3.1. Estabilidad de la mezcla (Lb)

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

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en libras que soporta una probeta aproximadamente de 6,35 cm. de altura y 10,0 cm. de diámetro cuando se la ensaya a temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5,8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica, La estabilidad es la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones).

La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

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

La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Varía intensamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece. Generalmente para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea diversos métodos, pero para nuestro caso de estudio se usa el método Marshall.

La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre todas las partículas ha llegado a un valor crítico. Un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla, pero aumentando su durabilidad. Por esta razón es mejor conservar el contenido de asfalto tan alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

2.7.3.2. Fluencia de la mezcla (1/100”)

Es la deformación total expresada en centésimas de pulgada que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Los valores de fluencia se incrementan, con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

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

2.7.4. Criterios de dosificación para matrices finas

Para tener resultados de la dosificación de las matrices finas debe cumplir ciertos criterios el cual usaremos la norma IRAM 6548. Esta norma estaba basada en mezclas con arena y nos sirve para tomar sus parámetros representativos para la elaboración de las matrices asfálticas finas.

Tabla 2.5 Criterios de dosificación para matrices finas

Requisitos de dosificación		
Parámetro		Exigencia
Ensayo Marshall (IRAM 6845)	Nº golpes por cara	50
	Estabilidad	> 8 kN - 1800 lb.
	Fluencia	8 - 16 (1/100")
	Vacíos en la mezcla	2 - 4%
	Vacíos de agregado mineral (VAM)	> 16%
	Relación Betún - Vacíos (RBV)	75 - 85%

Fuente: Norma IRAM 6845

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MATRICES FINAS Y ASFALTO ESPUMADO CON MATERIALES LOCALES

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MATRICES FINAS Y ASFALTO ESPUMADO CON MATERIALES LOCALES

3.1. UBICACIÓN DE ESTUDIO

En los capítulos anteriores se conocieron aspectos fundamentales de las mezclas de matrices finas, los materiales que lo conforman y las normas con las que se puede trabajar para su diseño. El presente capítulo de la investigación fue realizado en la ciudad de Tarija-Bolivia, la exploración de los bancos de material se encuentra en proximidad de la ciudad que son provenientes de una fuente natural que estén limpios de impurezas y otra fuente de trituración de una planta chancadora de áridos.

Los estudios de caracterización de los agregados, del cemento asfáltico y del asfalto espumado se los realizó en los laboratorios de hormigón y asfaltos de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho” y en el laboratorio de suelos, asfaltos y hormigones “S.A.H” teniendo de referencia las especificaciones de las normas ASTM y AASHTO que son las más utilizadas en laboratorio y para los parámetros de dosificación de la mezcla de matrices asfálticas finas y se consideró la norma IRAM 6845 que también tiene como referencia a las anteriores especificaciones.

3.2. UBICACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES

Para la obtención del agregado fino se obtuvo de dos bancos diferentes:

Banco N° 1

Fuente: Natural

Departamento: Tarija

Provincia: Cercado – Tarija

Ubicación: Río Guadalquivir

Localidad: San Mateo

Coordenadas: -21,464997 -64,747396

Acceso: 0,15 km

Figura 3.1 Imagen satelital Río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia

Observaciones: este material de fuente natural se extrajo del río Guadalquivir por la altura de la localidad de San Mateo, se procedió a extraer la arena mediante excavación para después zarandearlo así poder eliminar la impurezas y material orgánico y llevar en bolsas de yute a laboratorio para su respectiva caracterización. Este tipo de arena se emplean generalmente en obras complementarias para infraestructuras y también como alternativa en mezclas de pavimento flexible que tenga bajo tránsito vehicular.

Banco N° 2

Fuente: Triturada

Departamento: Tarija

Provincia: Cercado – Tarija

Ubicación: Chancadora “La Pintada”

Localidad: La Pintada

Coordenadas: -21,604465 -64,641690

Acceso: 0,05 km de carretera nacional 1.

10,0 km de la ciudad de Tarija

Figura 3.2 Imagen satelital chancadora "La Pintada"



Fuente: Elaboración propia

Observaciones: esta arena de fuente triturada se lo trajo de forma directa debido a que ya se encontraba a disposición y seleccionado en la planta chancadora de La Pintada, la arena triturada se usará para tener una comparación respectiva con el agregado natural, este tipo de arena son empleadas en nuestro medio como alternativas para pavimentar en zonas de bajo tránsito vehicular, en la estructura de las capas base, sub base y mantenimientos de pavimentos flexibles y en otras infraestructuras que lo ejecuta la alcaldía municipal.

Cemento asfáltico:

El cemento asfáltico fue proporcionado mediante la secretaria municipal de infraestructura y servicios públicos de la alcaldía municipal de Tarija, de la marca Betunel 85-100 cuya procedencia es de Brasil, las características deben estar dentro del norma especificada y la ficha técnica (anexo E) establecida para su aplicación en la investigación.

Figura 3.3 Imagen satelital planta de asfalto alcaldía de Tarija



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Planta de asfalto de la alcaldía de Tarija.



Fuente: Elaboración propia

3.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA MATRIZ FINA

La metodología desarrollada para los diferentes ensayos, son de caracterización a los materiales que componen una mezcla de matrices finas FAM, analizando que estas cumplan con las especificaciones según las normativas establecidas a usar y la forma en que se las ejecuta, así también dar cumplimiento con los objetivos planteados.

3.3.1. Caracterización del agregado fino

Los respectivos ensayos de caracterización de la arena para una matriz asfáltica fina FAM, son con el objetivo de conocer la calidad y el comportamiento que tendrá en la dosificación de las mezclas.

3.3.1.1. Granulometría para matrices finas

El análisis granulométrico de la arena tiene por objeto separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños mediante el empleo de mallas de abertura cuadrada de tamaños N°16,30,50,100 y 200, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total, observando que estos cumplan con la calidad y especificaciones establecidas para la dosificación de la matriz asfáltica fina.

Procedimiento:

Primeramente, tomamos una muestra del agregado fino y procedemos a lavar con agua

hasta que emerja con claridad para tratar de eliminar la mayor cantidad de material orgánico y eliminar las impurezas que pueda tener tanto el material de procedencia natural a fin de tener una muestra representativa del material a ensayar.

Una vez obtenido el lavado de la muestra procedemos a poner en un recipiente para colocar en el horno durante 24 horas a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, para que en ese periodo de tiempo se pueda secar el material. Cuando ya esté seca la muestra procedemos a pesar un 1 kilogramo de material y debemos montar los tamices en orden decreciente de la siguiente manera: tapa, N°16,30,50,100,200 y la base. Echamos el material para luego proceder a tamizar manualmente, agitando todos los tamices juntos de forma gradual y con movimientos envolventes durante unos 10 minutos. Finalmente procedemos a pesar del retenido en cada tamiz, verificando que cumpla con los rangos de las especificaciones a usar de la norma N-CMT que tiene como requisitos de granulometría del material pétreo para morteros asfálticos.

Figura 3.5 Proceso de gradación del agregado fino

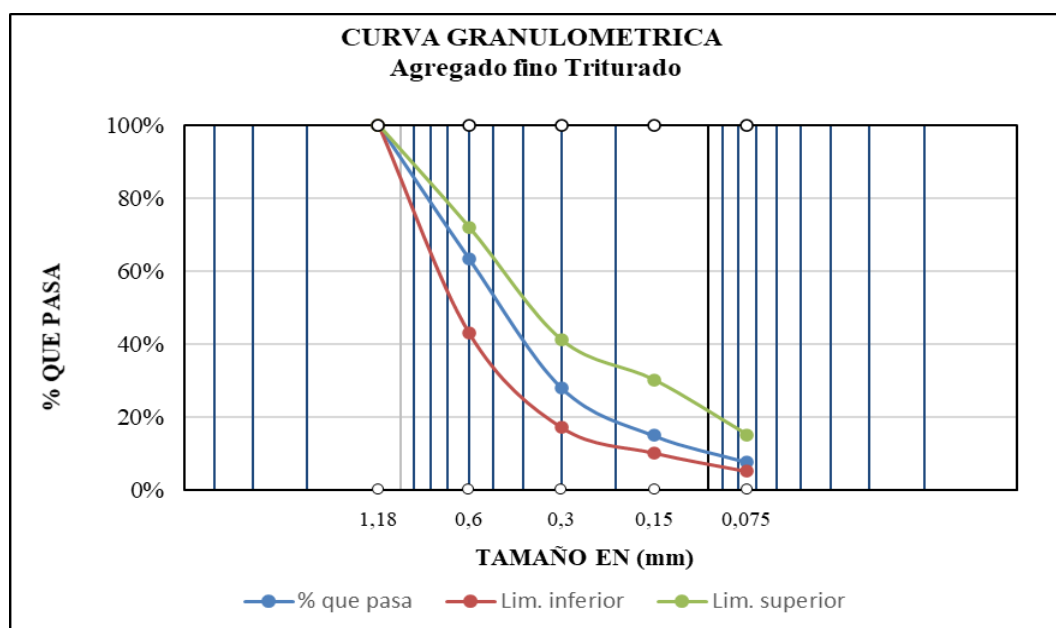


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1 Resultados de la granulometría - Arena triturada

Tamices	Retenido acumulado (gr)	% que pasa del total	Especificación N-CMT
N°16	0,00	100,00	100
N°30	366,30	63,37	43 - 72
N°50	720,90	27,91	17 - 41
N°100	851,70	14,83	10 - 30
N°200	924,20	7,58	5 - 15

Fuente: Elaboración propia

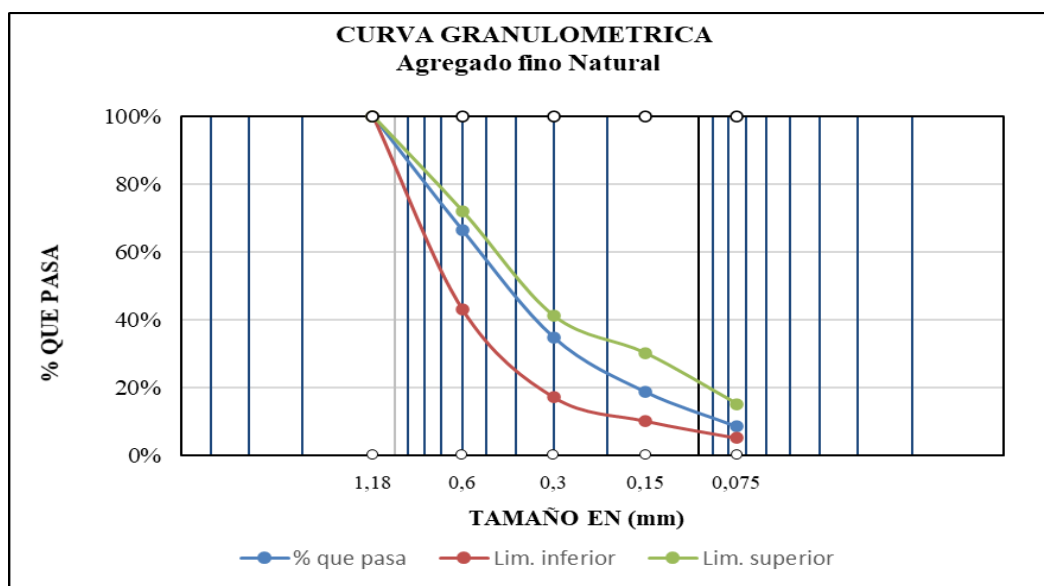
Figura 3.6 Curva granulométrica - Arena triturada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Resultados de la granulometría - Arena natural

Tamices	Retenido acumulado (gr)	% que pasa del total	Especificación N-CMT
N°16	0,00	100,00	100
N°30	336,20	66,38	43 - 72
N°50	653,60	34,64	17 - 41
N°100	813,70	18,63	10 - 30
N°200	916,30	8,37	5 - 15

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Curva granulométrica - Arena natural

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Peso específico y absorción del agregado (ASTM E-128)

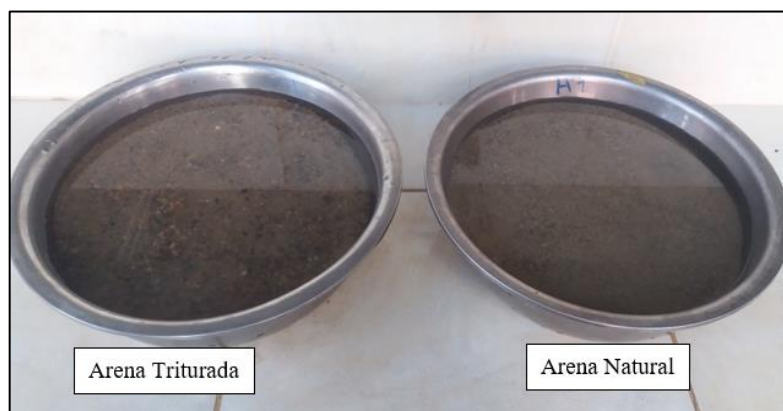
Este ensayo tiene por objetivo determinar el peso específico aparente y la absorción de la arena (después de 24 horas) cuyas partículas tengan un tamaño menor a 1,18 mm. Por definición el peso específico es la relación entre el peso del aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente, es necesario establecer para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas.

Procedimiento:

De acuerdo a la indicación de la norma ASTM E-128 para determinar el peso específico de la arena se trabaja con el material que pase el tamiz N°4, sin embargo, en la investigación se usara la fracción que pase el tamiz N°16 tomando en cuenta que a partir de ese tamiz es la conformación de una matriz fina.

Teniendo la muestra representativa, se debe homogenizar completamente la muestra y eliminar el material de tamaño superior al tamiz N°16 y lavar la muestra con agua hasta que emerja con claridad, se selecciona una muestra aproximada de 1500 gr y se sumerge en agua durante un periodo de 24 horas.

Figura 3.8 Muestra de arena lavada y en reposo durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Culminado el tiempo se debe vaciar el agua y hacer secar a temperatura ambiente, se puede usar para el secado una secadora para lograr que el material alcance la condición de saturado con superficie seca. Luego colocamos la arena en el molde cónico en condición suelta y procedemos a compactar con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie y cuando se levante el cono la muestra debe rodar suavemente indicando que alcanzó la condición saturada superficialmente seca, si sucede que la muestra rueda ligeramente es porque fue muy secada y se lo deberá rociar con agua dejando por unos 30 minutos para volver a colocar el cono.

De esta condición de la muestra pesamos 500 gr y se coloca en un matraz previamente pesado y se llena con agua a 25°C hasta los 500 ml y procedemos a agitar el matraz para eliminar las burbujas de aire golpeando suavemente con la palma de la mano dejando reposar un instante para pesar el total de la masa del matraz con la muestra y el agua. Después sacamos la muestra del matraz en un recipiente evitando pérdidas para hacerle secar en el horno a una temperatura constante de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ para luego registrar el peso seco de la muestra. Este procedimiento se realizó para 3 muestras para el agregado fino natural y triturado.

Figura 3.9 Muestra saturada y en el matraz

Fuente: Elaboración propia

Fórmulas:

Peso específico a granel

$$\text{P. Especifico a granel P. E. a Granel} = \frac{A}{V - W}$$

Peso específico saturado con superficie seca

$$\text{P. E. Saturado con sup. seca} = \frac{500}{V - W}$$

Peso específico aparente

$$\text{P. E. Aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

Absorción del agregado

$$\text{P. E. a Granel} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

Donde:

A= Peso seco del agregado en gramos

V= Volumen del matraz en ml

W= Peso del agua agregada al matraz en gramos.

Cálculos: ejemplo para la muestra 1

- Peso específico a granel

$$\text{P. E. a Granel} = \frac{497,1}{500 - 304,6}$$

$$\text{P. E. a Granel} = 2,54 \text{ gr/cm}^3$$

- Peso específico saturado con superficie seca

$$\text{P. E. Saturado con sup. seca} = \frac{500}{500 - 304,6}$$

$$\text{P. E. Saturado con sup. seca} = 2,56 \text{ gr/cm}^3$$

- Peso específico aparente

$$\text{P. E. Aparente} = \frac{497,1}{(500 - 304,6) - (500 - 497,1)}$$

$$\text{P. E. Aparente} = 2,58 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 3.3 Resultado del peso específico - Arena triturada

Descripción	Unidad	Muestra			Promedio
		1	2	3	
Peso muestra saturada con superficie seca	gr	500	500	500	
Peso de matraz	gr	166,1	177,2	185,1	
Peso muestra +matraz +agua	gr	970,7	975,3	976,7	
Peso del agua agregada al matraz "W"	gr	304,6	298,1	291,6	
Peso muestra secada "A"	gr	497,10	496,80	495,90	
Volumen del matraz "V" (ml)	ml	500,00	500,00	500,00	
Peso específico a granel	gr/cm ³	2,54	2,46	2,38	2,46
Peso específico saturado con superficie seca	gr/cm ³	2,56	2,48	2,40	2,48
Peso específico aparente	gr/cm ³	2,58	2,50	2,43	2,50
% de Absorción	%	0,58	0,64	0,82	0,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Resultados del peso específico - Arena natural

Descripción	Unidad	Muestra			Promedio
		1	2	3	
Peso muestra saturada con superficie seca	gr	500	500	500	
Peso de matraz	gr	195,5	196,7	185,6	
Peso muestra +matraz +agua	gr	986,3	994,5	980,4	
Peso del agua agregada al matraz "W"	gr	290,8	297,8	294,8	
Peso muestra secada "A"	gr	496,90	495,60	495,10	
Volumen del matraz "V" (ml)	ml	500,00	500,00	500,00	
Peso específico a granel	gr/cm3	2,38	2,45	2,41	
Peso específico saturado con superficie seca	gr/cm3	2,39	2,47	2,44	2,43
Peso específico aparente	gr/cm3	2,41	2,51	2,47	2,46
% de Absorción	%	0,62	0,88	0,98	0,83

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Equivalente de arena (ASTM D-2419)

Este método de ensayo tiene por objetivo determinar la presencia de finos arcillosos o plásticos en el agregado fino que pasan por el tamiz N°16 (1,18mm).

Procedimiento:

Comenzamos a tamizar el material que en nuestro caso será que pase por el tamiz N°16 para tener una muestra representativa para el ensayo, previamente se debe tener una solución química de cloruro de calcio que se diluirá 22,5 ml en 1 litro de agua destilada.

Con la ayuda del embudo se vierte la muestra aproximadamente unos 40 gr de arena en el cilindro graduado de plástico, después echar la solución en el cilindro golpear en el fondo de la probeta con la palma de la mano hasta desalojar las burbujas de aire dejando reposar por un periodo de 10 minutos, pasado el tiempo se coloca un tapón para agitar la muestra manualmente en forma horizontal haciendo 90 ciclos en 30 segundos, un ciclo corresponde a un movimiento completo de ida y vuelta con los brazos y debe ser a una velocidad constante. Terminada la agitación se coloca el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y se realiza un lavado al material que hay en las paredes del cilindro, llenando con la solución hasta la línea superior del cilindro para dejar reposar unos 25±5 minutos,

posteriormente se toma la lectura de la parte superior de las arcillas suspendidas en la solución y para la parte inferior se introduce un pisón bajando lentamente dentro del tubo hasta llegar sobre la arena y se lectura el nivel alcanzado de la arena.

Figura 3.10 Preparación del material para el E.A.



Fuente: Elaboración propia

Fórmula:

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{lectura de nivel inferior}}{\text{lectura de nivel superior}} * 100$$

Cálculo: ejemplo para la muestra 1 con arena triturada

$$\text{E.A. T.}_1 = \frac{9.7}{10.6} * 100 = 91,51 \%$$

Tabla 3.5 Equivalente de arena - Arena Triturada

Descripción	Lecturas		
	1	2	3
Ensayo			
Lectura nivel superior	10,6	10,7	10,5
Lectura nivel inferior	9,7	9,8	9,7
% arena	91,51	91,59	92,38
Promedio E.A.	91,83		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Equivalente de arena - Arena natural

Descripción	Lecturas		
	1	2	3
Ensayo	1	2	3
Lectura nivel superior	11,3	11,9	12,1
Lectura nivel inferior	8,9	9,1	9,5
% arena	78,76	76,47	78,51
Promedio E.A.	77,91		

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (ASTM C-88)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil de la obra.

