

ANALISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFALTICA CON ASFALTO ESPUMADO Y UNA TRADICIONAL

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

No se encontró ningún registro de la aplicación a nivel local de tecnología relacionada con el asfalto espumado; por el contrario, el fenómeno de la formación de espuma cuando la humedad de los agregados entra en contacto con el asfalto caliente es considerado una falla constructiva, durante el proceso de elaboración de mezclas asfálticas, producida por un secado deficiente del agregado, dificultando el mezclado uniforme y el cubrimiento total de las partículas con el cemento asfáltico, generando posteriormente deterioro prematuro en el pavimento terminado. Aun así, este fenómeno producido intencionalmente y manejado en forma adecuada puede proporcionar muchas ventajas, como eficiencia en la pavimentación, fácil reciclado de pavimentos viejos, mejor adaptabilidad a cualquier tipo de agregado, menor costo e impacto ambiental debido a un considerable ahorro energético.

Sin embargo, en el ámbito internacional el asfalto espumado fue ampliamente investigado. El método fue desarrollado en los Estados Unidos por un profesor universitario.

El profesor Ladis Csanyi de la universidad de Iowa en USA, demostró que el asfalto espumado podría ser muy útil. El demostró que se podría mezclar el asfalto caliente con agregados húmedos y fríos si primeramente se espumaba el asfalto. El profesor Csanyi uso vapor de agua como un medio para introducir agua dentro de un asfalto caliente. Hubo poco interés en el nuevo proceso, hasta que en 1968 Mobil Oil (actualmente Mobil) adquirió la patente del invento y realizo mayor investigación en el tema, principalmente modificó el procedimiento original, agregando agua fría en lugar de vapor y desarrolló una serie de investigaciones relacionadas a la optimización del proceso. El vencimiento de los derechos sobre la patente del espumado derivó en una explosión de avances en el tema en los años 90s. Diversos

estudios internacionales han determinado parámetros para mejorar la eficiencia del proceso relacionados con: Temperatura del asfalto, presión de espumado del asfalto, viscosidad del asfalto, tamaño del recipiente donde se espuma en laboratorio, banda Granulométrica, utilización de Filler, contenido de RAP, Cantidad de finos y algunos estudios de contenido óptimo de asfalto.

A nivel internacional, en países como Australia, Sud África y Nueva Zelanda se ha investigado extensamente sobre las características de esta tecnología, aplicándola exitosamente para la estabilización de capas base, y pavimentación de carpetas de rodadura.

A diferencia de las mezclas con asfalto espumado, las mezclas tradicionales han sido ampliamente investigadas y aplicadas por diversas instituciones, encargadas de la administración de caminos y carreteras.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El asfalto espumado es una técnica relativamente nueva, que permite producir mezclas asfálticas con diferencias sustanciales a los sistemas tradicionales, permitiendo mezclar los agregados a bajas temperaturas con el asfalto en estado espumoso. Se realiza la presente investigación porque el desarrollo de métodos alternativos de producción de mezclas asfálticas en la región ha sido descuidado, a pesar de que la aplicación de la tecnología del asfalto espumado se ha masificado en los últimos 20 años.

Se pretende generar una mezcla asfáltica con asfalto espumado deliberadamente y en condiciones controladas, para obtener briquetas con agregados de la región usados en mezclas asfálticas tradicionales, para determinar sus propiedades mecánicas básicas y compararlas mutuamente.

Se brindará a la universidad un equipo sencillo para realizar experimentalmente el ensayo de espumado de asfalto, con diferentes porcentajes de inyección de agua y a diferentes temperaturas. Además de datos que sirvan como parámetros de los resultados que se puedan obtener de este ensayo.

Se obtendrán resultados; una experimentación práctica que arroje como resultados las características físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica con asfalto espumado, y así poder compararlas con las propiedades de una mezcla tradicional, brindando información sobre la viabilidad de un método constructivo más económico y ambientalmente amigable que salve las deficiencias del método tradicional.

1.3 HIPOTESIS

Espumar el asfalto es una técnica que altera temporalmente su estructura, reduciendo considerablemente la viscosidad del conjunto agua – aire – asfalto, permitiendo mezclar el asfalto con el agregado en frío y húmedo, produciendo así una mezcla con propiedades físico mecánicas similares a las de la mezcla asfáltica tradicional.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL:

Con la realización del presente proyecto de investigación, se pretende fabricar una mezcla asfáltica con asfalto espumado, deliberadamente y en condiciones controladas, y una mezcla asfáltica tradicional con los mismos ingredientes (agregados y asfalto), para someter ambas muestras a ensayos Marshall y determinar sus características mecánicas.