Procedimiento:

La solución de sulfato de sodio se prepara disolviendo la sal anhidra en agua limpia a una temperatura de 25°C, procedemos a pesar 350gr de sulfato de sodio para 1 litro de agua y se coloca en un recipiente el agua y de poco a poco el sulfato para mantener la presencia cristalina de la solución, después se lo deja reposar durante 48 horas para que sean empleadas en la arena.

Figura 3.11 Muestra de sulfato de sodio y agua a 25°C



Fuente: Elaboración propia

Para la muestra del agregado fino se procede a lavar el material sobre el tamiz N°50 y se lo hace secar en el horno a 110 ± 5 °C, una vez teniendo la muestra seca se lo procede a realizar una separación preliminar por medio de tamices conformado por el N°16,30 y 50, de acuerdo a la conformación de una FAM se trabaja en lo que se retiene en el tamiz N°30 y 50. Se debe pesar muestras de 100gr de cada una de las fracciones separadas después del tamizado final y poner en un recipiente. Luego ponemos la solución a las muestras, estas deben estar sumergidas durante 18 horas y os recipientes deben estar tapados con otra fuente una vez colocada la solución para evitar la evaporación e impedir la adicción accidental de sustancias extrañas.

Después del periodo de inmersión se retira la solución al mismo recipiente donde reposo evitando las pérdidas de partículas y se lo lleva el material al horno a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta que tenga un peso constante a la temperatura especificada, luego se deja enfriar a temperatura ambiente y sumergir de nuevo en la solución, todo ese proceso es para 1 ciclo del ensayo, esto se lo realiza durante 5 ciclos como explica la normativa y se los trabajo para los dos tipos de arena como la natural y triturada.

Al finalizar los 5 ciclos, se procede a lavar la muestra y hacerlo secar durante un periodo de 24 horas en el horno y luego se tamiza por el mismo tamiz en que es retenido la muestra inicial y se anota el peso final de la muestra trabajada.

Figura 3.12 Muestra sumergida en la solución y seca



Fuente: Elaboración propia

Fórmula:

$$\text{Pérdida \%} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} * 100$$

Calculo: ejemplo para el primer ensayo

$$\text{Pérdida parcial} = \frac{100 - 96,7}{100} * 100 = 3,3 \%$$

Corrección: con el porcentaje retenido original

$$\text{Pérdida corregida} = \frac{\text{Ret. original} - \text{Perdidas parciales}}{100}$$

$$\text{Pérdida corregida} = \frac{36,63 \% - 3,3\%}{100\%} = 1,21 \%$$

Tabla 3.7 Resultados de pérdidas por sulfato - Arena triturada

Tamices		Retenido original (%)	Peso antes del ensayo (gr)	Peso después del ensayo (gr)	Perdidas parciales (%)	Perdidas corregidas (%)
Pasa	Retenido					
N°8	N°16	-	-	-	-	-
N°16	N°30	36,63	100	96,7	3,3	1,21
N°30	N°50	72,09	100	95,9	4,1	2,96
Pérdidas Totales=						4,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Resultados de pérdidas por sulfato - Arena natural

Tamices		Retenido original (%)	Peso antes del ensayo (gr)	Peso después del ensayo (gr)	Perdidas parciales (%)	Perdidas corregidas (%)
Pasa	Retenido					
N°8	N°16	-	-	-	-	-
N°16	N°30	33,62	100	97,4	2,6	0,87
N°30	N°50	65,36	100	94,7	5,3	3,46
Pérdidas Totales=						4,34

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

3.3.2.1. Peso específico (ASTM D70-76, AASHTO T228-93)

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada.

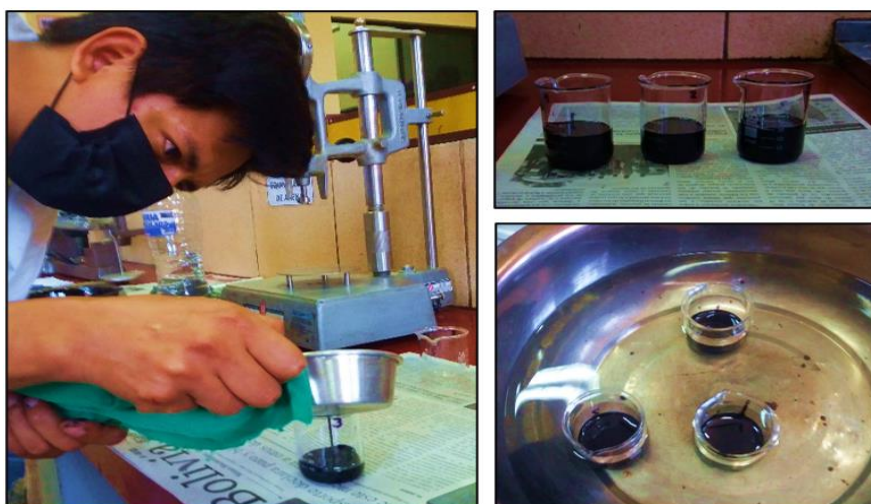
Procedimiento:

Se debe calentar la muestra de cemento asfáltico a una temperatura no mayor a 100°C evitando sobrecalentamientos para que no pierda sus propiedades.

Se debe limpiar el picnómetro, enjuagar con agua destilada y se debe secar bien para que se pueda realizar la calibración. Después dejamos que el picnómetro alcance una temperatura ambiente para pesar con una aproximación de 1 mg, el peso del picnómetro vacío se designa como A y el peso del picnómetro con agua será B. Luego verter una cantidad aproximada de 25 ml de asfalto en el picnómetro y dejar enfriar a temperatura ambiente, al peso del picnómetro con la muestra se lo asigna como C.

Después al picnómetro que contiene asfalto llenamos con agua destilada y colocamos en baño de agua a temperatura de 25°C, se deja al picnómetro durante unos 30 minutos manteniendo la misma temperatura, pasado el tiempo se lo saca y procede a pesar la muestra completa y asignamos como D, para determinar el peso específico del asfalto.

Figura 3.13 Colocación del lígate en el picnómetro



Fuente: Elaboración propia

Fórmula:

$$\text{Peso específico C. A.} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

A= Masa del picnómetro.

B= Masa del picnómetro lleno con agua

C= Masa del picnómetro lleno con asfalto

D= Masa del picnómetro con asfalto más agua

Cálculos: ejemplo para la muestra 1

$$\text{Peso específico C. A.}_1 = \frac{(66,8 - 36,8)}{(88,9 - 36,8) - (89,8 - 66,8)}$$

$$\text{Peso específico C. A.}_1 = 1,028 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 3.9 Resultado del peso específico del cemento asfaltico

Ensayo	Peso específico	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro A		gr.	36,8	35,7	37,1
Peso picnómetro + agua (25°C) B		gr.	88,9	85,1	89,3
Peso picnómetro +muestra C		gr.	66,8	63,2	67,2
Peso picnómetro + agua + muestra D		gr.	89,8	85,2	88,7
Peso específico promedio		gr/cm ³	1,028	1,001	0,978
Resultado		gr/cm ³	1,002		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Penetración (ASTM D5, AASHTO T49-97)

Este ensayo tiene por objetivo determinar la dureza y consistencia relativa de los cementos asfálticos, midiendo la distancia expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja de 100 gramos.

Procedimiento:

Se comienza calentando el material asfáltico unos 500 gr en un recipiente tratando que no esté sobrecalentado y que a su vez este fluida para vaciar en las tres taras dejando enfriar durante el periodo de una hora a temperatura ambiente, pasado el tiempo de enfriamiento se coloca las taras con la muestra en un baño de agua manteniendo una temperatura de 25°C por una hora.

Cuando pase los tiempos de inmersión, se lleva las taras al equipo de penetración donde se añade una pesa de 50 gr sobre la aguja de tal forma que la carga sea de 100 ± 0.1 gr para la aguja, eje y accesorios. Posteriormente colocar la muestra en el equipo y aproximar la aguja hasta que la punta roce con la superficie del asfalto sin que se llegue a penetrar. Finalmente se suelta la aguja durante 5 segundos sin soltar el seguro para penetrar la muestra y por medio del indicador se procede a lecturar la distancia de penetración, se debe realizar tres puntos diferentes distantes a 1 cm del punto inicial.

Figura 3.14 Ligante en baño con agua y lectura de penetración



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Resultados del ensayo de penetración

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25°C, 100s 5s.	Lectura N°1	mm	84	86	89
	Lectura N°2	mm	86	88	87
	Lectura N°3	mm	88	87	88
Promedio		mm	86	87	88
Promedio final		mm	87		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3. Ductilidad (ASTM D113, AASHTO T51-00)

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

Procedimiento:

Se calienta cuidadosamente el material asfáltico hasta que este fluido para verter en los moldes, antes de vaciar el asfalto se debe cubrir la base del molde con una solución de talco y vaselina para cubrir en las partes donde será desmoldado evitando colocar en los cabezales que sujetan para su estiramiento.

Se vierte el material asfáltico en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire. Se deja enfriar a temperatura ambiente durante unos 40 minutos, pasado el tiempo se coloca en un baño de agua a una temperatura de 25°C durante 30 minutos manteniendo esa misma temperatura, seguidamente se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

Se pone en marcha el ductilímetro, el material asfáltico entre las pinzas se va estirando paulatinamente con una velocidad de 5 cm por minuto hasta formar un hilo produciéndose una rotura, el cual se mide la distancia en cm en que se haya producido la separación de ambas pinzas hasta ese instante, el proceso de estiramiento del asfalto debe ser a una temperatura de 25°C.

Figura 3.15 Muestras y estiramiento en agua a 25°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11 Resultado de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3
Ductilidad a 25°C	cm	113	117	115
Promedio		115		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4. Viscosidad Saybolt Furol (ASTM E102, AASHTO T-72)

La viscosidad se define como la resistencia al flujo de un líquido, la facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio “Furol” es una indicación de su viscosidad, este es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro de “Saybolt”.

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites, sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 ml de líquido con una temperatura determinada, a través de un tubo de dimensiones específicas.

Procedimiento:

Se inicia limpiando el aparato con gasolina teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro. Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso. Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida de manera que quede introducido más de 6,3 mm y menos de 9,5 mm.

Se vierte la muestra en el tubo hasta que deje de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante a 135°C. Se pone el frasco calibrado de 60 ml en una posición tal que este centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco.

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

Figura 3.16 Equipo Saybol Furol



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Resultados de la viscosidad Saybol Furol

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3
Viscosidad Saybolt 135°C	Sg.	264	260	262
Promedio		262		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.5. Punto de inflamación (ASTM D-92, AASHTO T48-04)

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. Este método cubre la determinación del punto de inflamación, por el ensayo del vaso abierto de Cleveland, de productos de petróleo.

Procedimiento:

Se llena la copa con cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura, el termómetro debe ser colocado de manera vertical ubicado al centro de la copa. Cuando la temperatura de la muestra este por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación. Cuando la temperatura se aproximó a 230°C se aplica la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie, se debe realizar tres ensayos para tener un valor representativo.

Figura 3.17 Equipo copa abierta de Cleveland



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Resultado de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3
Punto de Inflamación	°C	261	256	258
Promedio		258		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.6. Punto de ablandamiento (ASTM D 36, AASHTO T53-96)

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de ablandamiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros y conocer el grado de susceptibilidad que tiene un material ante las variaciones de temperatura, indicando a que temperatura estos asfaltos se hacen fluidos.

Procedimiento:

Se debe tener la muestra de asfalto fluido para poder vaciar en los anillos, si hay exceso se debe sacar con una espátula con el fin que este al ras de la superficie del anillo y dejar reposar unos 20 minutos al aire libre. Luego comenzamos a ensamblar el aparato con los anillos, el termómetro y las guías para centrar las esferas en posición, se llena el frasco con agua fresca a $5\pm 1^{\circ}\text{C}$ con una profundidad no menor a 10 cm ni mayor a 11 cm y se debe mantener los anillos con las esferas y las guías centradas en el agua fría durante un periodo de 15 minutos. Cuando pase el tiempo determinado se comienza a hacer subir la temperatura de forma uniforme aproximado 5°C por minuto ayudado con una hornilla eléctrica pequeña, tomar en cuenta que cuando las esferas caen hasta la placa inferior en ese momento se registra la temperatura y eso se llama el punto de ablandamiento del asfalto para su mayor confiabilidad se realizó tres veces el ensayo.

Figura 3.18 Equipo para punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Resultado de punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3
Punto de Ablandamiento	°C	43	42	44
Promedio		43		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.7. Película delgada (ASTM D 1754, AASHTO T179-05)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar las pérdidas de masa del asfalto cuando se calientan a lo largo del tiempo.

Procedimiento:

Se debe calentar el cemento asfáltico hasta que tenga una consistencia líquida evitando sobrecalentar, luego se debe pesar los platillos planos para colocar la muestra en el cual se verterá unos 60 gr aproximadamente.

Cuando ya se tiene los platillos pesados con el asfalto se introduce los platillos en el horno, este debe tener una temperatura regulada de 163°C (325°F) para colocar las muestras en su interior sobre la placa circular y se procede al envejecimiento de la muestra, las placas del horno deben estar girando con las muestras a una velocidad de 5 a 6 rpm con la temperatura de 163±1°C durante un periodo de 5 horas.

Acabado el tiempo se saca los platos del horno y se procede a pesar cada platillo para verificar la pérdida que se haya producido y finalmente terminado el ensayo se vacía el residuo en una tara para poder realizar la prueba de penetración del residuo después del envejecimiento.

La fórmula para determinar la pérdida de masa del cemento asfáltico será:

Fórmula:

$$\text{Pérdida} = \text{peso inicial} - \text{peso final}$$

Figura 3.19 Muestras de asfalto en el horno rotatorio

Fuente: Elaboración propia

Cálculos: ejemplo para el ensayo 1

$$\text{Pérdida} = 153,1 - 152,1$$

$$\text{Pérdida} = 0,90 \text{ gr}$$

Tabla 3.15 Resultado de película delgada

Ensayo Película Delgada	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso Platillo	grs.	84,6	90,4	89,7
Peso platillo + muestra (Pi)	grs.	153,1	154,3	155,6
Peso muestra	grs.	68,5	63,9	65,9
Peso platillo + muestra después de 5h (Pf)	grs.	152,2	153,4	154,6
Perdidas	grs.	0,900	0,900	1,000
Promedio	grs.	0,933		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.8. Penetración del residuo (ASTM D5, AASHTO T49-97)

Después del ensayo de las pérdidas de masa por calentamiento se procede a realizar el ensayo de penetración a la muestra envejecida y endurecida

Tabla 3.16 Resultado de penetración del residuo

Ensayo Penetración del residuo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
	mm	59,0	58,0	57,0
Promedio	mm	58		

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Caracterización del asfalto espumado

Para la determinar las características del asfalto espumado se requiere una cámara de expansión, pero al no contar con la misma en laboratorio, se tuvo que hacer la elaboración de una cámara de expansión prototipo, para lo cual se utilizó los siguientes materiales: olla a presión, termómetro, tubo de cobre, válvula tipo mariposa, tubería de $\frac{3}{4}$, cinta teflón, silicona; para determinar las características del asfalto espumado y que sea aplicado en la investigación.

3.3.3.1. Vida media y razón de expansión

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se estableció un volumen inicial de asfalto de 60 cm³.
- Se calculó el peso de ese volumen de asfalto.
- Se debe calcular también el agua en mililitros a ser inyectada a la muestra de asfalto con variaciones de 2% a 4%, incrementado de 0,5%.
- Para realizar el ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150, 160, 170 y 180°C.
- Con estas temperaturas debe calentar el asfalto, para inyectar el primer porcentaje de agua en ml y registrar el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto, consecutivamente con una nueva muestra de asfalto se repitió el procedimiento y se inyectó un nuevo porcentaje de agua.
- El mismo procedimiento se realizó para las 5 temperaturas con sus diferentes cantidades de agua para caracterizar el asfalto espumado.

Figura 3.20 Equipo empírico para caracterizar el asfalto espumado



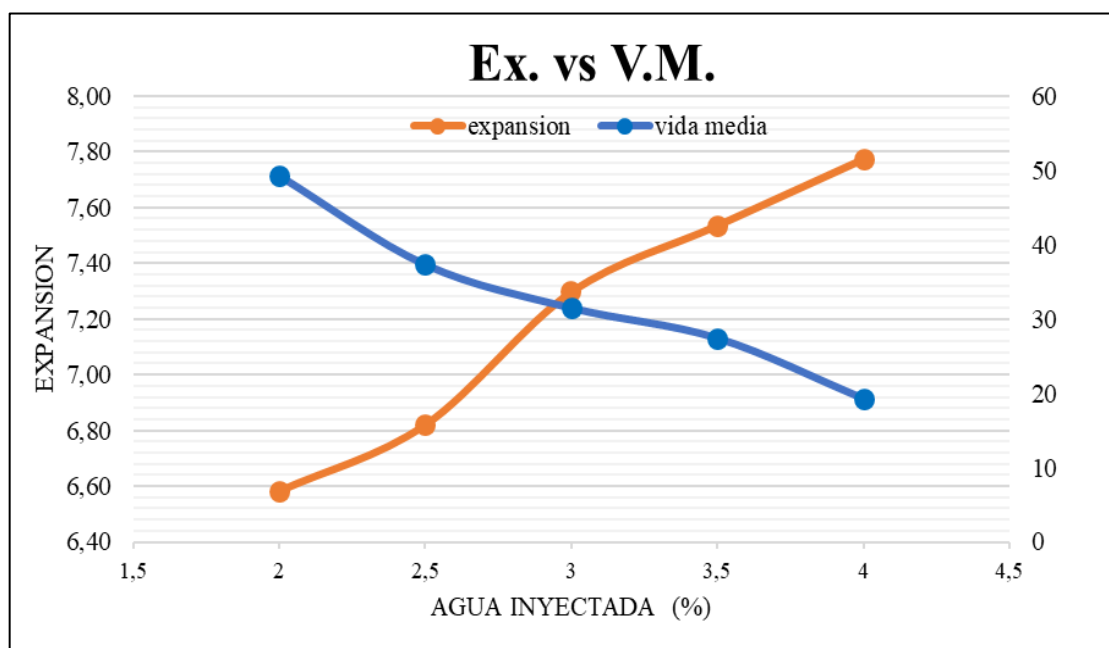
Fuente: Elaboración propia

- De acuerdo a la caracterización del asfalto espumado se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3.17 Primer ensayo de RE vs VM a T=140°C

Temperatura (°C):	140					
Vol. inicial de asfalto (cm³)	60					
Peso del asfalto (g)	60					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	Especific.
Vida media (seg)	49,28	37,32	31,49	27,42	19,27	>15
Vol. final de asfalto (cm³)	394,9	409,2	437,8	452,1	466,4	
Relación Expansión	6,58	6,82	7,30	7,54	7,77	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

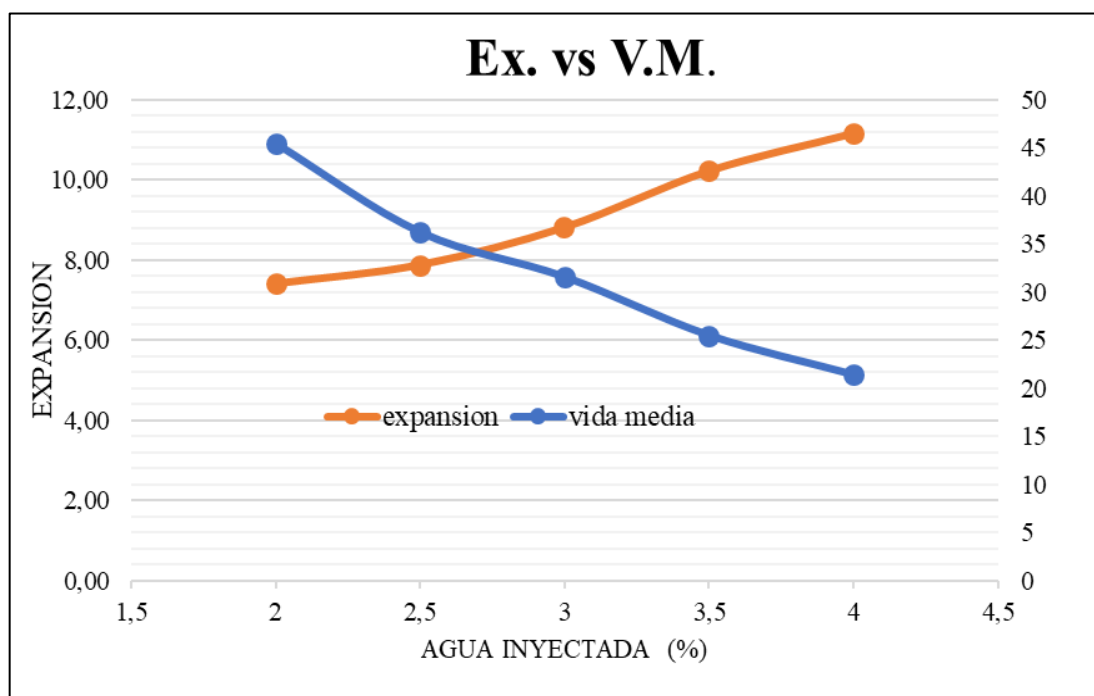
Figura 3.21 Relación de expansión y vida media T=140°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18 Segundo ensayo RE vs VM a T=150°C