1.4.2 ESPECÍFICOS:

- Caracterización del cemento asfáltico a utilizar en la investigación mediante los ensayos de penetración, punto de inflamación, viscosidad, destilación y contenido de agua.
- Indagar sobre las características necesarias de los agregados, para la fabricación de mezclas asfálticas.
- Determinar los métodos de producción de mezclas con asfalto espumado, y su facilidad para la reproducción en laboratorio.
- Caracterizar los agregados, realizando ensayos de granulometría y peso específico.

- Ensayar en laboratorio, las características de relación de expansión y vida media del asfalto espumado, para determinar las condiciones ideales de temperatura y de agua.
- Diseñar y fabricar un equipo sencillo de laboratorio que sirva para introducir agua deliberadamente en el asfalto caliente a una temperatura controlada, para espumar el asfalto deliberadamente y posteriormente verterlo dosificadamente sobre una cantidad de agregado frío.
- Elaborar briquetas para diseño de mezclas asfálticas tradicionales y para la mezcla con asfalto espumado para poder comparar sus propiedades por el método de diseño Marshall.
- Realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con asfalto espumado y las mezclas asfálticas con asfalto tradicional, para determinar la aplicabilidad del asfalto espumado como una técnica útil para la construcción en nuestro medio.

1.5 ALCANCE

Se determinará si las mezclas asfálticas con asfalto espumado satisfacen los requerimientos mínimos deseados de acuerdo a especificaciones de las mezclas asfálticas tradicionales en caliente.

Se elaborará un esquema de un equipo sencillo que sirva para el espumado de asfalto que podrá ser mezclado con agregados regionales de características ya conocidas.

Dentro del *“ANALISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFALTICA CON ASFALTO ESPUMADO Y UNA TRADICIONAL”* se:

- Conseguirán agregados ya conocidos y utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas tradicionales para su caracterización.
- Conseguirá una muestra del cemento asfáltico actualmente usado para la elaboración de mezclas asfálticas para su caracterización.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar la cantidad de agua exacta y temperatura óptima del cemento asfáltico para la producción de asfalto espumado, y se verificara si las características resultantes entran en los rangos sugeridos.

- Fabricar un equipo sencillo que permita el espumado deliberado de un cemento asfáltico.
- Espumar deliberadamente un asfalto, en condiciones ideales de temperatura y contenido de humedad, para fabricar briquetas que sean sometidas a pruebas Marshall.
- Realizar ensayos Marshall de diseño de mezclas asfálticas para definir el contenido ideal de cemento asfáltico en una mezcla tradicional y en una con asfalto espumado y se compararan las propiedades entre ambas.

Finalmente, se presentarán los resultados de las características mecánicas de las mezclas asfálticas de los asfaltos espumados, en una comparación con mezclas asfálticas tradicionales.

CAPITULO II

GENERALIDADES Y DEFINICIONES SOBRE EL CEMENTO ASFÁLTICO, AGREGADOS, MEZCLA ASFALTICA TRADICIONAL, CON ASFALTO ESPUMADO Y ENSAYO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS.

2.1 EL CEMENTO ASFÁLTICO

2.1.1 DEFINICION

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

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

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

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera es como el asfalto, parafina, gasolina, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad son el resultado de una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado.

Debido a que la base del asfalto es la base o el constituyente pesado del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado. En consecuencia, el asfalto es obtenido como residuo o producto residual, y es valioso para una gran variedad de usos arquitectónicos o ingenieriles.

Prácticamente todo el asfalto comercializado en el medio con la finalidad de ser usado en la pavimentación de carreteras es producido en refinerías de petróleo modernas y se denomina asfalto de petróleo.

El asfalto es también un material bituminoso porque contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en disoluto de carbono (CS_2). El alquitrán obtenido de la destilación de un carbón graso, también contiene betún. Consecuentemente, tanto el petróleo asfáltico son referidos en forma conjunta como materiales bituminosos. Sin embargo, el asfalto de petróleo no debe ser confundido con el alquitrán, ya que sus propiedades difieren en forma considerable. El asfalto de petróleo está compuesto casi enteramente por betún, mientras que en el alquitrán el contenido de betún es relativamente bajo. En vista de estas diferencias es necesario que los productos del alquitrán y los asfaltos de petróleo sean considerados y tratados como elementos completamente separados.

El asfalto de petróleo para uso en pavimentos es comúnmente llamado *asfalto de pavimentación o cemento asfáltico* para distinguirlo del cemento asfáltico hecho para otros usos, como ser para propósitos industriales o para techados.

El asfalto para pavimentación a temperatura atmosférica normal (ambiente) es un material negro, pegajoso, semi-sólido y altamente viscoso. Está compuesto primordialmente de moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contiene otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. Debido a que el asfalto de pavimentación es pegajoso, se adhiere a las partículas del agregado y puede ser usado para cementarlas o ligarlas dentro del concreto asfáltico. El asfalto para pavimentación es impermeable y no lo afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría. Esta combinación única de características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante.