Temperatura (°C):	150					
Vol. inicial de asfalto (cm³)	60					
Peso del asfalto (g)	61					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	Especific.
Vida media (seg)	45,41	36,19	31,55	25,47	21,38	>15
Vol. final de asfalto (cm³)	452,1	480,7	537,9	623,7	680,9	
Relación Expansión	7,41	7,88	8,82	10,22	11,16	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

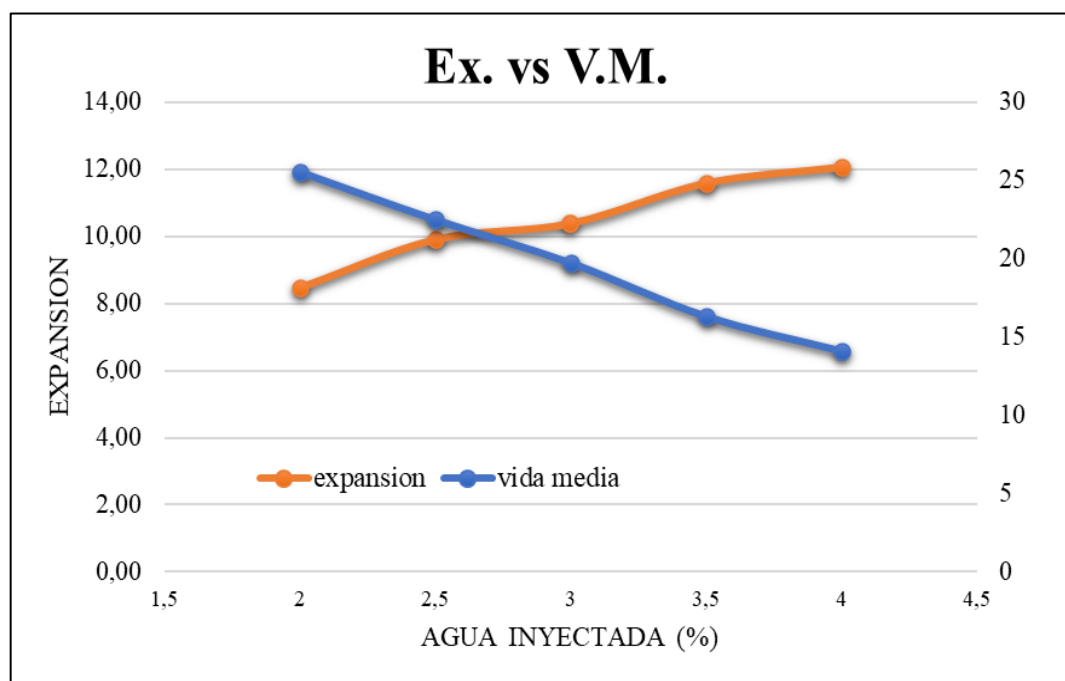
Figura 3.22 Relación de expansión y vida media T=150°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19 Tercer ensayo RE vs VM a T=160°C

Temperatura (°C):	160					
Vol. inicial de asfalto (cm3)	60					
Peso del asfalto (g)	60					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	Especific.
Vida media (seg)	25,58	22,52	19,74	16,31	14,08	>15
Vol. final de asfalto (cm3)	509,3	595,1	623,7	695,2	723,8	
Relación Expansión	8,49	9,92	10,40	11,59	12,06	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

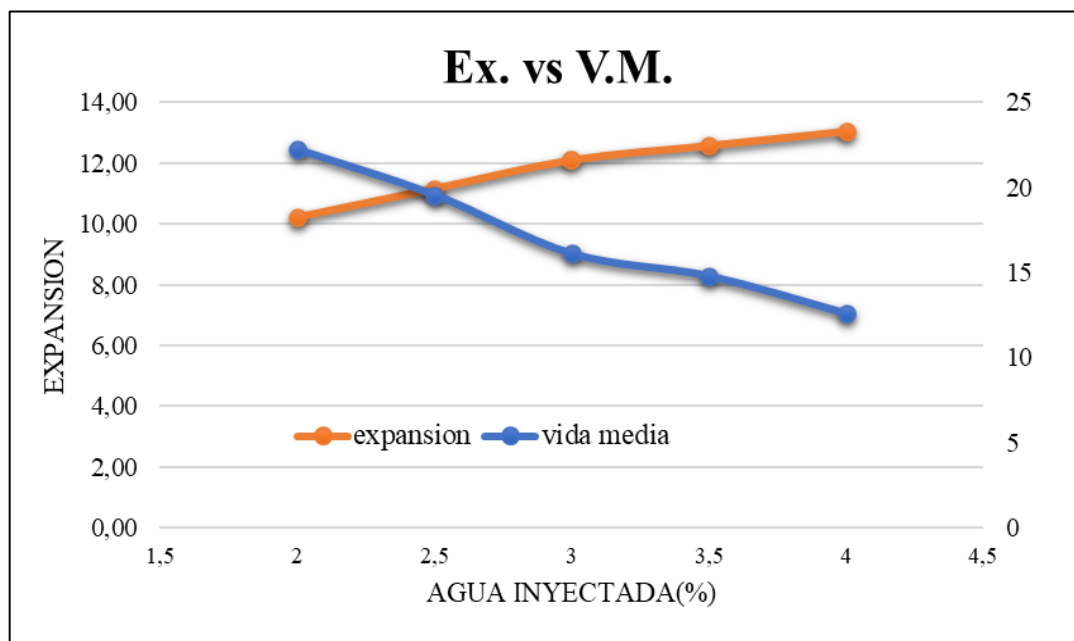
Figura 3.23 Relación de expansión y vida media a T=160°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Cuarto ensayo RE vs VM a T=170°C

Temperatura (°C):	170					
Vol. inicial de asfalto (cm³)	60					
Peso del asfalto (g)	61					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	Especific.
Vida media (seg)	22,23	19,56	16,11	14,79	12,59	>15
Vol. final de asfalto (cm³)	623,7	680,9	738,1	766,7	795,3	
Relación Expansión	10,22	11,16	12,10	12,57	13,04	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

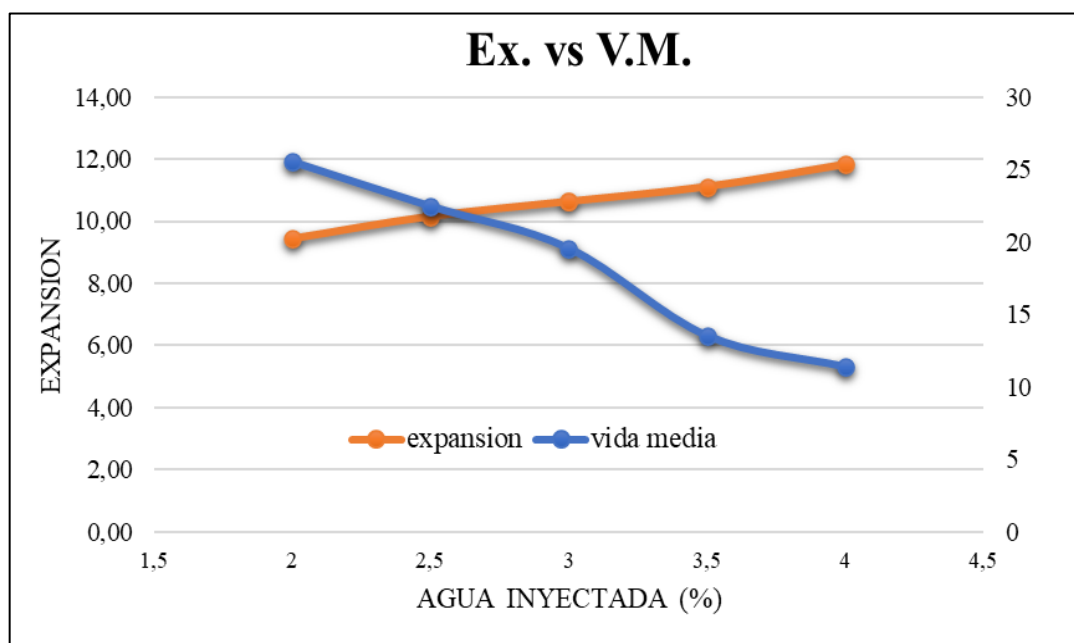
Figura 3.24 Relación de expansión y vida media a T=170°C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Quinto ensayo RE vs VM a T=180°C

Temperatura (°C):	180					
Vol. inicial de asfalto (cm³)	60					
Peso del asfalto (g)	60					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	Especific.
Vida media (seg)	25,53	22,46	19,57	13,55	11,41	>15
Vol. final de asfalto (cm³)	566,5	609,4	638	666,6	709,5	
Relación Expansión	9,44	10,16	10,63	11,11	11,83	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25 Relación de expansión y vida media a 180°C

Fuente: Elaboración propia

3.4. DISEÑO DE LA MEZCLA DE MATRICES FINAS FAM

3.4.1. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto que debe tener una FAM, se debe conocer el contenido mínimo de cemento asfáltico que tendrá la mezcla y poder realizar el diseño de las briquetas mediante el método Marshall con porcentajes diferentes de cemento asfáltico dando a conocer el contenido óptimo del cemento asfáltico.

Para establecer el contenido mínimo usaremos el método de distribución de agregados mediante la siguiente ecuación:

$$A = 0,020 * a + 0,045 * b + 0,15 * c$$

Donde:

A= Contenido de asfalto mínimo.

a= Porcentaje (%) del material retenido en la malla n°10

b= Porcentaje (%) material que pasa la malla n°10 y se retiene en la malla n°200

c= Porcentaje (%) del material que pasa la malla n°200

3.4.1.1. Contenido mínimo para el agregado triturado

$$a = 0 \%$$

$$b = 92,42 \%$$

$$c = 7,58 \%$$

$$A = 0,020 * a + 0,045 * b + 0,15 * c$$

$$A = 0,020 * 0 + 0,045 * 92,42 + 0,15 * 7,58$$

$$A = 5,30 \%$$

3.4.1.2. Contenido mínimo para el agregado natural

$$a = 0 \%$$

$$b = 91,63 \%$$

$$c = 8,37 \%$$

$$A = 0,020 * a + 0,045 * b + 0,15c$$

$$A = 0,020 * 0 + 0,045 * 91,63 + 0,15 * 8,37$$

$$A = 5,38 \%$$

3.4.2. Dosificación de la mezcla para matrices finas

Una vez determinamos el contenido mínimo para los dos tipos de agregados de acuerdo a la granulometría, se elaborará con seis porcentajes distintos tres por cada porcentaje en total de 18 briquetas partiendo desde el mínimo calculado e ir incrementando de 0,5% de tal forma que en las curvas que representen los resultados muestren un valor óptimo definido de cemento asfáltico para las matrices finas a espumar y así poder determinar el contenido óptimo de las mezclas a estudiar.

A continuación, se presenta las tablas 3.22 y 3.23 la dosificación para la granulometría de los agregados finos de fuente triturada y natural con el cemento asfáltico convencional, para determinar el contenido óptimo de asfalto para el diseño de las matrices finas.

Tabla 3.22 Dosificación de mezclas para matrices fina - arena triturada

Tamiz		%Pasa	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
Pasa	Ret.		5,30%	5,80%	6,30%	6,80%	7,30%	7,80%
N°16	N°30	100	427,0	424,7	422,5	420,2	418,0	415,7
N°30	N°50	63,37	413,3	411,2	409,0	406,8	404,6	402,4
N°50	N°100	27,91	152,5	151,7	150,9	150,1	149,2	148,4
N°100	N°200	14,83	84,5	84,1	83,6	83,2	82,7	82,3
N°200	Base	7,58	59,1	58,8	58,5	58,2	57,9	57,5
Peso total			1136,4	1130,4	1124,4	1118,4	1112,4	1106,4
% Agregado fino			94,7%	94,2%	93,7%	93,2%	92,7%	92,2%
Peso asfalto			63,6	69,6	75,6	81,6	87,6	93,6
Peso total material + cemento asfáltico			1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23 Dosificación de mezclas para marices finas - arena natural

Tamiz		%Pasa	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
Pasa	Ret.		5,38%	5,88%	6,38%	6,88%	7,38%	7,88%
N°16	N°30	100	390,5	388,5	386,4	384,3	382,3	380,2
N°30	N°50	66,38	368,7	366,7	364,8	362,8	360,9	358,9
N°50	N°100	34,64	186,0	185,0	184,0	183,0	182,0	181,1
N°100	N°200	18,63	119,2	118,5	117,9	117,3	116,7	116,0
N°200	Base	8,37	71,1	70,7	70,3	70,0	69,6	69,2
Peso total			1135,4	1129,4	1123,4	1117,4	1111,4	1105,4
% Agregado fino			94,62%	94,12%	93,62%	93,12%	92,62%	92,12%
Peso asfalto			64,56	70,56	76,56	82,56	88,56	94,56
Peso total material + cemento asfáltico			1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fuente: Elaboración propia

3.5. ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS

Equipo:

- **Molde de compactación:** consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos, tiene un diámetro interior de 101,6 mm (4") y altura aproximada de 76,2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

- **Martillo de compactación:** con base plana circular de apisonado de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4,54 kg (10 lb.) de peso total cuya altura de caída es de 18" (457,2 mm).
- **Extractor de probeta:** o gato hidráulico para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95") y 12,7 mm (1/2") de espesor
- **Balanza $\pm 0.1\text{gr}$:** para pesar agregado y asfalto de capacidad, y sensibilidad de un 1 gr y también pesar probetas compactadas.
- **Tamices:** de acuerdo a los que se usó en la granulometría de una FAM para separar el material de la mezcla desde el N°16 (1,18 mm) hasta el N°200 (0,075 mm).
- **Bandejas metálicas:** con capacidad de dos litros para la fabricación y dosificación de las mezclas y otras para tener por separado el material retenido en cada tamiz.
- **Termómetro:** de 10°C a 232°C para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0,2°C.
- **Baño:** el baño de agua con 150 mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$, deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50,8 mm (2") sobre el fondo del tanque.
- **Prensa Marshall:** será la prensa mecánica con una velocidad de 50,8 mm/min con sus mediciones de estabilidad y flujo. El valor de flujo es el movimiento total o deformación en unidades de 0,25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.
- **Mezclas:** de los agregados y cemento asfáltico 85-100.

Procedimiento:

Para comenzar a preparar la mezcla; el conjunto del molde y la base de compactación deben estar completamente limpios, seguido se pesan en bandeja separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas de acuerdo a lo que pasa y se retiene en cada tamiz de las diversas fracciones finas de acuerdo con la dosificación obtenida y se calienta el agregado fino a una temperatura de 175 a 190°C, de igual manera el cemento asfáltico se calienta a una temperatura de 120 a 137°C con tal que esté diluido

y se pueda obtener el peso para la dosificación de acuerdo al porcentaje empleado, durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Figura 3.26 Arena fina para dosificación



Fuente: Elaboración propia

Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla y se vierte sobre el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total. Se mezcla el asfalto con los agregados finos hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de mezcla no debe pasar los 180°C.

Figura 3.27 Dosificación y obtención de las matrices asfálticas finas



Fuente: Elaboración propia

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura, la mezcla debe estar bien distribuida para que pueda absorber agregados el cemento asfáltico. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de un disco circular de 4" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse y un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco con una altura de caída libre de 18". Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 50 golpes por cada cara de la briqueta especificado en mezclas asfálticas de bajo tránsito vehicular. El molde contenido con la FAM se lo deja reposar por un determinado tiempo para que se lo pueda desmoldar con un gato hidráulico así la muestra no sufrirá alguna rotura.

Figura 3.28 Compactación de briquetas



Fuente: Elaboración propia

➤ Rotura de briquetas en la prensa Marshall

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

Primero se debe realizar la limpieza de las briquetas evitando que tenga aristas o material desprendido, luego con un vernier se debe proceder a obtener las medidas de las alturas

de la briqueta midiendo en cuatro puntos de esta manera determinar su altura media de cada briqueta.

Figura 3.29 Medición de briquetas



Fuente: Elaboración propia

➤ **Determinación de la densidad**

Una vez terminado de medir las alturas, se debe determinar la densidad de las briquetas para ello se debe pesar cada briqueta en peso seco de los especímenes (W_{sc}), posteriormente se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 5 minutos a una temperatura de 25°C determinando así el peso saturado y superfinamente seco (W_{ss}), luego se lo sumerge en agua para determinar el peso sumergido de la briqueta (W_s).

Figura 3.30 Peso de briquetas sumergidas por 5 min



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31 Peso sumergido de briquetas

Fuente: Elaboración propia

3.5.1. Determinación de la estabilidad y fluencia por el método Marshall

Se proceden a realizar los ensayos de estabilidad y fluencia. Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser se sumergidas en baño de agua a $60\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ ($140 \pm 1,8\text{ °F}$) durante un tiempo de 30 minutos. Se deben colocar primero una briqueta para que después de 3 minutos colocar la siguiente y poder hacer las roturas durante el tiempo indicado y así sucesivamente hasta colocar todas y romperlas en la prensa Marshall.

Figura 3.32 Briquetas sumergidas en baño a 60 °C 

Fuente: Elaboración propia

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

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

Figura 3.33 Rotura en la prensa Marshall



Fuente: Elaboración propia

Este método de diseño se elaboró para ambos agregados natural y triturado, también el incremento de porcentaje de contenido de asfalto varía de acuerdo al contenido mínimo que se obtuvo mediante la granulometría respectiva mencionada anteriormente.

➤ **Desarrollo de la planilla**

Se realizará un cálculo demostrativo para la briqueta con porcentaje de cemento asfáltico 5,30%, identificando las briquetas 1, 2 y 3 que tienen ese contenido.

Tabla 3.24 Identificación de Briquetas

Identificación	Peso de la briqueta		
	Seco (gr)	Saturado superficialmente S.S.S. (gr)	Sumergido (gr)
1	1062,1	1064,5	570
2	1073,0	1075,7	565
3	1075,3	1076,8	568

Fuente: Elaboración propia

➤ **Volumen de las briquetas**

Volumen briqueta = Peso briq. S. S. S. – Peso briq. sumergida

$$\text{Volumen briq.}_1 = 1064,5 - 570 = 494,5 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen briq.}_2 = 1075,7 - 565 = 510,7 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen briq.}_3 = 1076,8 - 568 = 508,8 \text{ cm}^3$$

➤ **Densidad real de la briqueta**

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

$$\text{Densidad}_{\text{real } 1} = \frac{1062,1}{494,5} = 2,15 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad}_{\text{real } 2} = \frac{1073,0}{510,7} = 2,10 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad}_{\text{real } 3} = \frac{1075,3}{508,8} = 2,11 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad}_{\text{Real promedio}} = \frac{2,15 + 2,10 + 2,11}{3} = 2,12 \text{ gr/cm}^3$$

➤ **Densidad máxima teórica**

$$\text{Densidad}_{\text{máx.teórica}} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ asfalto}}{\text{Peso esp. asfalto}}\right) + \left(\frac{100 - \% \text{ asfalto}}{\text{Peso esp. arena}}\right)}$$

$$\text{Densidad}_{\text{máx.teórica}} = \frac{100}{\left(\frac{5,30}{1,002 \text{ gr/cm}^3}\right) + \left(\frac{100 - 5,3}{2,12 \text{ gr/cm}^3}\right)} = 2,31 \text{ gr/cm}^3$$

➤ **Vacíos de la mezcla**

$$\text{Vacíos}_{\text{mezcla}} = \left(\frac{\text{Densidad}_{\text{teórica}} - \text{Densidad}_{\text{real promedio}}}{\text{Densidad}_{\text{teórica}}} \right) * 100$$

$$\text{Vacíos}_{\text{mezcla}} = \left(\frac{2,31 \text{ gr/cm}^3 - 2,12 \text{ gr/cm}^3}{2,31 \text{ gr/cm}^3} \right) * 100$$

$$\text{Vacíos}_{\text{mezcla}} = 8,10\%$$

➤ **Vacíos del agregado mineral**

$$\text{V. A. M.} = \text{Vacíos}_{\text{mezcla}} + \left(\frac{\% \text{ asfalto} * \text{Densidad}_{\text{real promedio}}}{\text{Peso esp. asfalto}} \right)$$

$$\text{V. A. M.} = 8,10\% + \left(\frac{5,3\% - 2,12 \frac{\text{gr}^3}{\text{cm}}}{1,002 \frac{\text{gr}^3}{\text{cm}}} \right)$$

$$\text{V. A. M.} = 19,32\%$$

➤ **Relación betún – vacíos**

$$\text{R. B. V.} = \left(\frac{\text{V. A. M.} - \text{Vacíos}_{\text{mezcla}}}{\text{V. A. M.}} \right) * 100$$

$$\text{R. B. V.} = \left(\frac{19,32\% - 8,10\%}{19,32\%} \right) * 100$$

$$\text{R. B. V.} = 58,06\%$$

➤ **Estabilidad (Lb)**

$$\text{Estabilidad} = \text{Carga}_{\text{anillo}} * \text{Factor}_{\text{corrección altura}}$$

$$\text{Carga}_{\text{anillo}} = (0,012 * \text{Lectura}_{\text{Dial Estabilidad}} - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Factor}_{\text{correccion altura}} = \text{segun la tabla}$$

Tabla 3.25 Factor de corrección

Altura aproximada de la muestra cm	Factor de corrección
5,08	1,47
5,24	1,39
5,40	1,31
5,56	2,25
5,72	1,19
5,87	1,14
6,03	1,09
6,19	1,04
6,35	1,00
6,51	0,96
6,67	0,93
6,83	0,89
6,99	0,86
7,14	0,83
7,30	0,81
7,46	0,78
7,62	0,76

Fuente: Factor de corrección Marshall

$$\text{Lectura}_{\text{Dial estabilidad 1}} = 840 \text{ mm}$$

$$\text{Carga}_{\text{anillo}} = (0,012 * 840 - 0,0812) * 102 * 2,2 = 2243,73 \text{ lb}$$

$$\text{Factor}_{\text{correccion altura}} = 0,789$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{Corregida 1}} = 2243,73 * 0,79 = 1771,13 \text{ lb.}$$

$$\text{Lectura}_{\text{Dial estabilidad 1}} = 855 \text{ mm}$$

$$\text{Carga}_{\text{anillo}} = (0,012 * 855 - 0,0812) * 102 * 2,2 = 2284,12 \text{ lb}$$

$$\text{Factor}_{\text{correccion altura}} = 0,787$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{Corregida 2}} = 2284,12 * 0,79 = 1798,75 \text{ lb.}$$

$$\text{Lectura}_{\text{Dial estabilidad 1}} = 851 \text{ mm}$$

$$\text{Carga}_{\text{anillo}} = (0,012 * 851 - 0,0812) * 102 * 2,2 = 2273,35 \text{ lb}$$

$$\text{Factor}_{\text{corrección altura}} = 0,776$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{Corregida 3}} = 2273,35 * 0,79 = 1764,69 \text{ lb.}$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{Promedio}} = \frac{1771,13 \text{ lb} + 1798,75 \text{ lb} + 1764,69 \text{ lb}}{3}$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{Promedio}} = 1778,19 \text{ lb}$$

➤ **Fluencia (pulg)**

Identificación	Lectura dial del flujo (1/100)"
1	9
2	9
3	10

$$\text{Fluencia}_{\text{Promedio}} = \frac{9 + 9 + 10}{3} = 9,33 \text{ pulg.}$$

Nota. - Todo este mismo procediendo se desarrolló para los diferentes tipos de contenido de asfalto determinado según la granulometría y así poder determinar el contenido óptimo de asfalto que tendrá una matriz fina con arena triturada y asimismo se lo desarrollo para mezclas con arena natural para determinar el contenido óptimo de asfalto para este tipo de agregado.

3.5.2. Obtención del contenido óptimo mediante Marshall

3.5.2.1. Obtención del contenido óptimo con arena triturada

En la siguiente tabla 3.26 se muestra la cantidad de agregado fino de fuente triturada y cemento asfalto a emplear en las briquetas para obtener los puntos y hallar el contenido óptimo para el diseño de las matrices finas mediante el método Marshall.

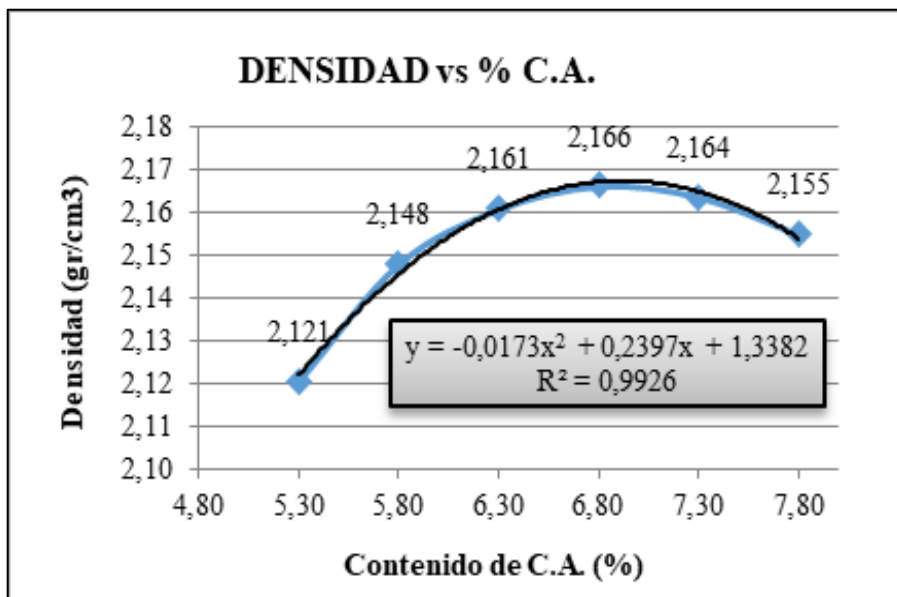
Tabla 3.26 Planilla Marshall para granulometría de arena triturada

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio	Peso Briqueta			Vol.	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregado		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Volumen Briqueta	Real	Densidad promedio	Máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.	R.B.V.	Lec. del dial	Carga	Factor de corrección	Estabilidad corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	5,30	5,6	7,41	1062,1	1064,5	570	494,5	2,15	2,12	2,31	8,10	19,32	58,06	840	2243,73	0,79	1771,13	1778,19	9	9,33
2			7,42	1073,0	1075,7	565	510,7	2,10						855	2284,12	0,79	1798,75		9	
3			7,49	1075,3	1076,8	568	508,8	2,11						851	2273,35	0,78	1764,69		10	
4	5,80	6,2	7,51	1100,9	1102,7	588	514,7	2,14	2,15	2,29	6,19	18,63	66,75	875	2337,98	0,77	1808,89	1824,73	10	10,33
5			7,47	1103,1	1104,8	593	511,8	2,16						884	2362,21	0,78	1839,57		11	
6			7,46	1107,0	1109,8	595	514,8	2,15						876	2340,67	0,78	1825,72		10	
7	6,30	6,7	7,57	1121,0	1123,8	603	520,8	2,15	2,16	2,27	4,90	18,49	73,48	916	2448,38	0,77	1876,07	1883,97	11	11,33
8			7,57	1119,5	1121,5	605	516,5	2,17						925	2472,62	0,77	1894,64		11	
9			7,56	1112,9	1114,5	600	514,5	2,16						917	2451,08	0,77	1881,20		12	
10	6,80	7,3	7,55	1104,5	1105,5	596	509,5	2,17	2,17	2,25	3,92	18,63	78,94	926	2475,31	0,77	1902,90	1892,90	11	12,00
11			7,56	1115,8	1117,3	597	520,3	2,14						924	2469,93	0,77	1895,67		12	
12			7,55	1115,1	1116,9	607	509,9	2,19						915	2445,69	0,77	1880,12		13	
13	7,30	7,9	7,54	1110,6	1112,7	598	514,7	2,16	2,16	2,24	3,29	19,05	82,74	883	2359,52	0,77	1816,83	1808,56	13	12,33
14			7,56	1104,8	1107,3	598	509,3	2,17						878	2346,06	0,77	1800,60		12	
15			7,59	1105,2	1107,6	597	510,6	2,16						886	2367,60	0,76	1808,25		12	
16	7,80	8,5	7,58	1116,8	1118,9	600	518,9	2,15	2,16	2,22	2,93	19,70	85,15	840	2243,73	0,77	1716,45	1719,06	13	12,00
17			7,56	1099,4	1101,2	593	508,2	2,16						835	2230,27	0,77	1711,73		12	
18			7,55	1110,1	1113,4	597	516,4	2,15						842	2249,12	0,77	1729,01		11	

Fuente: Elaboración propia

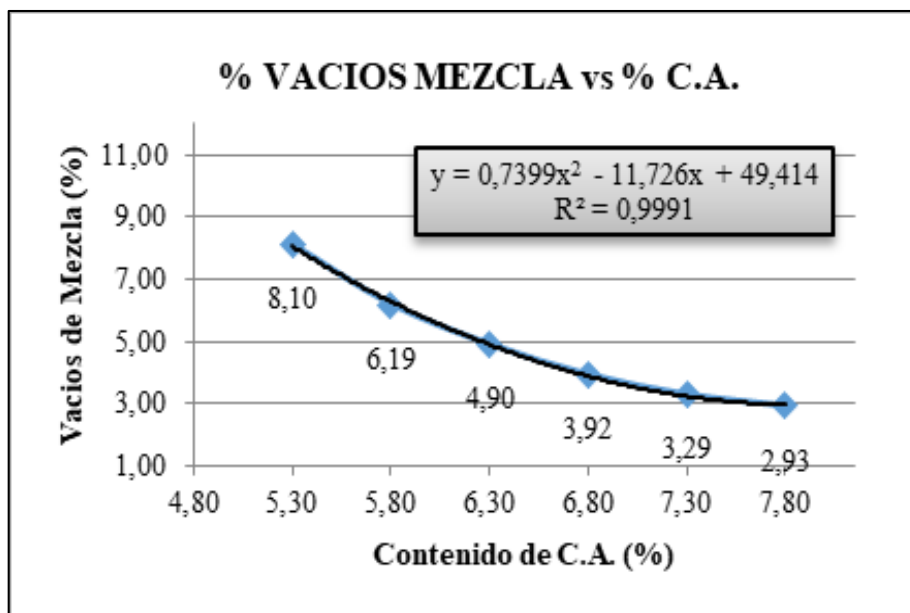
➤ Gráficas del método Marshall con arena triturada

Figura 3.34 Porcentaje de asfalto vs densidad (C.A. 85-100 con arena triturada)



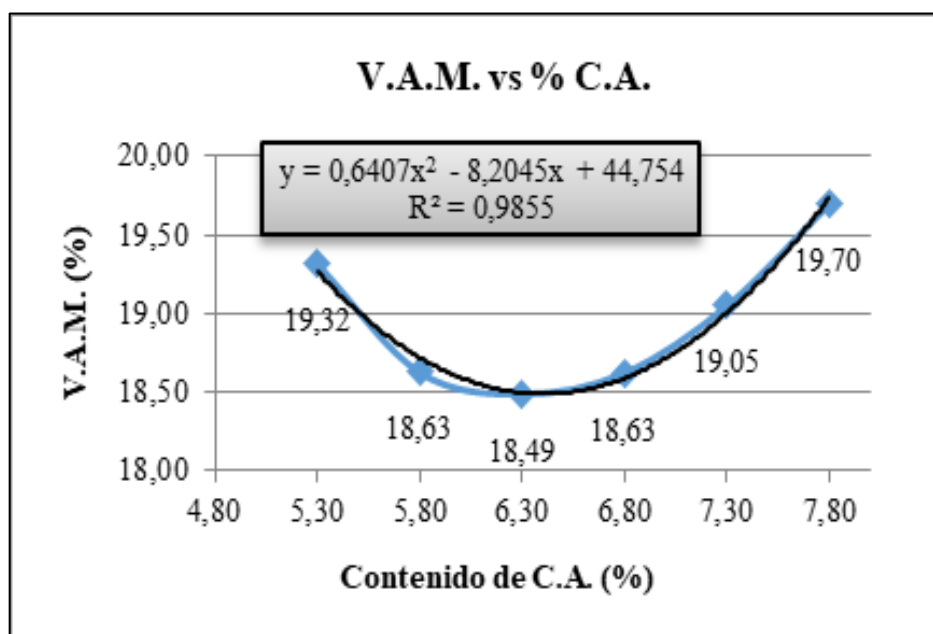
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.35 Porcentaje de asfalto vs % vacíos (C.A. 85-100 con arena triturada)



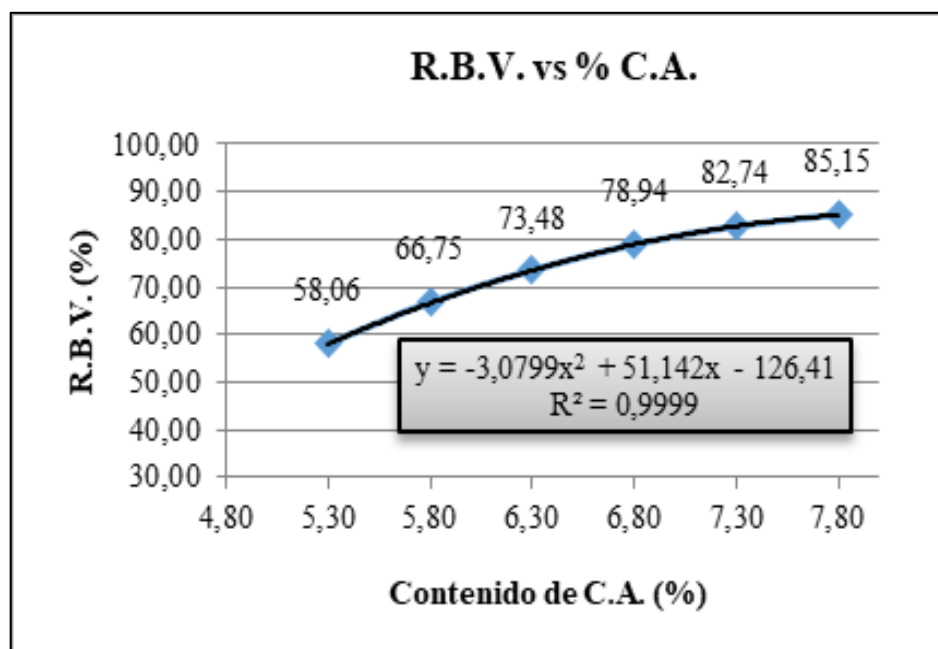
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.36 Porcentaje de asfalto vs VAM (C.A. 85-100 con arena triturada)



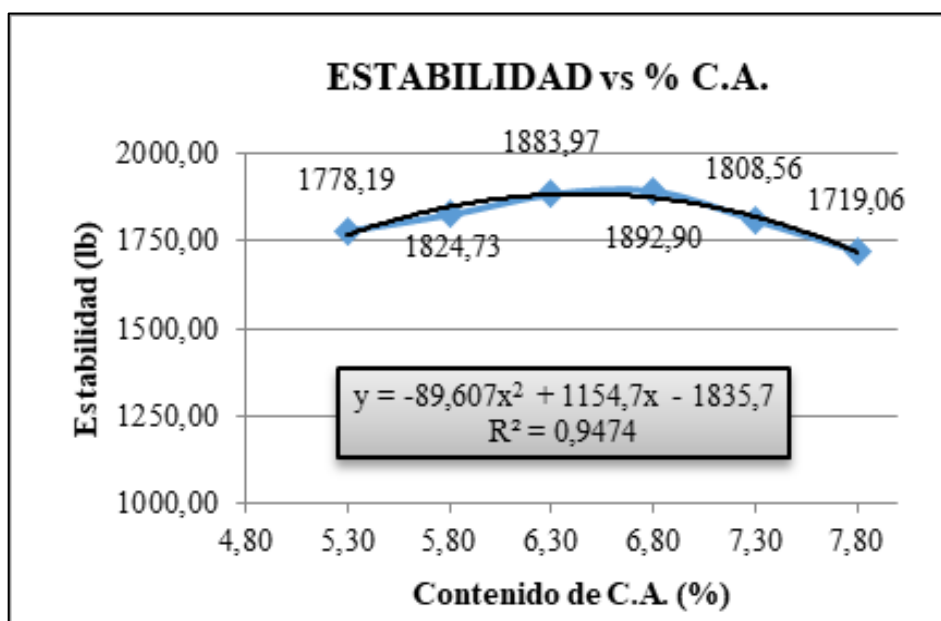
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.37 Porcentaje de asfalto vs RBV (C.A. 85-100 con arena triturada)



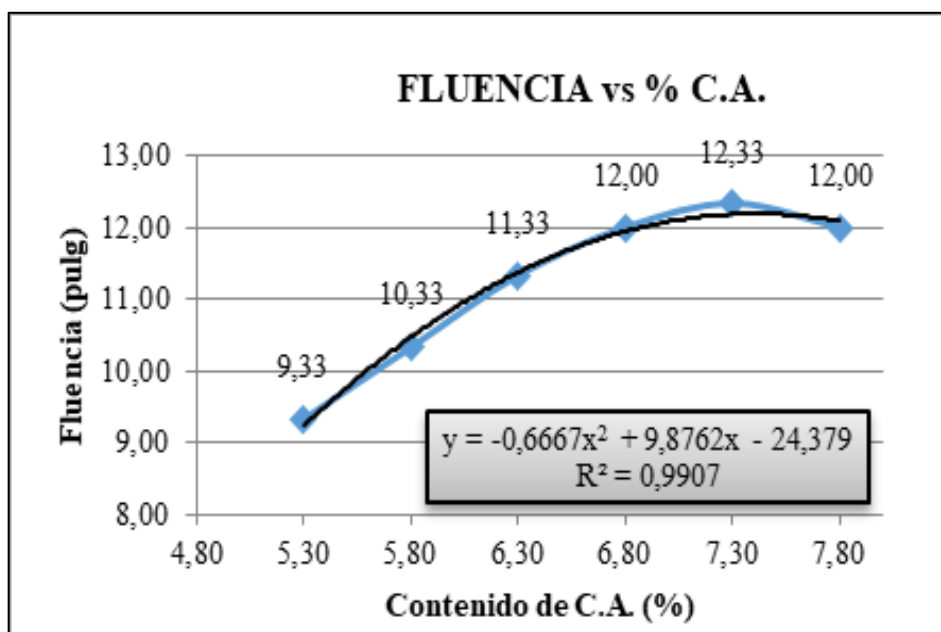
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.38 Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (C.A. 85-100 con arena triturada)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.39 Porcentaje de asfalto vs Fluencia (C.A. 85-100 con arena triturada)



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico con arena triturada

Tabla 3.27 Resultados del ensayo Marshall con arena triturada

	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	1883,60	6,44
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,17	6,84
	Vacíos de la mezcla (%)	3,02	7,63
	Promedio % óptimo de C.A. propuesto		7,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 Valores obtenidos del diseño Marshall con el contenido óptimo con arena triturada

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de C.A. óptimo	Valores con % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	7,00	2,17	--	--
% Vacíos	7,00	3,59	2	4
% VAM	7,00	18,72	16	-
% RBV	7,00	80,67	75	85
Estabilidad (Lb)	7,00	1856,45	>1800 lb	
Fluencia 1/100"	7,00	12,09	8	16

Fuente: Especificaciones de la norma IRAM 6548

El porcentaje óptimo de asfalto es de 7,00% que será utilizado para la realización de las mezclas de matrices finas convencionales y producidas con asfalto espumado, utilizando el agregado fino de procedencia de trituración.

3.5.2.3. Obtención del contenido óptimo con arena natural

En la siguiente tabla 3.29 se muestra la cantidad de agregado fino de fuente natural y cemento asfalto a emplear en las briquetas para obtener los puntos y hallar el contenido óptimo para el diseño de las matrices finas mediante el método Marshall.