Los pavimentos asfálticos son a veces, no con toda propiedad, llamados flexibles, quizás como consecuencia que el asfalto es un material viscoso y termoplástico.

El asfalto de petróleo es el principal asfalto de pavimentación usado actualmente aunque aún se emplea en algunos países el asfalto natural o nativo. El asfalto natural o nativo, tal como se encuentra en Trinidad y muchos otros lugares del mundo es, hablando en forma general, el residuo de antiguos depósitos de petróleo que han perdido sus constituyentes volátiles a través de los procesos biológicos, lo cual puede aceptarse como destilación natural. El alcance del asfalto nativo o natural es, sin embargo, relativamente pequeño. El asfalto natural es durable y ha sido usado a lo largo de la historia, los sumerios estaban familiarizados con el asfalto y sus propiedades cementantes e impermeabilizantes antes del año 3800 antes de Cristo. Los babilonios (2500-538AC) usaron el asfalto para construir presas, embalses y caminos. El asfalto de petróleo moderno tiene las mismas características de durabilidad, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños. El asfalto natural no es uniforme y contiene cantidades variables de materias extrañas.

2.1.2 REFINACION DEL PETROLEO CRUDO PARA LA OBTENCION DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyendo al asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. El diagrama del proceso para la extracción del asfalto de petróleo (figura 2.1) muestra la circulación del petróleo crudo a través de una refinería destacándose la parte del proceso relativa a la refinación y producción del cemento asfáltico.

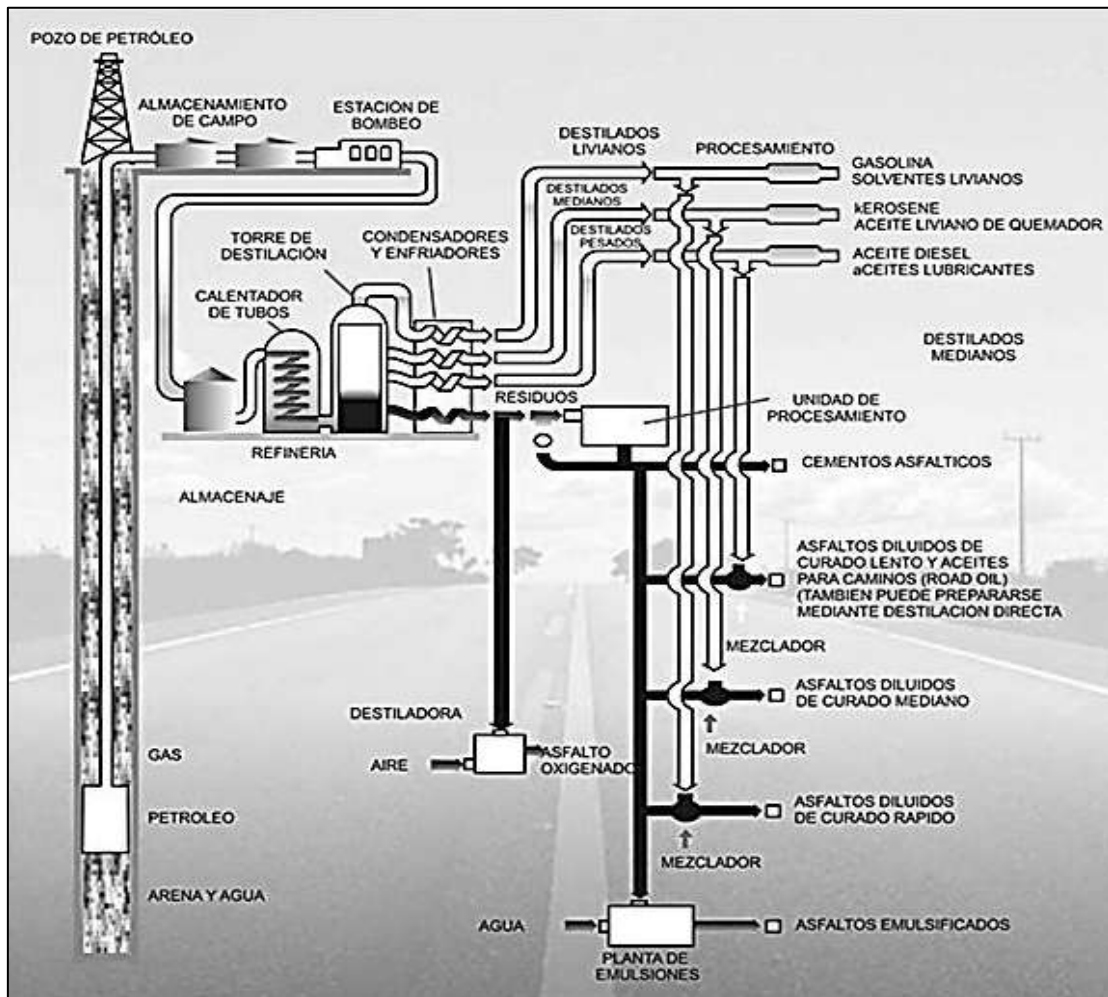
Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles) y se los separa para el posterior refinamiento en nafta, gasolina, querosene y otros productos derivados del petróleo.