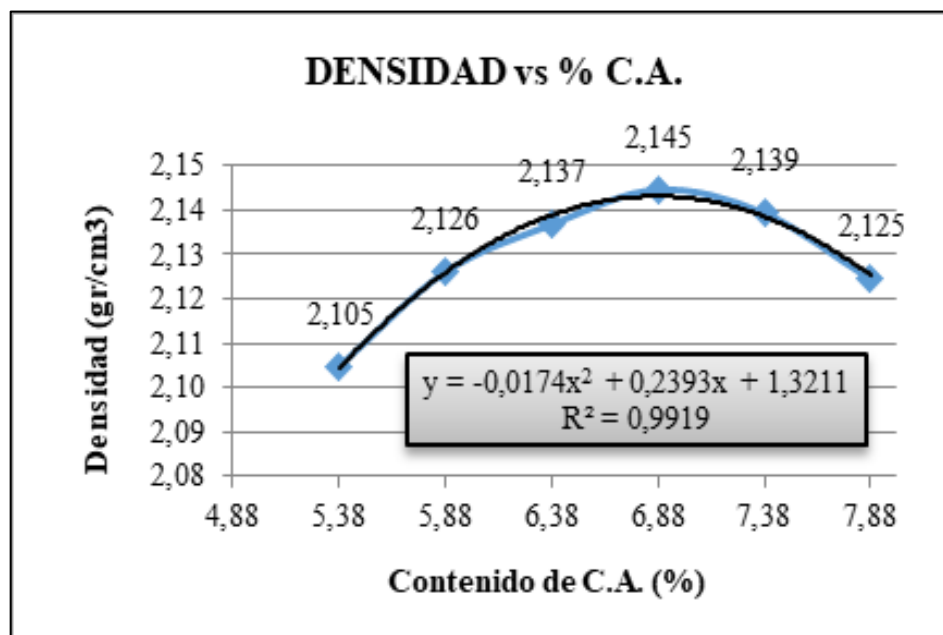
Tabla 3.29 Planilla Marshall para granulometría de arena natural

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio	Peso Briqueta			Vol. cm3	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia		
	Base mezcla	Base agregado		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Real	Densidad promedio	Máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M	R.B.V.	Lec. del dial	Carga	Factor de corrección	Estabilidad corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	5,38	5,69	7,49	1122,2	1123,5	592	531,5	2,11	2,10	2,27	7,36	18,66	60,56	801	2138,71	0,78	1660,17	1659,20	8,0	8,33	
2			7,42	1120,0	1122,6	588	534,6	2,10						795	2122,55	0,79	1671,51		8,0		
3			7,52	1117,5	1120,1	590	530,1	2,11						798	2130,63	0,77	1645,91		9,0		
4	5,88	6,25	7,51	1133,5	1135,5	606	529,5	2,14	2,13	2,26	5,72	18,19	68,58	842	2249,12	0,77	1740,25	1723,11	9,0	9,33	
5			7,56	1138,5	1139,5	604	535,5	2,13						835	2230,27	0,77	1711,73		10,0		
6			7,51	1126,5	1128,5	595	533,5	2,11						831	2219,50	0,77	1717,33		9,0		
7	6,38	6,81	7,57	1135,6	1137,7	608	529,7	2,14	2,14	2,24	4,53	18,13	75,04	877	2343,36	0,77	1795,60	1794,40	10,0	10,33	
8			7,56	1138,5	1141,0	605	536,0	2,12						868	2319,13	0,77	1779,93		10,0		
9			7,55	1140,4	1142,3	610	532,3	2,14						880	2351,44	0,77	1807,67		11,0		
10	6,88	7,39	7,57	1142,1	1143,7	611	532,7	2,14	2,14	2,22	3,45	18,17	81,03	885	2364,91	0,76	1803,24	1796,52	10,0	11,00	
11			7,55	1138,3	1140,2	609	531,2	2,14						882	2356,83	0,77	1811,81		11,0		
12			7,60	1137,9	1140,0	610	530,0	2,15						871	2327,21	0,76	1774,50		12,0		
13	7,38	7,97	7,58	1144,5	1146,6	612	534,6	2,14	2,14	2,20	2,95	18,71	84,24	878	2346,06	0,77	1794,73	1771,54	11,0	11,33	
14			7,56	1134,1	1136,7	605	531,7	2,13						865	2311,05	0,77	1773,73		11,0		
15			7,52	1140,2	1141,7	610	531,7	2,14						860	2297,59	0,76	1746,17		12,0		
16	7,88	8,55	7,60	1123,8	1125,5	595	530,5	2,12	2,12	2,19	2,88	19,59	85,28	821	2192,57	0,76	1671,83	1692,01	12,0	11,00	
17			7,54	1125,4	1127,6	601	526,6	2,14						833	2224,88	0,77	1713,16		11,0		
18			7,59	1127,2	1130,1	598	532,1	2,12						829	2214,11	0,76	1691,03		10,0		

Fuente: Elaboración propia

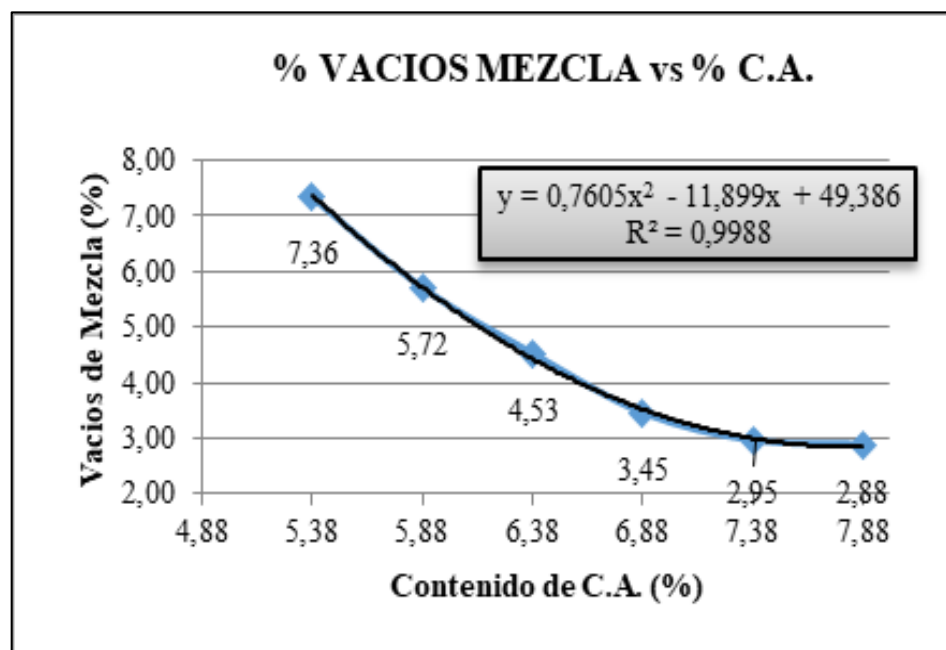
➤ Gráficas del método Marshall con arena natural

Figura 3.40 Porcentaje de asfalto vs densidad (C.A. 85-100 con arena natural)



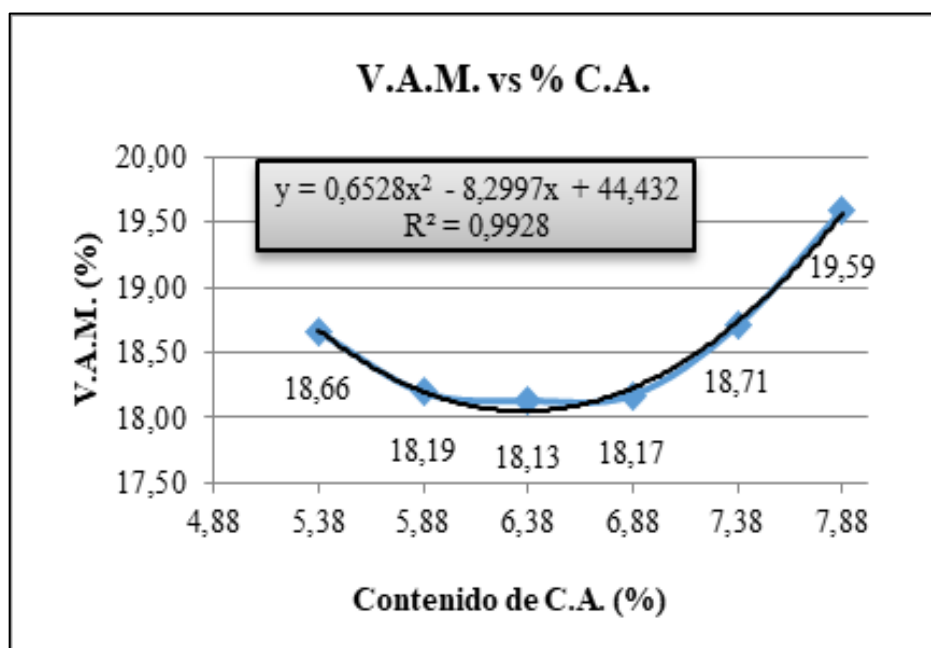
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.41 Porcentaje de asfalto vs vacíos (C.A. 85-100 con arena natural)



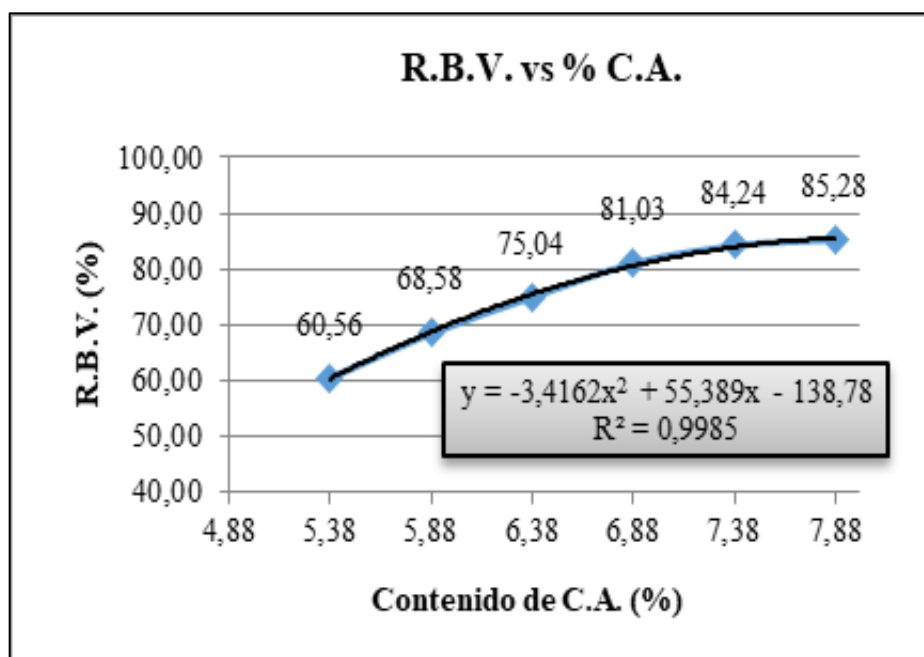
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42 Porcentaje de asfalto vs VAM (C.A. 85-100 con arena natural)



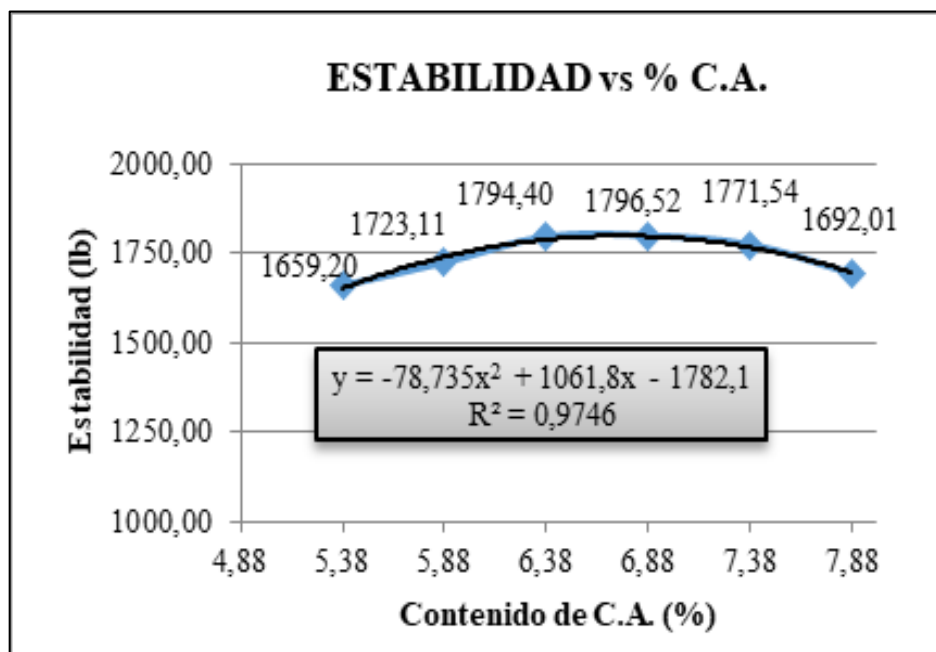
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.43 Porcentaje de asfalto vs RBV (C.A. 85-100 con arena natural)



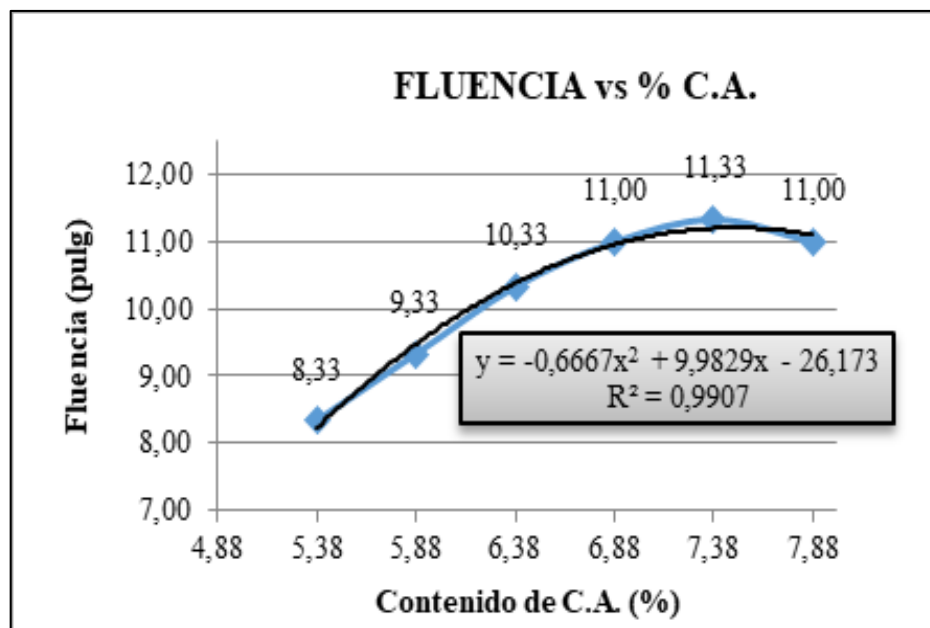
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.44 Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (C.A. 85-100 con arena natural)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.45 Porcentaje de asfalto vs Fluencia (C.A. 85-100 con arena natural)



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.4. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico con arena natural

Tabla 3.30 Resultados del ensayo Marshall con arena natural

	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	1797,69	6,74
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,14	6,88
	Vacíos de la mezcla (%)	3,01	7,82
	Promedio % óptimo de C.A. propuesto		7,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31 Valores obtenidos del diseño Marshall con el contenido óptimo con arena natural

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de C.A. óptimo	Valores con % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	7,15	2,14	--	--
% Vacíos	7,15	3,19	2	4
% VAM	7,15	18,46	16	-
% RBV	7,15	82,61	75	85
Estabilidad (Lb)	7,15	1784,64	>1800 lb	
Fluencia 1/100"	7,15	11,12	8	16

Fuente: Especificaciones de la norma IRAM 6548

El porcentaje óptimo de asfalto es de 7,15% que será utilizado para la realización de las mezclas de matrices finas producidas con asfalto espumado, utilizando el agregado fino natural.

3.6. INCORPORACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO EN LAS MATRICES FINAS

El asfalto espumado es fundamental en este proyecto ya que con ello se observará la influencia que tendrá las mezclas compuestas por matrices finas producidas con asfalto espumado y de cómo puede mejorar su característica principal de estabilidad y fluencia, cumpliendo con los parámetros de las especificaciones a utilizadas en la investigación.

Con los resultados del ensayo Marshall para las mezclas convencionales se obtuvo el (%) óptimo de cemento asfáltico para la dosificación de la mezcla con asfalto espumado y como en la caracterización de la espuma expansiva salió a una temperatura de 170°C, pues

a esa temperatura se debe hacer calentar el asfalto para inyectar un 3% de agua que expresado en volumen será de 2,53 ml que se debe añadir a la dosificación para la obtención de las briquetas finas con el asfalto espumado.

Tabla 3.32 Espumado a los contenidos óptimos

% Contenido óptimo	7,00%	7,15%	
Temperatura (°C):	170	170	
Peso del asfalto (g)	84	85,8	
% Agua	3	3	
Volumen agua (ml)	2,52	2,57	Especific.
Vida media (sg)	16,51	17,03	>15
Vol. final de asfalto(cm3)	1024,1	1052,7	
Relación expansión	12,19	12,27	12 a 20

Fuente: Elaboración propia

En la caracterización del espumado se trabajó con 60gr, aquí cambiamos por el contenido óptimo de cemento asfáltico en peso y se evidencia que igual cumple con las especificaciones que se requiere para espumar y diseñar las briquetas.

3.6.1. Dosificación de las matrices finas con asfalto espumado

Tabla 3.33 Dosificación con el contenido óptimo 7,00%

Tamiz		%Pasa	% Ret.	C.A. 7,00%	
Pasa	Ret.			P. Parc.	P. Acum.
N°16	N°30	100	36,63	419,3	419,3
N°30	N°50	63,37	35,46	405,9	825,2
N°50	N°100	27,91	13,08	149,7	975,0
N°100	N°200	14,83	7,25	83,0	1058,0
N°200	Base	7,58	5,07	58,0	1116,0
Peso total				1116,0	
Peso asfalto				84,0	
Peso total material + C.A.				1200,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.34 Dosificación con el contenido óptimo de 7,15%

Tamiz		%Pasa	% Ret.	C.A. 7,15%	
Pasa	Ret.			P. Parc.	P. Acum.
N°16	N°30	100	33,69	383,2	383,2
N°30	N°50	66,38	31,74	361,8	745,0
N°50	N°100	34,64	16,01	182,5	927,5
N°100	N°200	18,63	10,26	116,9	1044,4
N°200	Base	8,37	6,12	69,8	1114,2
Peso total				1114,2	
Peso asfalto				85,8	
Peso total material + C.A.				1200,0	

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

Después de determinar el contenido óptimo para las matrices finas que es igual a 7,00% para el agregado triturado y 7,15% para el natural. Se procede a separar el material de acuerdo al retenido en cada tamiz según la granulometría y dosificación correspondiente para diseñar las briquetas FAM con el cemento asfáltico convencional 85-100 y cuando se lo incorpora el asfalto espumado obteniendo así mezclas homogéneas para que se los pueda realizar los ensayos correspondientes para determinar el peso de la muestra en seco y sumergido, las alturas y realizar las roturas de las mismas mediante la prensa Marshall.

Figura 3.46 Matrices finas con asfalto espumado

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Roturas de las briquetas elaboradas con matrices finas producidas con asfalto espumado en la prensa Marshall

Si bien el título de la investigación es caracterización reológica que es el estudio del comportamiento de la deformación (estabilidad) y flujo (fluencia) bajo la aplicación de una carga a diferentes temperaturas. Entonces lo que analizaremos será el parámetro de rotura que es lo más importante para ver qué es lo que pasa a diferentes temperaturas, cuando no solamente usamos el contenido óptimo, sino que también cuando al contenido óptimo lo añadimos asfalto espumado para ver si sus características principales de estabilidad y fluencia presentan mejorías.

Para determinar estas características de rotura se trabajó con temperaturas desde -5° , 0°C , 10°C , 18°C que es una temperatura ambiente que se consideró a romper y con temperatura de $30,40,50$ y 60°C que es la temperatura en que se rompe una biqueta según indica Marshall y a una temperatura elevadas de 70 y 80°C , para ver como es el comportamiento después de la temperatura que indica el Marshall.