El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada o petróleo crudo, comúnmente llamada crudo reducido. Puede ser usado como fuel oíl residual, o procesado en distintos productos, entre ellos, el asfalto. Para la separación de la

fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener cemento asfáltico. Según el proceso de refinación utilizado, se obtienen cementos asfálticos de muy alta o baja consistencia. Estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada. Los asfaltos soplados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia apropiada.

Diagrama del proceso para la extracción del asfalto

Figura 2.1



(Fuente: "http://ticsperu.wikispac9es.com/Polaridad+y+Petroleo+Crudo")

2.1.3 PROPIEDADES DESEABLES DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para los estudios técnicos y la construcción vial hay tres propiedades o características importantes del asfalto:

1. Consistencia:

Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas; esta propiedad es llamada también fluidez, porque el asfalto es un material termoplástico que se licúa gradualmente al calentarlo. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad que tiene el asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.

Si el cemento asfáltico se expone al aire en películas delgadas, y se somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo durante el mezclado con el agregado, el asfalto tiende a endurecerse, a aumentar de consistencia. El aumento de esta característica es limitado, por lo tanto, un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar mayor daño al cemento asfáltico por endurecimiento que por muchos años de servicio en el camino terminado.

Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o ensayos de penetración.

2. Pureza:

El cemento asfáltico se compone, casi enteramente, de betunes, los cuales, por definición son solubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos refinados son, generalmente, más de 99.5 % solubles en bisulfuro de carbono y por lo tanto casi betunes puros. Las impurezas, si las hay, son inertes.

Normalmente, el cemento asfáltico, cuando deja la refinería, está libre de agua o humedad, pero puede haber humedad en los tanques de transporte. Si hay agua inadvertida, puede causar espumas al asfalto cuando se calienta por encima de los 100°C.

3. Seguridad

La espuma puede constituir un riesgo para la seguridad; por lo tanto algunas normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175°C.

Si se somete el cemento asfáltico a temperaturas suficientemente elevadas, despiden vapores que arden en presencia de una chispa o una llama. La temperatura a la que esto ocurre es más elevada que la temperatura que normalmente es usada en las operaciones de pavimentación. Sin embargo, para fines de transporte y almacenamiento, se suele diluir el asfalto a temperaturas en las que adquiere la suficiente fluidez para bombearlo; este proceso puede generar vapores volátiles altamente riesgosos, por eso es necesario tener la certeza de que existe un adecuado margen de seguridad. Por este motivo se hace indispensable conocer el punto de inflamación del asfalto.

2.1.4 ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS

Comercialmente se dispone de cementos asfálticos en varios rangos de comercialización normalizados (grados). Hasta hace poco, estos rangos se basaban solamente en mediciones hechas con el ensayo de penetración; se disponía de cementos asfálticos de cinco grados: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, y 200-300, que indicaban rangos permitidos de penetración para cada uno. El más blando (200-300) es moderadamente firme a temperatura ambiente; a esta temperatura, una presión suave con el dedo marca la superficie de la muestra. El más duro (40-50) a temperatura ambiente es de una consistencia que permite solo una ligera impresión del pulgar, hecha bajo firme presión.

La clasificación de los asfaltos basada en el ensayo de penetración es un método antiguo y empírico, inadecuado para la tecnología moderna. La tendencia actual, de base más científica, es clasificar los cementos asfálticos de acuerdo a su viscosidad en poises a 60°C. La unidad de viscosidad en el sistema c.g.s es el Poise (P) equivalente a 1 gr/cm.s (1 dina.s/cm²) y en el SI es 1 Pa.s (1 N.s/m²), equivalente a 10 P. Se dispone de dos series de cementos asfálticos de distintos grados de viscosidad. Una tiene los grados AC-2,5; AC-5; AC-10; AC-20 y AC-40, donde los

valores numéricos indican la viscosidad en cientos de poises a 60°C. La tolerancia admisible para cada clase es de 20 %, en más o en menos. La otra tiene los grados AR-1000, AR-2000, AR-8000 y AR-16000 en que los valores numéricos indican la viscosidad en Poises pero medida en asfalto ya ensayado con el ensayo de película delgada rodante en horno. Por lo tanto, las series AR deben ser interpretadas como series de “Residuo viejo”. La tolerancia en estas clases es de 25 % en más o en menos.

Normalmente, los asfaltos de bajo grado de viscosidad corresponden a los asfaltos blandos de alto valor de penetración. Por el contrario, los asfaltos de alta viscosidad corresponden a los asfaltos duros o de bajo grado de penetración. Sin embargo, esto no necesariamente se cumple en todos los casos.

La AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y la ASTM (American Society for Testing and Materials) han adoptado las especificaciones a que se ha hecho referencia últimamente para la clasificación de cementos asfálticos para pavimentación y por consecuencia, la Administradora Boliviana de Carreteras ha incluido estos ensayos en su “Manual de Ensayos y Materiales sección Asfaltos”.

Además del ensayo de viscosidad a 60°C o el de penetración para definir el grado o rango de consistencia, se requieren algunos otros ensayos para determinar las propiedades específicas de estos productos.

2.1.5 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR EL CEMENTO ASFÁLTICO

2.1.5.1 ENSAYOS DE VISCOSIDAD

Las especificaciones de los cementos asfálticos clasificados según su viscosidad, se basan por lo común en los rangos de viscosidad a 60°C. También se especifica generalmente una viscosidad mínima a 135°C. El propósito es dar valores límites de consistencia a estas dos temperaturas. Se eligió la temperatura de 60°C porque se aproxima a la máxima temperatura superficial de las calzadas en servicio pavimentadas con mezclas asfálticas, y la de los

135°C, porque se aproxima a la temperatura de mezclado y distribución de mezclas asfálticas en caliente para pavimentación.

Para el ensayo de viscosidad a 60°C se emplea un viscosímetro de tubo capilar. Los dos tipos más comunes en uso son: el viscosímetro de vacío del Asphalt Institute y el viscosímetro de Cannon - Manning. Se calibran con aceites normalizados. Para cada viscosímetro se obtiene un “factor de calibración”. Generalmente los viscosímetros vienen calibrados por el fabricante quien suministra estos factores.

El viscosímetro se monta en un baño de agua a temperatura constante, controlado termostáticamente. Se vierte asfalto precalentado en el tubo más grande hasta que alcanza el nivel de la línea de llenado. El viscosímetro se mantiene en el baño por cierto tiempo hasta que el sistema alcance la temperatura de equilibrio de 60°C.

Se aplica un vacío parcial en el tubo pequeño para inducir el flujo, porque el cemento asfáltico a esta temperatura es muy viscoso para fluir fácilmente a través de los tubos capilares del viscosímetro.

Luego que el baño, viscosímetro y el asfalto se han estabilizado en 60°C se aplica vacío y se mide con un cronometro el tiempo, en segundos, que tarda el cemento asfáltico en fluir entre dos marcas. Multiplicando este tiempo por el factor de calibración del viscosímetro se obtiene el valor de la viscosidad en poises, la unidad patrón para medir viscosidad absoluta.

El viscosímetro de vacío del Asphalt Institute tiene muchas marcas para medir el tiempo. Seleccionando el par apropiado, se puede usar para asfaltos con una amplia variación de consistencias.

Los cementos asfálticos para pavimentación son lo suficientemente fluidos a 135°C para fluir a lo largo de los tubos capilares bajo fuerzas de gravitacionales únicamente. Por lo tanto, se usa un tipo diferente de viscosímetro, ya que no se

requiere el vacío. El método utilizado por su disponibilidad en el medio es el de Saybolt Furol, AASHTO (T 72) - ASTM (D 88).

Este método se refiere a procedimientos empíricos para determinar la viscosidad de Saybolt universal o Saybolt Furol de productos del petróleo a temperaturas especificadas.

La viscosidad Saybolt Furol es el tiempo en segundos, corregido durante el cual fluyen 60 ml de muestra a través de un orificio Furol calibrado bajo condiciones específicas. El valor de la viscosidad se informa en segundos Saybolt Furol (SSF) a una temperatura especificada.

La palabra Furol es una contracción de las palabras “Fuel and Road Oils” (aceites y combustibles para carreteras)

La viscosidad Saybolt Furol es aproximadamente 1/10 de la viscosidad Saybolt Universal, y es recomendada para la caracterización de productos del petróleo.

2.1.5.2 ENSAYOS DE PENETRACIÓN

La consistencia de un asfalto puede medirse con un método empírico, como el ensayo de penetración, en el cual se basó la clasificación de los cementos asfálticos en grados normalizados. Consiste en calentar un recipiente con cemento asfáltico a una temperatura de referencia, 25°C, en un baño de agua a temperatura controlada. Se apoya una aguja normalizada de 100 gramos de peso sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos. La medida de la penetración es la longitud que penetra la aguja en el cemento asfáltico en unidades de 0.1 mm.

Ocasionalmente, el ensayo de penetración se realiza a distinta temperatura en cuyo caso puede variarse la carga de la aguja, el tiempo de penetración o ambos.