Asimismo, se elaboró elementos que puedan mantener dichas temperaturas constantes durante el periodo de 30 minutos para que estén sumergidas antes de poner en la prensa, por ejemplo, para una rotura de -5°C se utilizó hielo en cubos para sumergir las briquetas y que estén en reposo verificando que se mantengan constante en esa misma temperatura y cuando cumpla el determinado tiempo proceder en la prensa Marshall a romper manteniendo la temperatura de la biqueta, de igual manera para 0°C y 10°C , el hielo es una fundamental para tener esas temperaturas ya que las briquetas estarán reposando durante media hora a esa temperaturas.

Para la rotura de una temperatura ambiente de 18°C , el agua debe mantenerse constante por media hora y luego pasar a romper en la presan Marshall y con las temperaturas de 30°C y 40°C se hace hizo calentar agua para mezclar con agua fría y tener esas temperaturas con tal que las briquetas puedan estar sumergidas a esas temperaturas por el periodo establecido. Cuando ponemos las briquetas a 50°C y 60°C se utilizó el aparato donde el agua se mantiene a esa temperatura constante nivelando a veces con agua fría para que no pasen lo establecido.

Posteriormente para las temperaturas que pasan lo establecido de los 60°C que indica Marshall para la rotura de las briquetas como ser los 70°C y 80°C se los puso en una fuente para luego llevar a la hornilla y calentar con fuego no muy fuerte hasta que lleguen a dichas temperaturas y cuando llegan a lo indicado el fuego de la hornilla bajarlo un poco menos para que las temperaturas estén constantes y deben ser contraladas cada ciertos minutos hasta que cumplan la media hora y así proceder a romper en la prensa.

Después de realizar todas las roturas a diferentes temperaturas se deben analizar y ver de cómo es el comportamiento de las mismas cuando son rompidas a diferentes temperaturas, (anexo D).

Figura 3.47 Control de temperatura para las roturas



Fuente: Elaboración propia

3.6.2.1. Resultados obtenidos del diseño Marshall con el porcentaje óptimo de 7,00% arena triturada

Tabla 3.35 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo 7,00% para matrices finas con arena triturada

N° Briqueta	Altura H cm	Peso seco gr	Peso SSS gr	Peso Sumergido gr	Estabilidad dial (mm)	Fluencia dial
b1	7,30	1162,1	1164,0	623	2105	8,0
b2	7,25	1141,8	1145,8	618	2150	9,0
b3	7,26	1157,7	1160,7	626	1998	8,8
b4	7,28	1148,1	1151,2	620	2010	8,0
b5	7,32	1163,4	1165,7	627	1975	9,0
b6	7,32	1145,6	1147,5	618	2002	10,0
b7	7,27	1151,0	1153,1	621	1920	10,0
b8	7,32	1162,1	1164,3	626	1890	9,0
b9	7,33	1152,8	1155,7	623	1985	10,0
b10	7,30	1161,5	1163,3	624	1872	10,2
b11	7,27	1146,2	1149,3	621	1820	10,0
b12	7,25	1143,1	1146,5	618	1798	11,0
b13	7,26	1145,3	1147,6	617	1550	11,0
b14	7,31	1160,1	1163,0	626	1690	12,0
b15	7,30	1152,4	1154,1	623	1760	10,5
b16	7,32	1159,5	1162,1	626	1480	11,0
b17	7,30	1143,4	1146,0	617	1375	12,6
b18	7,33	1163,7	1165,7	628	1293	12,0
b19	7,25	1161,0	1164,8	626	1095	12,0
b20	7,34	1168,5	1171,1	633	987	13,8
b21	7,40	1179,4	1181,6	636	1005	13,0
b22	7,38	1170,9	1173,1	633	915	14,0
b23	7,36	1169,5	1172,6	632	904	13,0
b24	7,35	1165,4	1168,1	628	862	13,0
b25	7,31	1160,5	1163,1	627	655	13,5
b26	7,32	1165,7	1168,8	629	585	14,8
b27	7,30	1154,0	1157,9	625	610	14,0
b28	7,31	1162,4	1165,1	627	388	14,0
b29	7,33	1164,1	1166,9	630	390	14,6
b30	7,28	1146,7	1148,9	620	405	15,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36 Resultados de la reología de matrices finas convencionales con arena triturada

Temperatura °C	N° Briqueta	Estabilidad (Lb)		Fluencia (1/100")	% Vacíos mezcla
		Corregida	Promedio		
-5	b1	4576,60	4552,48	8,60	3,77
	b2	4710,82			
	b3	4370,02			
0	b4	4382,87	4329,28	9,00	3,68
	b5	4273,17			
	b6	4331,79			
10	b7	4192,15	4228,98	9,67	3,66
	b8	4190,05			
	b9	4304,74			
T°C Amb. 18	b10	4039,76	3983,31	10,40	3,66
	b11	3973,03			
	b12	3937,13			
30	b13	3376,44	3621,11	11,17	3,59
	b14	3662,80			
	b15	3824,10			
40	b16	3198,49	2989,53	11,87	3,59
	b17	2984,35			
	b18	2785,75			
50	b19	2391,93	2212,32	12,93	3,60
	b20	2118,26			
	b21	2126,78			
60	b22	1944,32	1905,93	13,33	3,58
	b23	1929,72			
	b24	1843,76			
70	b25	1410,59	1327,22	14,10	3,57
	b26	1255,31			
	b27	1315,75			
80	b28	827,63	842,98	14,53	3,47
	b29	830,01			
	b30	871,29			

Fuente: Elaboración propia

Nota: los datos de estabilidad y fluencia se rompieron a diferentes temperaturas como se muestra en la tabla 3.36 ya corregida.

3.6.2.2. Resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de 7,00% para las matrices finas producidas con asfalto espumado

Tabla 3.37 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo para matrices finas producidas con asfalto espumado con arena triturada

N° Briqueta	Altura H cm	Peso seco gr	Peso SSS gr	Peso Sumergido gr	Estabilidad dial (mm)	Fluencia dial
b1	7,31	1160,3	1164,3	628	2200	8,0
b2	7,32	1162,4	1169,5	630	2160	7,8
b3	7,30	1173,5	1177,6	632	2100	9,0
b4	7,29	1138,4	1143,5	615	2120	8,0
b5	7,31	1164,7	1168,7	629	2060	9,0
b6	7,19	1146,9	1151,7	621	2030	8,6
b7	7,23	1159,0	1163,3	630	2015	8,0
b8	7,22	1182,1	1185,1	635	2035	10,0
b9	7,31	1172,7	1177,1	632	2050	9,0
b10	7,21	1165,1	1168,1	630	1980	10,0
b11	7,25	1166,1	1170,7	631	2002	9,0
b12	7,31	1163,4	1166,7	628	1975	9,0
b13	7,25	1145,4	1148,8	616	1902	10,0
b14	7,28	1160,7	1163,8	628	1800	9,5
b15	7,29	1162,7	1165,0	630	1710	10,0
b16	7,32	1179,4	1182,9	636	1250	11,0
b17	7,40	1141,0	1142,6	617	1760	10,0
b18	7,33	1173,7	1174,8	632	1510	12,4
b19	7,25	1163,7	1166,7	632	1118	12,0
b20	7,22	1148,6	1151,1	620	1100	11,2
b21	7,30	1178,4	1181,3	634	1208	12,0
b22	7,39	1182,6	1185,7	638	931	12,0
b23	7,40	1175,5	1178,6	636	1005	13,0
b24	7,41	1166,4	1169,5	632	960	13,0
b25	7,30	1159,3	1163,4	630	730	13,0
b26	7,31	1165,7	1169,9	631	720	13,6
b27	7,30	1174,0	1177,8	635	643	14,0
b28	7,29	1172,5	1175,2	634	440	13,8
b29	7,25	1164,0	1167,5	630	396	14,2
b30	7,28	1166,6	1170,1	632	425	15,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38 Resultados de la reología de matrices finas producidas con asfalto espumado con arena triturada

Temperatura °C	N° Briqueta	Estabilidad (Lb)		Fluencia (1/100")	% Vacíos de la mezcla
		Corregida	Promedio		
-5	b1	4772,6	4670,9	8,27	3,72
	b2	4674,5			
	b3	4565,7			
0	b4	4616,1	4523,9	8,53	3,66
	b5	4467,9			
	b6	4487,7			
10	b7	4427,3	4450,7	9,00	3,65
	b8	4478,5			
	b9	4446,2			
T°C Amb. 18	b10	4363,5	4343,9	9,33	3,64
	b11	4385,3			
	b12	4283,0			
30	b13	4165,5	3936,5	9,83	3,58
	b14	3923,4			
	b15	3720,5			
40	b16	2699,0	3230,0	11,13	3,57
	b17	3735,3			
	b18	3255,7			
50	b19	2442,3	2492,1	11,73	3,54
	b20	2414,0			
	b21	2620,1			
60	b22	1973,8	2042,2	12,67	3,48
	b23	2126,8			
	b24	2026,0			
70	b25	1577,5	1505,8	13,53	3,43
	b26	1552,0			
	b27	1387,7			
80	b28	946,4	905,6	14,33	3,42
	b29	855,5			
	b30	915,1			

Fuente: Elaboración propia

Nota: los datos de estabilidad y fluencia se rompieron a diferentes temperaturas como se muestra en la tabla 3.38 ya corregida.

3.6.2.3. Resultados obtenidos del diseño Marshall con el porcentaje óptimo de 7,15% arena natural

Tabla 3.39 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo 7,15% para matrices finas con arena natural

N° Briqueta	Altura H cm	Peso seco gr	Peso SSS gr	Peso Sumergido gr	Estabilidad dial (mm)	Fluencia dial
b1	7,28	1153,80	1158,30	610,00	2000	8,0
b2	7,21	1131,30	1136,90	607,00	2010	8,0
b3	7,20	1136,20	1141,30	611,00	1990	9,0
b4	7,22	1136,50	1140,80	613,00	2010	8,0
b5	7,20	1156,50	1160,10	615,00	1991	9,8
b6	7,31	1187,20	1190,10	628,00	1882	9,0
b7	7,26	1153,00	1157,00	617,00	1990	9,0
b8	7,29	1150,20	1154,00	615,00	1884	9,0
b9	7,32	1145,60	1150,80	611,00	1925	10,5
b10	7,20	1155,20	1160,50	617,00	1898	11,0
b11	7,29	1145,10	1148,90	615,00	1715	9,2
b12	7,29	1157,70	1161,80	618,00	1790	10,0
b13	7,35	1166,40	1170,60	622,00	1640	11,0
b14	7,34	1153,80	1157,30	616,00	1470	10,5
b15	7,28	1139,50	1143,90	612,00	1530	11,0
b16	7,31	1131,90	1135,20	606,00	1200	12,0
b17	7,31	1147,50	1151,90	614,00	1408	11,0
b18	7,30	1145,40	1149,80	612,00	1350	10,8
b19	7,29	1149,00	1154,00	616,00	915	12,0
b20	7,31	1152,00	1154,60	617,00	956	13,0
b21	7,33	1162,70	1166,90	620,00	904	11,0
b22	7,38	1178,20	1180,10	629,00	864	12,0
b23	7,40	1179,10	1182,20	632,00	816	12,8
b24	7,37	1177,60	1180,90	627,00	845	13,4
b25	7,30	1163,00	1166,60	621,00	420	12,5
b26	7,35	1137,90	1141,60	612,00	410	14,2
b27	7,33	1149,30	1154,60	614,00	462	14,0
b28	7,27	1136,50	1144,00	613,00	280	14,0
b29	7,35	1133,00	1139,60	610,00	325	14,6
b30	7,30	1153,60	1159,50	617,00	292	14,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40 Resultados de la reología de marcies finas convencionales con arena natural

Temperatura °C	N° Briqueta	Estabilidad (Lb)		Fluencia (1/100")	% Vacíos mezcla
		Corregida	Promedio		
-5	b1	4295,32	4157,18	8,67	3,63
	b2	4194,90			
	b3	3981,31			
0	b4	4310,33	4094,49	9,20	3,62
	b5	3889,53			
	b6	4083,62			
10	b7	4058,81	3839,72	10,17	3,57
	b8	3741,03			
	b9	3719,32			
T°C Amb. 18	b10	3555,67	3439,79	10,53	3,51
	b11	3421,32			
	b12	3342,36			
30	b13	3033,92	2877,05	11,60	3,49
	b14	2824,94			
	b15	2772,29			
40	b16	2770,62	2608,83	11,80	3,48
	b17	2916,98			
	b18	2138,88			
50	b19	1885,65	1827,70	12,50	3,49
	b20	1954,60			
	b21	1642,84			
60	b22	1753,80	1715,76	13,33	3,45
	b23	1783,76			
	b24	1609,72			
70	b25	617,78	686,05	14,27	3,42
	b26	761,52			
	b27	678,85			
80	b28	358,24	395,38	14,50	3,38
	b29	373,49			
	b30	454,40			

Fuente: Elaboración propia

Nota: los datos de estabilidad y fluencia se rompieron a diferentes temperaturas como se muestra en la tabla 3.40 ya corregida.

3.6.2.4. Resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de 7,15% para las matrices finas producidas con asfalto espumado

Tabla 3.41 Datos obtenidos con el porcentaje optimo 7,15% para matrices producidas con asfalto espumado con arena natural

N° Briqueta	Altura H cm	Peso seco gr	Peso SSS gr	Peso Sumergido gr	Estabilidad dial (mm)	Fluencia dial
b1	7,28	1153,80	1158,30	610,00	2000	8,0
b2	7,21	1131,30	1136,90	607,00	2010	8,0
b3	7,20	1136,20	1141,30	611,00	1990	9,0
b4	7,22	1136,50	1140,80	613,00	2010	8,0
b5	7,20	1156,50	1160,10	615,00	1991	9,8
b6	7,31	1187,20	1190,10	628,00	1882	9,0
b7	7,26	1153,00	1157,00	617,00	1990	9,0
b8	7,29	1150,20	1154,00	615,00	1884	9,0
b9	7,32	1145,60	1150,80	611,00	1925	10,5
b10	7,20	1155,20	1160,50	617,00	1898	11,0
b11	7,29	1145,10	1148,90	615,00	1715	9,2
b12	7,29	1157,70	1161,80	618,00	1790	10,0
b13	7,35	1166,40	1170,60	622,00	1640	11,0
b14	7,34	1153,80	1157,30	616,00	1470	10,5
b15	7,28	1139,50	1143,90	612,00	1530	11,0
b16	7,31	1131,90	1135,20	606,00	1200	12,0
b17	7,31	1147,50	1151,90	614,00	1408	11,0
b18	7,30	1145,40	1149,80	612,00	1350	10,8
b19	7,29	1149,00	1154,00	616,00	915	12,0
b20	7,31	1152,00	1154,60	617,00	956	13,0
b21	7,33	1162,70	1166,90	620,00	904	11,0
b22	7,38	1178,20	1180,10	629,00	864	12,0
b23	7,40	1179,10	1182,20	632,00	816	12,8
b24	7,37	1177,60	1180,90	627,00	845	13,4
b25	7,30	1163,00	1166,60	621,00	420	12,5
b26	7,35	1137,90	1141,60	612,00	410	14,2
b27	7,33	1149,30	1154,60	614,00	462	14,0
b28	7,27	1136,50	1144,00	613,00	280	14,0
b29	7,35	1133,00	1139,60	610,00	325	14,6
b30	7,30	1153,60	1159,50	617,00	292	14,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42 Resultados de la reología de matrices finas producidas con asfalto espumado con arena natural

Temperatura °C	N° Briqueta	Estabilidad (Lb)		Fluencia (1/100'')	% Vacíos mezcla
		Corregida	Promedio		
-5	b1	4361,00	4394,44	8,33	3,67
	b2	4429,80			
	b3	4392,52			
0	b4	4423,33	4299,56	8,93	3,60
	b5	4394,74			
	b6	4080,60			
10	b7	4352,47	4205,82	9,50	3,53
	b8	4100,63			
	b9	4164,36			
T°C Amb. 18	b10	4188,76	3938,50	10,07	3,41
	b11	3731,46			
	b12	3895,29			
30	b13	3521,02	3338,57	10,83	3,40
	b14	3162,01			
	b15	3332,68			
40	b16	2596,54	2858,50	11,27	3,37
	b17	3049,16			
	b18	2929,82			
50	b19	1983,94	1997,59	12,00	3,33
	b20	2065,58			
	b21	1943,25			
60	b22	1835,14	1785,93	12,73	3,29
	b23	1724,11			
	b24	1798,53			
70	b25	901,33	918,87	13,57	3,31
	b26	869,31			
	b27	985,95			
80	b28	598,69	635,63	14,27	3,31
	b29	686,07			
	b30	622,14			

Fuente: Elaboración propia

Nota: los datos de estabilidad y fluencia se rompieron a diferentes temperaturas como se muestra en la tabla 3.42 ya corregida.

3.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.7.1. Análisis del agregado fino

Tabla 3.43 Resultados de caracterización del agregado fino

Ensayo	Resultados		Exigencia	Norma	
	Triturado	Natural		N-CMT	AASHTO
Equivalente de arena	91,83	77,81	$\geq 50 \%$	4-05-004	T-176
Peso específico	2,50	2,46	-	4-04-011	T-84
% Absorción	0,68	0,83	$\leq 1,2 \%$	4-04-011	T-84
Durabilidad por ataque de sulfato de sodio	4,16	4,34	$\leq 10 \%$	4-05-042	T-204

Fuente: Elaboración propia

Para la conformación de las matrices finas se utilizó arena triturada que es de La Pintada donde se tiene una planta chancadora de áridos que es de la alcaldía municipal de Tarija ya que estas son usadas para algunos mantenimientos de calles y avenidas poco transitadas y la arena de procedencia natural se lo sacó del río Guadalquivir.

De acuerdo a la distribución granulométrica para ambos tipos de arena se puede ver que cumplen con las especificaciones de N-CMT (normas de caracterización de los materiales México) que es una norma adaptada para morteros asfálticos y/o matrices finas, puesto que carecen de agregados gruesos y tienen mayor presencia de agregado fino con filler.

Para los ensayos de caracterización de calidad de la arena se desarrolló con la misma normativa N-CTM y también ASTM, ya que cuentan con los mismos rangos de calidad de la arena asimismo adaptando los parámetros para la conformación de una matriz fina y que cumplan sus especificaciones, realizando ensayos que cuente con los materiales los laboratorios de la universidad y según indique las normativas para el agregado fino.

En el ensayo de equivalente de arena para la triturada salió un 91,83% y para la arena de procedencia natural fue de 77,91% eso significa que eso son los porcentajes que tienen de arena y lo que queda del 100% contiene material plástico como limos, la especificación nos pide un mínimo de 50% con el resultado obtenido si cumple, si en caso este fuera menor a lo exigido eso significa que la arena está muy sucia y se requiere lavar aún más

con agua hasta que salga la mayor cantidad de limos para que pueda ser emplea en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

El ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio estima la resistencia del agregado fino al deterioro por acción de los agentes atmosféricos durante la vida útil de la obra y las consecuencias que puede tener como la pérdida de volumen, grietas que afecten a las fracciones de la muestra que hacen varias a la granulometría inicial, para el agredo fino triturado nos dio una pérdida de 4,16% y para el natural de 4,34%, según lo que especifica la norma las pérdidas no deben superar el 10% del peso inicial ya que no sería una buena arena para la aplicación de una matriz fina, entonces nuestros resultados si cumplen con las especificaciones que se requiere y pueden ser aplicados para la conformación de una mezcla asfáltica fina.

3.7.2. Análisis del cemento asfáltico

Tabla 3.44 Resultados de caracterización del cemento asfáltico 85-100

Ensayo	Resultados C.A.	Exigencias		Norma	
		Mínimo	Máximo	ASTM	AASHTO
Peso específico	1,002	1	1,05	D70-76	T228-93
Penetración	87	85	100	D-5	T49-97
Ductilidad	115	100	-	D-113	T51-00
Viscosidad Saybolt Furol	262	85	-	E-102	T-72
Punto de inflamación	258	230	-	D-92	T48-04
Punto de ablandamiento	43	42	53	D-36	T53-96
Película delgada	0,93	-	1	D-1754	T179-05
Penetración del residuo	58	50	-	D-5	T49-97

Fuente: Elaboración propia

El cemento asfáltico betunel 85-100 con el que se trabajó cumple con las especificaciones, se lo verificó mediante los ensayos realizados en laboratorio ejecutando tres muestras por ensayo para obtener su promedio y comprobar que estén dentro de los exigido por las especificaciones del ASTM, AASHTO adaptadas en nuestro medio y de acuerdo a la ficha técnica del fabricante que maneja la alcaldía municipal de Tarija para sus diferentes aplicaciones.