2.1.5.3 ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN

Cuando se calienta el asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre. Esta temperatura, está sin embargo, muy por debajo de la temperatura en la que el material entra en estado de combustión permanente. Se la denomina punto de combustión y es muy raro que se use en especificaciones para asfalto.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de “vaso abierto Cleveland” (COC) que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes vapores volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

2.1.5.4 ENSAYO DE DUCTILIDAD

Algunos ingenieros consideran que la ductilidad es una característica importante de los cementos asfálticos. Sin embargo, generalmente se considera más significativa la presencia o ausencia de la misma, que su grado real. Algunos cementos asfálticos que tienen un grado muy alto de ductilidad son también más susceptibles a la temperatura. Es decir, que la variación de la consistencia puede ser mayor debido al cambio de temperatura.

La ductilidad de un cemento asfáltico se mide con un ensayo tipo “extensión” para el que se moldea una probeta de cemento asfáltico en condiciones medias normalizadas. Se la lleva a temperatura de ensayo de la norma, generalmente a 25°C y se separa una parte de la probeta de la otra a cierta velocidad, normalmente 5 cm por minuto, hasta que se rompa el hilo de asfalto que une ambos extremos de la muestra. La ductilidad del asfalto es la distancia (en centímetros) a la cual se rompe dicho hilo.

2.1.5.5 ENSAYO DE SOLUBILIDAD

El ensayo de solubilidad es una medida de la pureza del cemento asfáltico. La parte del mismo soluble en bisulfuro de carbono representa los constituyentes activos de cementación. Sólo la materia inerte, como sales, carbón libre, o contaminantes inorgánicos, no son solubles.

En este ensayo se usa generalmente tricloroetileno, que es el menos peligroso que el bisulfuro de carbono y otros solventes. La mayoría de los cementos asfálticos son igualmente solubles en cualquiera de los dos.

El proceso para determinar la solubilidad es muy simple. Se disuelven aproximadamente 2 gr de asfalto en 100 ml de solvente y se filtra la solución a través de una plancha de asbesto colocada en un crisol de porcelana. Se pesa el material retenido por el filtro y se lo expresa como porcentaje de la muestra original, obteniéndose el porcentaje soluble en bisulfuro de carbono.

2.1.5.6 ENSAYO DE DESTILACION Y CONTENIDO DE AGUA

El ensayo de destilación se usa para determinar la proporción de agua presente en el cemento asfáltico, algunos cementos asfálticos pueden contener aceites. La destilación del cemento asfáltico entrega información acerca de su calidad.

El procedimiento es muy similar al de los ensayos de emulsiones asfálticas y de asfaltos cortados. Una muestra de 200 gr de asfalto se destila a 260°C durante 15 minutos con el objeto de obtener un residuo homogéneo.

Para un cemento asfáltico la tolerancia al agua es casi nula, esta tiene que estar por debajo del 0.2% y es el resultado de la división del peso del agua entre el peso del asfalto “seco”.

2.1.6 CARACTERISTICAS PROVISTAS POR EL FABRICANTE DEL ASFALTO USADO EN LA INVESTIGACION:

El cemento asfáltico utilizado para la realización de la investigación fue una donación del Gobierno Municipal de la Provincia Cercado. El fabricante es de origen brasilero, que brindó la siguiente información:

Características del cemento asfáltico del fabricante

Tabla 2.1

BETUNEL						
INDUSTRIA Y COMERCIO LTDA						
CERTIFICADO DE CALIDAD DEL PRODUCTO ACABADO						
(COPIA)						
PRODUCTO: CAP 85 – 100 CEMENTO ASFÁLTICO DE PETROLEO						
FECHA DE CARGAMENTO: 22/11/12						
CANTIDAD: 27900 Kg.						
TEMPERATURA: 25 °C						
CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO	DEL	LIMITES	MÉTODO	REPRODUCTIB	ENCONTRADAS	
PENETRACION, 100g, 5s, 25°C,dmm		85 a 100	NBR-6576 / ASTM D5 / AASHTO T49	± 4 dmm	90	
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °C		43 min.	NBR-6560 / ASTM D36 / AASHTO T53	± 3 °C	46	
DUCTILIDAD a 25°C, cm		100 min.	NEBR-6293 / ASTM D113 / AASHTO T51	Consultar NBR	>100	
VISCOSIDAD DE BROOKFIELD A 135°C, cP		214 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	275	
VISCOSIDAD DE BROOKFIELD A 150°C, cP		97 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	135	
VISCOSIDAD DE BROOKFIELD A 177°C, Cp		28 a 114	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	53	
TEMPERATURA DE MEZCLADO, °C		INDICATIVO	CALCULO	ND	140 a 146	
TEMPERATURA DE COMPACTACION, °C		INDICATIVO	CALCULO	ND	128 a 134	
INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA (IST)		-1.5 a 0.7	CALCULO/CALCULO	ND	-0.8	
PUNTO DE INFLAMACION, °C		235 min.	NBR – 11341 / ASTM D92 / AASHTO T48	± 18 °C	>235	
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, %		99.5 min.	NBR – 14855 / ASTM D2042 / AASHTO T44	± 0.26%	99.9	
DENSIDAD RELATIVA A 20/4°C		Anotativa	NBR-6296 / AASHTO T229	±0.005		
ENSAYO SOBRE RESIDUO ENVEJECIDO						
OBSERVACIONES:						
ND .- No determinado						
No se recomienda el calentamiento por encima de 165 °C						
SOLICITUD A CLIENTE:						
Por favor, se solicita al cliente por medio de esta, los resultados de los ensayos hechos por su persona, a momento de recibir el producto. En caso de encontrar alguna divergencia con los datos presentados anteriormente, contactar al departamento técnico.						
DECLARACIONES:						
1. Los resultados aquí presentados representan la muestra ensayada						
2. Este certificado solo puede ser reproducido íntegramente						
3. Los datos se encuentran archivados en el archivo electrónico						

2.2 AGREGADOS PARA EL USO EN MEZCLAS ASFALTICAS

2.2.1 GENERALIDADES

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

Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían de obra en obra, debido a que la mayoría de las agencias contratantes no tienen especificaciones para dichos procedimientos. Esencialmente las agencias exigen que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación para el agregado. Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía con los diferentes niveles del acopio. Deberán prepararse superficies firmes y limpias, y se deberán tomar precauciones para mantener separadas las reservas y así prevenir el mezclado de las partículas. La separación se consigue ya sea manteniendo ampliamente espaciados, o mediante muros de contención entre ellas.

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

2.2.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

El agregado, también conocido como roca, material granular o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte (incapaz de reacción), usado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. Los áridos constituyen un porcentaje, en general superior al noventa

por ciento la mayoría de los casos. Obviamente, la naturaleza y calidad del agregado son importantes. En la capa superior de un pavimento asfáltico, donde las cargas de las ruedas son concentradas y las tensiones elevadas, se requiere agregados de alta calidad para lograr una mezcla fuerte y de buen comportamiento. Por lo tanto, los agregados minerales son los principales responsables de la capacidad de carga del pavimento. Además, el agregado influye notablemente en el comportamiento del pavimento, especialmente si tomamos en cuenta que en una mezcla con agregado densamente graduado éste conforma entre el 90 y 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación.

La calidad final de los áridos y por tanto su aptitud dependen de la naturaleza petrológica de los mismos, pero también en gran medida de su proceso de preparación. Aunque en fase de proyecto se suelen evaluar las posibles procedencias de áridos, la procedencia definitiva se establece en la fase de construcción.

En los áridos gruesos por su principio de funcionamiento (rozamiento interno), las mezclas asfálticas requieren de áridos resistentes y estables, es decir: bajos valores de desgaste de los Ángeles, alta resistencia al pulimento, buena forma (limitación en lajas y agujas) y un alto porcentaje de caras fracturadas.

En los áridos finos la calidad de la fracción fina es muy importante, debido a que por su determinante contenido en la mezcla, sus características son muy críticas en la cohesión del conjunto.

Es importante considerar que entre los criterios que definen el uso de un agregado sobre otro está la disponibilidad y el costo; más aún, es necesario considerar otros criterios esenciales para la elaboración de una buena mezcla, como:

- 1 Graduación y tamaño máximo de la partícula
- 2 Limpieza
- 3 Dureza
- 4 Forma de la partícula
- 5 Textura de la superficie
- 6 Capacidad de absorción

7 Afinidad con el asfalto

8 Peso específico

La importancia técnica y económica de los áridos en la construcción de carreteras es de tal magnitud que el resultado final de la obra estará fuertemente condicionada por la selección de los áridos. En todo proyecto para la construcción de una carretera los volúmenes elevados de agregados condicionan económicamente su selección, limitándose necesariamente las distancias de transporte.

2.2.3 TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFALICAS

2.2.3.1 AGREGADO GRUESO

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

2.2.3.2 PIEDRA TRITURADA:

El material bruto para piedra triturada debe provenir de roca dura, como la arenisca, basalto, piedra caliza u otra piedra de calidad equivalente, o piedra de canto rodado con un tamaño de partícula de por lo menos tres veces más grande que el tamaño máximo requerido para el producto final.

El producto triturado puede ser tamizado para obtener el tamaño del agregado deseado. Algunas veces, por razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado “triturado sin cribar”, en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos.

Las piedras trituradas deben tener uniformidad, limpieza, dureza y durabilidad suficiente y estar libres de una cantidad perjudicial de partículas planas o alargadas, sucias con barro o con materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

2.2.3.3 GRAVA TRITURADA:

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

2.2.3.4 AGREGADO FINO

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2.5mm (o.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. Los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz número 4.