3.7.3. Análisis de la relación de expansión y vida media del asfalto

Para determinar el % de agua a inyectar al asfalto y que genere un espumado óptimo que cumpla con las especificaciones mínimas para el diseño de relación de expansión RE entre 12-20 y la vida media mayor a los 15 segundos; se realizó en total de 25 ensayos para caracterizar el asfalto espumado, partiendo desde el peso inicial de 60gr de asfalto a espumar en la olla a presión, calentando el asfalto a temperaturas de 140°C hasta 180°C y añadiendo agua de 2% a 4% del peso del asfalto con incrementos de 0,5%.

- Para el primer y segundo ensayo se definió una temperatura de 140°C y 150°C, con los resultados obtenidos ninguno llega al parámetro requerido de expansión, pero la vida media está en lo especificado, sin embargo, no es una temperatura en que el asfalto se expanda y pueda ser trabajable para la dosificación.
- Para el tercer ensayo la temperatura fue de 160°C y los rangos de agua igual a los anteriores, los resultados de vida media fueron satisfactorios a excepción con un 4% de agua la expansión se aproxima a lo que se exige.
- Para el cuarto ensayo se determinó una temperatura de 170°C, siguiendo los mismos porcentajes de agua añadidos, para este ensayo los resultados fueron satisfactorios excluyendo cuando se inyecta 2% y 2,5% de agua la expansión no llega a lo requerido, el rango que llega a cumplir es del 3% de agua que tiene una vida media de 16,11s y una relación de expansión de 12,10 estos valores si están dentro de lo que se exige, para el contenido de 3,5% tenemos una vida media muy aproximada a lo que requiere y también la relación de expansión si cumple, pero asumimos el valor característico a una temperatura de 170°C con un contenido de agua de 3% respecto al peso de asfalto.
- En el último ensayo de caracterización del asfalto espumado se trabajó con 180°C y con los porcentajes de agua correspondientes ahí ya no cumplen la vida media con los porcentajes de 3,5 y 4% y su relación de expansión se aproxima a lo mínimo.

Teniendo la temperatura de 170°C y el porcentaje de agua a inyectar de 3% con esos valores trabajamos para espumar al contenido óptimo de cemento asfáltico y diseñar las matrices finas con asfalto espumado.

3.8. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO

Este análisis se realiza de acuerdo a las características que presenta una mezcla como la estabilidad, fluencia y porcentaje de vacíos, cuando se lo trabaja solamente con el porcentaje óptimo y cuando se lo añade asfalto espumado a las matrices finas con agregados finos triturados y natural.

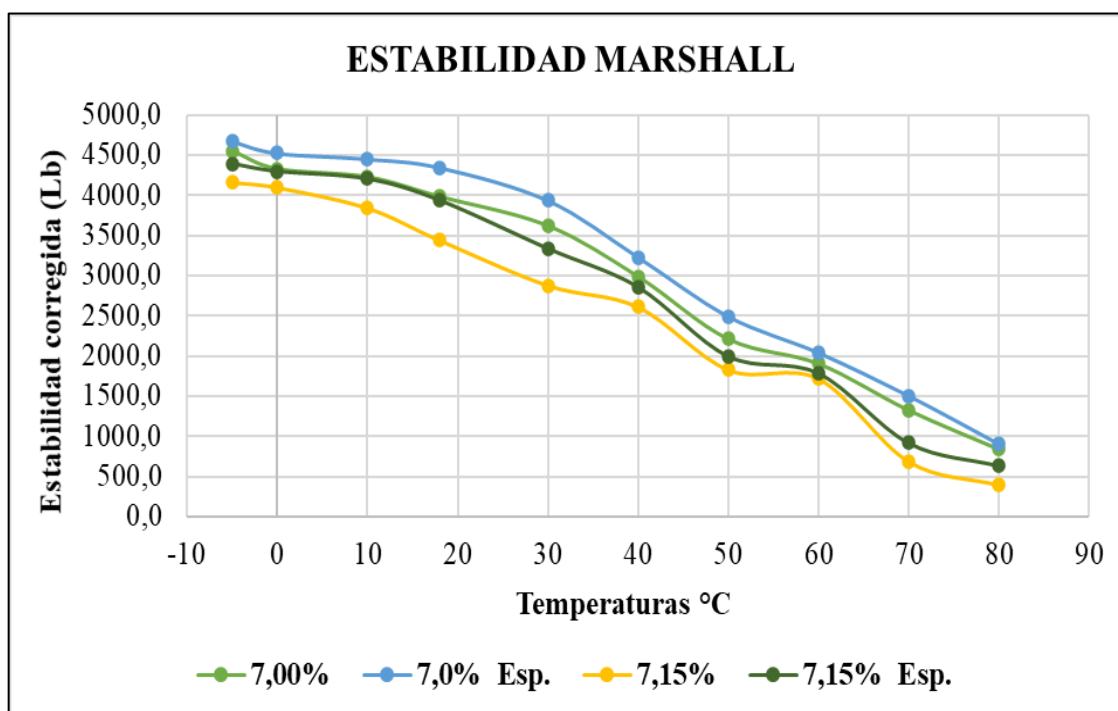
De acuerdo a su comportamiento reológico que presentan estas mezclas y para su mayor entendimiento con el fin de hacer un análisis comparativo entre las propiedades de las matrices finas producidas con asfalto espumado se desglosa en el siguiente análisis, usando como referente la tabla 2.5 para ver los parámetros que estén dentro de los rangos establecidos en la norma.

3.8.1. Análisis de la estabilidad Marshall

Tabla 3.45 Estabilidad corregida a diferentes temperaturas

Estabilidad corregida (Lb)				
Temp. °C	Arena triturada		Arena natural	
	7,00%	7,0% Esp.	7,15%	7,15% Esp.
-5	4552,48	4670,94	4157,18	4394,44
0	4329,28	4523,91	4094,49	4299,56
10	4228,98	4450,69	3839,72	4205,82
18	3983,31	4343,90	3439,79	3938,50
30	3621,11	3936,47	2877,05	3338,57
40	2989,53	3230,02	2608,83	2858,50
50	2212,32	2492,13	1827,70	1997,59
60	1905,93	2042,22	1715,76	1785,93
70	1327,22	1505,75	686,05	918,87
80	842,98	905,63	395,38	635,63

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.48 Comportamiento de estabilidad a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración propia

La estabilidad de las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado es la medida de su resistencia a sufrir una deformación, en la representación gráfica vemos que la estabilidad varía de acuerdo a las roturas realizadas a diferentes temperaturas.

Cuando se somete a unas temperaturas de -5°C y 0°C , la estabilidad de las mezclas usando el material triturado tiene mucha más resistencia que cuando se usa material natural y cuando se lo trabaja con el espumado da mucha más resistencia con ambos materiales, pero podría presentar pequeñas fisuras térmicas las mezclas debido a la contracción que ocurre al bajar las temperaturas.

Cuando la temperatura es de 10°C la estabilidad con el contenido óptimo espumado de la arena triturada es mucho mayor a los demás sin embargo las mezclas convencionales con arena natural y espumado al contenido óptimo se asemeja a una estabilidad cuando se trabaja solamente con el contenido óptimo del triturado y para las mezclas con arena natural y sin espumar tiene menor estabilidad a comparación de las demás, pero estas llegan a cumplir siendo mayores a 1800lb de acuerdo a lo requerido.

Considerando una temperatura ambiente de 18°C vemos que en la gráfica de estabilidad versus temperatura cuando se lo trabaja con asfalto espumado y arena triturada la estabilidad se mantiene considerablemente respecto a las demás e incluso con el óptimo de la arena natural es similar cuando se lo trabaja con triturado, llegando a tener una estabilidad mayor a lo mínimo que se requiere.

Para las temperaturas de 30°C y 40°C en la curva se ve una diferencia notoria de cómo va descendiendo la estabilidad tomando en cuenta que con el contenido óptimo y óptimo espumado trabajado con la arena triturada su resistencia es mayor que con la arena natural, soportando más resistencia a la deformación a esas temperaturas.

Tomando en cuenta que a temperaturas desde los 0°C a 45°C el asfalto se pone duro y hacen que las mezclas estén más estables, pero podría tener pequeñas fisuraciones por fatigas causada por las repeticiones de carga a lo largo de su vida útil, entonces las temperaturas tomadas en cuenta anteriormente podrían tener esas pequeñas fisuras para las mezclas de matrices finas producidas con asfalto espumado y cumpliendo con la estabilidad requerida según la norma IRAM 6845.

Cuando se rompen a temperatura de 50 y 60°C estas llegan a cumplir con la estabilidad dado que la rotura de las briquetas se las realiza a 60°C, pero el comportamiento de las mismas es notable ya que cuando se trabaja con arena triturada y con el contenido óptimo y óptimo espumado su estabilidad aun cumple con lo requerido, pero es mucho menor que las anteriores temperaturas, si bien cumplen, pero estas tenderán a deformarse rápidamente por las repeticiones de cargas. Cuando se trabaja con la arena natural la resistencia a la estabilidad cumple llegando al mínimo con 50°C y para 60°C no llega a cumplir tampoco cuando se lo añade el asfalto espumado, esto también puede ser debido a que cuando se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico la estabilidad de la misma no llega a lo que se requiere, pero si tiene una resistencia característica cuando la rotura se da con temperaturas inferiores a lo establecido por Marshall. Si consideramos una temperatura ambiente o una sensación térmica el asfalto se ira aflorando y formando una película delgada continua encima de la carpeta el cual producirá deformaciones permanentes en la mezcla y que sea inestable la carpeta.

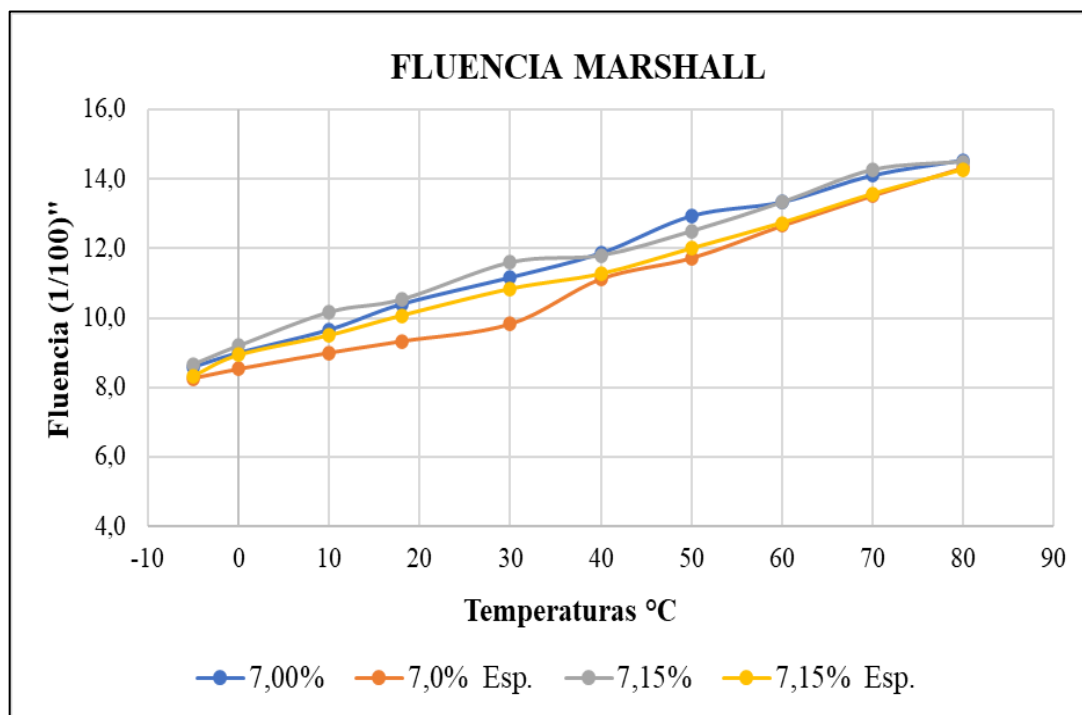
Si bien la temperatura de aplicación es de 120°C para que sea puesto el material en obra, esto no significa que se pueda dar viabilidad al instante después de colocarlo porque considerando una rotura más de lo establecido a los 60°C como temperaturas de 70°C y 80°C estas no llegan a una estabilidad requerida debido a que son temperaturas muy elevadas y que la mezcla se vuelva más blandas que tienden a deformarse mucho más rápido de igual manera que utilizando asfalto espumado no llegan a cumplir con lo mínimo establecido porque ya son temperaturas donde se está sobrecalentando a la mezcla.

3.8.2. Análisis de la fluencia Marshall

Tabla 3.46 Fluencia a diferentes temperaturas

Fluencia Marshall 1/100''				
Temp. °C	Arena triturada		Arena natural	
	7,00%	7,0% Esp.	7,15%	7,15% Esp.
-5	8,60	8,27	8,67	8,33
0	9,00	8,53	9,20	8,93
10	9,67	9,00	10,17	9,50
18	10,40	9,33	10,53	10,07
30	11,17	9,83	11,60	10,83
40	11,87	11,13	11,80	11,27
50	12,93	11,73	12,50	12,00
60	13,33	12,67	13,33	12,73
70	14,10	13,53	14,27	13,57
80	14,53	14,33	14,50	14,27

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.49 Comportamiento de la fluencia a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración propia

La fluencia de una mezcla de matrices finas producidas con asfalto espumado es la medida de deformación hasta el punto de ruptura o falla.

Las temperaturas de rotura hacen variar al flujo de manera ascendente como se demuestra en la representación gráfica de los valores obtenidos de fluencia tomando en cuenta que desde los -5°C hasta los 30°C el comportamiento del flujo tiene mucha similitud ya sea con matrices finas con asfaltos espumado o una matrices finas convencionales porque a esas temperaturas las mezclas finas tienen buena estabilidad cumpliendo con lo exigido y cuando observamos con las temperaturas mayores a los 40°C el comportamiento del flujo asciende a aumentar. Entonces si trabajamos como una mezcla tradicional el flujo es un poco mayor a diferencia cuando se lo trabaja con asfalto espumado ahí baja considerablemente un poco menos, esto es debido a la estabilidad que tienen este tipo de mezclas, es decir mientras mayor sea su estabilidad la fluencia disminuiría y cuando haya una estabilidad menor a lo que se requiere o llegue al mínimo que se requiere el flujo aumentara, si el flujo sobre pasa lo establecido podría presentar problemas de resistencia la mezcla porque disminuiría la adherencia que tiene con los agregados finos.

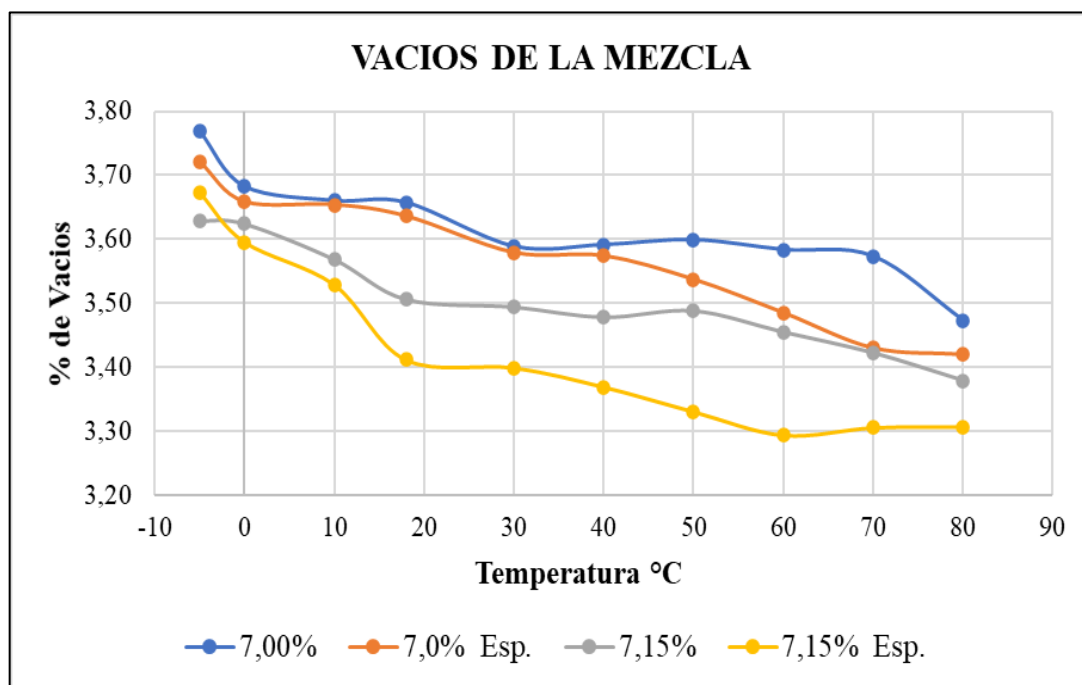
3.8.3. Análisis de vacíos de la mezcla

Tabla 3.47 Porcentaje de vacíos para matrices finas convencionales y producidas con asfalto espumado

Vacíos de las mezclas de matrices finas			
Arena triturada		Arena natural	
7,00%	7,0% Esp.	7,15%	7,15% Esp.
3,77	3,72	3,63	3,67
3,68	3,66	3,62	3,60
3,66	3,65	3,57	3,53
3,66	3,64	3,51	3,41
3,59	3,58	3,49	3,40
3,59	3,57	3,48	3,37
3,60	3,54	3,49	3,33
3,58	3,48	3,45	3,29
3,57	3,43	3,42	3,31
3,47	3,42	3,38	3,31

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.50 Representación gráfica de los vacíos



Fuente: Elaboración propia

Los vacíos presentes en las mezclas de matrices finas convencionales tienen mayor porcentaje de vacíos a diferencia que cuando son producidas con asfalto espumado, esto debido a que el contenido óptimo usando el agregado fino triturado y natural son mayores porque son mezclas que carecen de agregados gruesos y hace que el porcentaje de vacíos disminuya y cuando se usa asfalto espumado el porcentaje de vacío es menor esto se debe a la presencia de agua en el asfalto que absorben más partículas.

(No interfiere las diferentes temperaturas en el porcentaje de vacíos ya que claramente el efecto de las temperaturas se ve más que todo en la estabilidad y fluencia de las matrices finas.)

3.9. CAMPO DE APLICACIÓN DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO

El campo de aplicación de las matrices finas producidas con asfalto espumado generalmente puede ser aplicados como en el mantenimiento de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles para evitar que debilite las capas inferiores y poder mantener la superficie de la calzada garantizado buenas condiciones de rodadura y seguridad De acuerdo a la investigación realizada las matrices finas pueden ser aplicadas en mantenimientos periódicos de calles para que alarguen la vida útil del pavimento, entre ellos tenemos los siguientes mantenimientos donde podría ser aplicado:

a) Recapados asfálticos

Los recapados asfálticos tiene la función de evitar nuevas grietas o fisuras, estos consisten en colocar la mezcla asfáltica en caliente sobre el pavimento flexible existente y se lo debe aplicar cuando el pavimento se encuentre en un estado regular, una matriz fina es recomendable y se procede de la siguiente manera:

- Se debe colocar señales y dispositivos de seguridad para identificar zonas a intervenir y las condiciones climáticas.
- Preparar la superficie para aplicar el recapado asfálticos haciendo previamente bacheo y sellos de fisuras y grietas si es el caso.
- Aplicar el riego de liga y permitir su curado.

- Ejecutar la colocación del recapado con la mezcla de matrices finas con la contendedora de mezcla asfáltica en caliente o maquina pavimentadora.
- Después se debe compactar la mezcla extendida con rodillo vibratorio para que tenga la superficie lisa.

Figura 3.51 Recapados asfálticos con arena fina



Fuente: Recapado asfáltico - EPAV

b) Fresado de carpeta asfáltica

El fresado de pavimento sirve para retirar el firme agotado, fisurado o en mal estado de los pavimentos flexibles, es un proceso por el cual un equipo provisto de un cilindro rotatorio con dientes de especial dureza remueve de 1 a 3 cm de pavimento y se puede usar mezclas de matrices finas para la colocación de una nueva capa de mezcla, se realiza según el siguiente procedimiento:

- Limpiar toda la superficie que será fresada y colocar todos los materiales de seguridad.
- Remover con la máquina la capa de pavimento flexible de 1 a 3 cm. a la volqueta que estará recogiendo todo el material que será desecho.
- Realizar el recapado con la mezcla de matrices finas producidas con asfalto espumado
- Limpiar el material sobrante de tal manera que la superficie este limpia.

Figura 3.52 Fresado con material fino



Fuente: Fresado de pavimento – INVOL. S.L.

c) Nivelación de bermas con mezclas asfálticas

La nivelación de la berma dañada o desgastada, sirve para evitar a deformación de un escalón lateral peligroso para los usuarios y proteger el pavimento para que no dañe a la estructura interior o las demás capas, se debe proceder de acuerdo:

- Colocar señales preventivas, donde la longitud del tramo a tratar no debe ser mayor a los 1000m.
- Las partes dañadas serán demolidas con herramientas manuales o martillo neumático.
- Se verificará el perfil transversal de la base para realizar las correcciones y nivelar compactando con tres pasadas de rodillo.
- La superficie de la base compactada será limpiada con escobas con el fin de eliminar el polvo para recibir la imprimación.
- El mortero asfáltico o matrices finas será colocado de forma manual en la berma.
- La compactación deberá ser realizada con un mínimo de diez pasadas y luego hacer limpieza del sitio de trabajo.

Figura 3.53 Renivelación de bermas



Fuente: Concesión vial de Cartagena

d) Bacheo superficial

El bacheo superficial comprende en reemplazar áreas del pavimento que se encuentran deteriorados, siempre que afecten a la carpeta asfáltica encontrándose en buenas condiciones la base granular y las demás capas de suelo. El procedimiento de aplicación con las matrices asfálticas finas será de:

- Instalar señales de prevención y dispositivos de seguridad.
- Delimitar el área por remover, marcándola con pintura; darle forma rectangular o cuadrada comprendiendo toda la zona deteriorada y hasta unos 0,30 m dentro del pavimento circundante en buen estado.
- Cortar por líneas que delimitan el área por remover dejando paredes verticales (de preferencia con sierra).
- Remover la mezcla hasta la profundidad en que se encuentre mezcla sana, sin grietas.
- En los baches alcanzar como mínimo hasta el punto más profundo. Poner especial cuidado en no dañar ni soltar la base granular subyacente.
- Retirar los materiales sobrantes y transportarlos solo a botaderos autorizados donde deben colocarse en forma ordenada y recubrirse completamente con, a lo menos 0,30 m del suelo.

Bacheo manual

- Limpiar las paredes y el fondo de la zona removida mediante barrido enérgico y/o aire comprimido (presión mínima 120 psi), hasta eliminar todas las partículas sueltas y el polvo.
- Colocar el imprimante o liga, mediante escobillones u otros procedimientos que permitan un cubrimiento uniforme del fondo y paredes, a razón de 1,3 a 2,4 l/m².
- Antes de colocar la mezcla asfáltica verificar que la imprimación haya penetrado al menos 10 mm en las bases granulares.
- Extender y nivelar la mezcla asfáltica mediante rastrillos y colocar la cantidad justa y necesaria para cubrir toda el área por rellenar y dejarla 6 mm sobresaliendo del pavimento circundante. En los bordes recortar la mezcla dejando paredes verticales y retirar cualquier exceso.
- Compactar con rodillo manual. El desnivel en los bordes no debe pasar los 3 mm.

Bacheo Mecanizado

- Mediante una bacheadora mecanizada, especialmente diseñada para estos efectos, en forma secuencial limpiar el área con aire a presión, aplicar el imprimante o riego de liga, y mediante proyección a presión, colocar la mezcla de relleno.

Figura 3.54 Bacheos con mezclas finas



Fuente: Bacheo superficial – ASEINSA PAV.

Bacheo profundo

Para realizar el bacheo profundo se puede usar el mortero asfáltico o matiz fina producida con asfalto espumado.

- Marcar la zona a reparar, extendiéndose al menos 0.3 metros fuera del área dañada.
- El área a delimitar debe ser rectangular, con dos de sus lados perpendiculares al eje del camino. Posteriormente, deberá cortarse sobre la demarcación realizada, utilizando un equipo de corte.
- Excavar hasta la profundidad definida por el espesor diseñado recortando las paredes de forma vertical, de modo que el fondo quede plano y horizontal, luego colocar el sello de imprimación y verificar que haya penetrado.
- La superficie se recubrirá con el ligante que corresponda, para lo cual se utilizarán escobillones u otros elementos similares que permitan esparcirlo uniformemente.
- La mezcla asfáltica se extenderá y nivelará mediante rastrillos, colocando la cantidad adecuada para que sobresalga unos 6 mm sobre el pavimento circundante, en los extremos, y coincidiendo con las líneas de corte de la zona.
- La compactación deberá realizarse con un rodillo neumático o liso de 3 a 5 t de peso, alternativamente podrá usarse un rodillo manual, dependiendo del espesor de la capa por compactar.
- El desnivel máximo tolerable entre la zona reparada y el pavimento que la rodea será de 3 mm.

3.10. LIMITACIONES DEL CAMPO DE APLICACIÓN

Las aplicaciones de las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado se pueden limitar a ser empleadas de acuerdo a:

- Según los tamaños de las partículas que componen las matrices finas ya que estas carecen de agregado grueso y tienden a resistir menos que las mezclas de concreto asfáltico que soportan mayores cargas de transitabilidad y si se aplicaría en este tipo de mezclas solo sería para la carpeta de rodamiento es decir esta mezcla no aportaría carga a toda la estructura para tráficos pesados.
- Según las fallas que presentan el pavimento; generalmente se podría realizar tratamientos superficiales o baches pequeños para que mejoren la vida útil y no

pueda dañar a las capas inferiores los deterioros que se ocasionan por fisuras o grietas.

- El tráfico vehicular; el tráfico vehicular es un parámetro muy importante pues de acuerdo a la estabilidad que tienen este tipo de mezclas solo podrían ser empleadas en zonas de tráfico liviano es decir que el tránsito vehicular sea bajo ya que las cargas que soportan no se comparan cuando son mezclas de concreto asfáltico, asimismo en zonas donde la temperatura ambiente no sobre pase los 40°C o sea moderado como la ciudad de Tarija y sus alrededores.

3.11. EVALUACIONES DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO

3.11.1. Evaluación técnica

Las matrices finas tanto convencionales y producidas con asfalto espumado, nos da a conocer nuevas tendencias en los pavimentos flexibles para su uso en reparación o tratamientos superficiales, teniendo en cuenta solamente con el empleo de agregado fino triturado puesto que sus propiedades de estabilidad y fluencia tiene mejores condiciones que cuando se usa agregado fino natural.

3.11.2. Evaluación social

En cuanto a lo social se puede proponer un aporte al mantenimiento de pavimento flexibles, considerando que son mezclas de fácil aplicabilidad el cual no se requiere el cierre de calles temporales que puedan perjudicar a las transeúntes, puesto que en menos de 24 horas ya hay libre circulación.

3.11.3. Evaluación ambiental

Tomando en cuenta la contaminación ambiental que causa otros tipos de mezclas asfálticas ya sea por el uso de aditivos o el equipo mismo de trabajo con los que se ejecuta, que causan contaminación del aire, con el empleo de una matriz fina con asfalto espumado se trata de disminuir esos impactos ambientales puesto que el asfalto espumado es amigable con el medio ambiente ya que al aplicar la mezcla no presente alguna

evaporación volátil contaminante porque el espumado se lo realiza en una cámara de expansión que es cerrada.

3.11.4. Evaluación económica

El costo de producción es muy importante ya que permite conocer los gastos necesarios para realizar un proyecto, por lo tanto, mientras más eficaz se la labor de estos menos recursos se invertirá en la producción y será menos la cuantía de los gastos.

Para realizar las diferentes actividades en los costos unitario se toma en cuenta los rendimientos de la mano de obra y el equipo que interviene en la obra, considerando la cantidad de materiales e insumos, por ello es significativo la obtención del máximo de producción con el mínimo indispensable de gastos para garantizar así el gradual incremento de las ganancias o utilidades.

Para la evaluación del costo de producción se tomará en cuenta solamente cuando se trabaja con material triturado, dado que tienen mejores propiedades que cuando se usa una de fuente natural y se considerara cuando se trabaja solamente con el contenido óptimo de asfalto y con el contenido óptimo espumado, se lo demuestra en las siguientes tablas el costo de producción por metro cubico.

Tabla 3.48 Planilla de precios unitarios para mezclas de matrices finas

PROYECTO:	Caracterización reológica de matrices finas producidas con asfalto espumado en pavimentos flexibles			
ACTIVIDAD:	Colocado de carpeta			
CANTIDAD:	1,00			
UNIDAD:	m3	MONEDA:	BOLIVIANOS	
DESCRIPCION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES				
Arena clasificada	m3	1,00	145,00	145,000
Cemento asfáltico 85-100	kg	175,0	10,29	1.800,750
Diesel	lt	18,000	3,72	66,960
TOTAL, MATERIALES				2.012,710
2. MANO DE OBRA				
Obrero	Hr	0,070	13,18	0,923
Capataz	Hr	1,200	18,02	21,624
Ayudante	Hr	0,028	13,18	0,369
Chofer	Hr	0,012	16,44	0,197
Operador de planta	Hr	0,090	24,85	2,237
Operador de equipo liviano	Hr	0,082	16,44	1,348
SUB TOTAL MANO DE OBRA				26,698
CARGAS SOCIALES			71,18%	19,003
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA			14,94%	6,828
TOTAL, MANO DE OBRA				52,528
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Terminadora de asfalto	Hr	0,075	350,00	26,250
Compactador de rodillo liso	Hr	0,024	304,66	7,312
Compactador neumático	Hr	0,084	332,33	27,916
Escoba mecánica autopropulsadora	Hr	0,028	70,60	1,977
Cargador frontal de ruedas	Hr	0,000	420,70	0,042
Planta calentamiento de asfalto	Hr	0,090	964,67	86,820
Volquete 12 m3	Hr	0,030	227,85	6,836
SUB TOTAL EQUIPOS				157,152
HERRAMIENTAS menores			5,00%	2,626
TOTAL, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				159,779
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES			15,50%	344,878
TOTAL, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				344,878
5. UTILIDAD				
UTILIDAD 10%			10,00%	256,989
TOTAL, UTILIDAD				256,989
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT 3,09%			3,09%	87,351
TOTAL, IMPUESTOS				87,351
TOTAL, PRECIO UNITARIO				2.914,23
PRECIO ADOPTADO				2.914,00

Son: Dos mil novecientos catorce bolivianos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49 Planilla de precios unitarios para matrices finas producidas con asfalto espumado

PROYECTO:	Caracterización reológica de matrices finas producidas con asfalto espumado en pavimentos flexibles			
ACTIVIDAD:	Colocado de carpeta			
CANTIDAD:	1,00			
UNIDAD:	m3	MONEDA:	BOLIVIANOS	
DESCRIPCION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES				
Arena clasificada	m3	1,00	145,00	145,000
Cemento asfáltico 85-100	kg	215,0	10,29	2.212,350
Diesel	lt	18,000	3,72	66,960
TOTAL, MATERIALES				2.424,310
2. MANO DE OBRA				
Obrero	Hr	0,070	13,18	0,923
Capataz	Hr	1,200	18,02	21,624
Ayudante	Hr	0,028	13,18	0,369
Chofer	Hr	0,012	16,44	0,197
Operador de planta	Hr	0,090	24,85	2,237
Operador de equipo liviano	Hr	0,082	16,44	1,348
SUB TOTAL MANO DE OBRA				26,698
CARGAS SOCIALES			71,18%	19,003
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA			14,94%	6,828
TOTAL, MANO DE OBRA				52,528
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Terminadora de asfalto	Hr	0,075	350,00	26,250
Compactador de rodillo liso	Hr	0,024	304,66	7,312
Compactador neumático	Hr	0,084	332,33	27,916
Escoba mecánica autopropulsadora	Hr	0,028	70,60	1,977
Cargador frontal de ruedas	Hr	0,000	420,70	0,042
Planta calentamiento de asfalto	Hr	0,090	964,67	86,820
Volquete 12 m3	Hr	0,030	227,85	6,836
SUB TOTAL EQUIPOS				157,152
HERRAMIENTAS			5,00%	2,626
TOTAL, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				159,779
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES			15,50%	408,676
TOTAL, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				408,676
5. UTILIDAD				
UTILIDAD 10%			10,00%	304,529
TOTAL, UTILIDAD				304,529
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT 3,09%			3,09%	103,510
TOTAL, IMPUESTOS				103,510
TOTAL, PRECIO UNITARIO				3.453,33
PRECIO ADOPTADO				3.453,00
Son: Tres mil cuatrocientos cincuenta y tres bolivianos				

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones planteadas del presente trabajo de investigación son:

- En este trabajo se pudo evaluar las características reológicas de estabilidad y fluencia de las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado, realizando roturas a diferentes temperaturas mediante el diseño Marshall con materiales locales de nuestra región.
- Se puede observar que al trabajar con dos tipos de agregados finos de acuerdo a su procedencia nos da diferentes valores en la caracterización como; en el equivalente de arena para un agregado fino natural es de 77,91%, las pérdidas por sulfato de 4,34% y para el agregado fino triturado un equivalente de arena de 91,23% sus pérdidas de 4,16%. Entonces la diferencia se ve reflejado en esas características esenciales ya que los triturados tienen los bordes angulares y el cemento asfáltico de adhiere mejor que tienden a resistir más al momento de elaborar una mezcla de matrices finas y cumpliendo con las propiedades del diseño Marshall como estabilidad y fluencia. A diferencia que con el agregado fino natural estos tienen sus bordes lisos y desgastados el cual estos factores no hacen cumplir con algunas propiedades del diseño Marshall según la norma IRAM 6845.
- Se logró caracterizar al cemento asfáltico betunel 85-100 para el desarrollo de la investigación y que estén dentro de las especificaciones provistas del fabricante según las normas ASTM y AASHTO y la ficha técnica proporcionada por la alcaldía municipal de Tarija.
- Los criterios empleados para la caracterización del asfalto espumado corresponden al volumen que puede alcanzar la espuma (razón de expansión) y al tiempo disponible para el mezclado antes del colapso de la espuma (vida media) según WIRTGEN. Se pudo determinar un porcentaje de agua de 3% del peso total a inyectar al contenido óptimo de asfalto a una temperatura de 170°C a la que se espumara para realizar las mezclas, dando así la relación de expansión de 12,10 y vida media de 16,11 segundos estando dentro de los rangos provistos. Estos

critérios son reconocidos en el proceso de espumación sin embargo la forma en que son medidos y analizados no dan valores precisos sino más bien ordenes de magnitud, por ello se puede realizar nuevas formas para medir estas propiedades y obtener una caracterización más precisa de la espuma.

- Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico nos da porcentajes altos porque son mezclas que carecen de agregados gruesos y requieren mayor contenido de asfalto, con la arena triturada el contenido es de 7,00% dando una estabilidad de 1856,45 lb. que este cumple con el parámetro y con la arena natural el contenido es de 7,15% con una estabilidad de 1784,64 lb que no llega al mínimo de lo que se requiere de 1800 lb.
- Se elaboró briquetas con material triturado y con el contenido óptimo para matrices finas convencionales e incorporadas con asfalto espumado, analizando el parámetro de rotura a diferentes temperaturas según indica la reología de las mezclas, vemos que el comportamiento de la estabilidad cuando se diseña con el asfalto espumado y son rompidas a temperaturas desde -5°C , -0°C a 40°C ; es mucho mayor que cuando son mezclas convencionales y cuando llegan entre los 50°C y 60°C tienden a tener menor estabilidad pero sí cumpliendo con lo especificación de la norma y cuando pasan esas temperaturas ya no llegan al mínimo requerido porque las mezclas se tornan más blandas. Su fluencia es proporcional a la estabilidad mientras mayor carga resista mejor será la deformación del flujo.
- Para el diseño de las briquetas con la arena natural y su porcentaje óptimo a pesar de no llegar a lo requerido la estabilidad se diseñó para verificar cuál es su comportamiento de rotura a diferentes temperaturas de estas mezclas de matrices finas convencionales y añadidas con asfalto espumado no solamente a los 60°C que indica Marshall, de acuerdo a las gráficas anteriores y las temperaturas de rotura establecidas su estabilidad son mucho menores que cuando se usa material triturado sin embargo hasta una temperatura de rotura de 50°C llegan a cumplir con lo establecido de la norma IRAM 6845 y después para las demás temperaturas no llegan a lo mínimo.

- Las mezclas de matrices finas producidas con asfalto espumado como tienen agua, hacen endurecer a la mezcla y unen más las partículas del agregado por tal motivo la estabilidad aumenta consideradamente para los dos tipos de agregados, ayudando a que tengan mayor resistencia que cuando se usa una mezcla convencional.
- Las matrices asfálticas finas producidas con asfalto espumado son mezclas con baja permeabilidad ya que cuenta con pocos vacíos en su estructura y al no tener agregados gruesos tiene un acabado más fino sin necesidad de hacer acabados en su superficie y es recomendable usarla en pavimentos flexibles de tráfico liviano. Si bien las matrices finas también son comparadas con un mortero asfáltico pues su aplicación es similar y se le podría dar uso en mantenimientos como parchados superficiales, baches, agrietamientos, en un recapado asfáltico u otros, tomando en cuenta solamente la arena de procedencia de trituración ya que tiene mejores características que una natural y con el asfalto espumado sus condiciones mejoran.
- Finalmente, concluimos con el estudio cumpliendo los objetivos y validando nuestra hipótesis planteada al determinar las propiedades de las matrices finas producidas con asfalto espumado verificando que sí existen mejorías cuando se trabaja las matrices finas con el asfalto espumado y con agregados finos de procedencia triturada, pero es posible investigar sobre otras tecnologías u otro tipo de cemento asfáltico ya que pueden tener mayor alcance que ayuden a contribuir el desarrollo de los pavimentos.

4.2. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones respecto a la ejecución de la investigación son:

- Para trabajar con las matrices finas se recomienda usar una arena triturada ya que esta si cumplen con las especificaciones y aún más mejoran sus características cuando se lo trabaja con asfalto espumado.
- No se recomienda trabajar con arena de procedencia natural porque estas no cumplen con la estabilidad de rotura a 60°C de acuerdo a lo que indica Marshall, tanto en mezclas convencionales y con asfalto espumado y la fluencia son mayores que tienden a sufrir mayores deformaciones que con una arena triturada.

- El material granular no debe tener demasiadas impurezas, debe estar seco al momento de realizar la caracterización para cuidar la franja granulométrica ya que puede influir en los resultados y no ser apto para su respectiva aplicación.
- Para realizar el ensayo de caracterización del asfalto espumado es necesario añadir directamente al asfalto caliente cantidades medidas de agua porque al entrar en contacto con el agua genera una reacción explosiva y se debe medir el volumen final que alcanza el espumado y el tiempo que dura la espuma ya que no se cuenta con una cámara de expansión en laboratorio y eso es lo que expone a uno mismo posibles quemaduras tanto en la mano o como también puede saltar el asfalto en parte del rostro por eso se recomienda tener un equipo mínimo de seguridad como: guantes para manipular cosas calientes, un mandil para evitar que el asfalto manche la ropa o de preferencia un overol que cubra los brazos y gafas de seguridad.
- Se debe tomar en cuenta la temperatura al momento de realizar el diseño de una FAM para evitar recalentamiento del cemento asfáltico y al momento de compactar con el martillo se debe hacer a una velocidad constante manteniendo siempre perpendicular al suelo evitando inclinaciones ya que estas fallas pueden dar datos erróneos.
- Como este tipo de mezcla carece de agregado gruesos tiene menos vacíos y por lo tanto es más impermeable y su aplicación se recomienda en lugares donde circula mucha agua en tiempo de lluvia y también se recomienda evitar el uso en mantenimientos de pavimentos flexibles de tráfico pesado o de mayor circulación vehicular, si se llegara a aplicar en este tipo de pavimento sería para un recapado superficial que no aporte carga solo sellado a la estructura de rodamiento.
- Para investigaciones futuras se puede trabajar con otro tipo de cemento asfáltico como el Betuflex 60-85, PEN 60-70 u otros tipos, con el fin de poder evaluar y comparar las características reológicas de estabilidad y fluencia.