- **Arena:**

La arena se clasifica en: arena natural, arena artificial, polvo de trituración y arena especial.

La arena natural se clasifica, por el lugar de excavación, en: arena de río, arena de cantera y arena de mar.

La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodado. Las arenas son partículas rocosas que pasan el tamiz N°4 y quedan retenidas en el N° 200; y dentro de estas se encuentran las arenas finas, que son el material que pasa el tamiz N° 40 y quedan retenidas en el N°200, y el material que pasa el tamiz N°10 y retenidos en el tamiz N°40 se consideran arenas gruesas. Las partículas que pasan el tamiz N° 8 o menos, que se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como “polvo de trituración”.

- **Filler:**

O relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz número 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 volcánico.

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 número 200), y otros fillers.

Grados Estándar del Filler Mineral

Tabla 2.2

Filler Mineral			
Tamiz	#30	#100	#200
% que pasa	100	90-100	65-100

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

La cal apagada, el cemento Portland y otros productos procesados industrialmente se pueden usar a veces como fillers minerales en mezclas asfálticas y para evitar el desarrollo de agrietamientos en el pavimento.

2.2.4 ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS

Los agregados deben satisfacer las especificaciones a continuación detalladas.

- **Naturaleza e identificación:** Evaluación de la naturaleza petrográfica de los áridos, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.
- **Propiedades geométricas:** Básicamente la forma y angulosidad de las partículas, con relación al conjunto total del mineral se estudia la distribución granulométrica. Cuando se utilice grava o canto rodado triturados, se debe tener un porcentaje no menor de un 75% en peso de las partículas retenidas por el tamiz N°4, el cual deberá tener por lo menos una cara fracturada.
- **Propiedades mecánicas:** Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento, en este caso, el agregado grueso debe estar constituido de fragmentos limpios, sanos, duros, durables, libres de terrones de arcilla y sustancias nocivas y deberá tener un porcentaje de desgaste los ángeles no mayor al 40%.
- **Ausencia de impurezas:** Es fundamental que los áridos a emplear en las mezclas asfálticas estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento del pavimento, los áridos sucios pueden ser causa suficiente para provocar la degradación de una carretera. Para esto se realiza el ensayo equivalente de arena; de acuerdo al método AASHTO T-176 se recomienda que deberá ser mayor a 45%.
- **Inalterabilidad:** Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los áridos una vez puestos en obra. El agregado grueso, al ser sometido a cinco ensayos alternativos de resistencia mediante sulfato de sodio, empleando en método AASHTO T-104, no podrá tener una pérdida de peso mayor del 12%; por lo tanto, los materiales

han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar a la vida útil de las capas.

- **Adhesividad:** Los áridos han de ser afines con el ligante que se vaya a utilizar y en caso de problemas será necesario el uso de aditivos para garantizar el buen comportamiento de las mezclas. Se considera que no existe suficiente adherencia si el porcentaje de cubrimiento es inferior a 95% cuando se realice la prueba AASHTO T-182 con temperatura 35°C.
- **No plástico:** Cuando se utilice filler mineral se compondrá de partículas muy finas de caliza, cal apagada, cemento Portland, u otras sustancias minerales no plásticas. Deberá estar perfectamente seco y no contendrá grumos.

Además de satisfacer las especificaciones mencionadas, la mezcla de agregados usada para la elaboración del concreto asfáltico, deberá caer dentro de una banda granulométrica, que brinde las características requeridas para el proyecto.

Composición de las mezclas tipo IV

Tabla 2.3

<i>Gradación Densa</i>				
Mezcla #	IVa	IVb	IVc	IVd
Uso recomendado	Capa Superficial	Capa Superficial	Capa superficial o Capa Ligante	Capa Ligante o Base
Espesor recomendado para capas individuales	3/4" - 1 1/2"	1" - 2"	1 1/2" - 2 1/2"	2" - 3"
Tamices	Porcentaje que pasa por peso			
1 1/2"				100
1"			100	80 - 100
3/4"		100	80 - 100	70 - 90
1/2"	100	80 - 100	67 - 90	
3/8"	80 - 100	70 - 90	60 - 82	55 - 75
#4	55 - 75	50 - 70	42 - 65	45 - 62
#8	35 - 50	35 - 50	35 - 50	35 - 50
#30	18 - 29	18 - 29	19 - 30	19 - 30
#50	13 - 23	13 - 23	13 - 23	13 - 23
#100	8 - 16	8 - 16	7 - 15	7 - 15
#200	4 - 10	4 - 10	4 - 8	0 - 8

(Fuente: Carreteras calles y Aeropistas, Valle Rodas Raúl)

Para la elaboración del presente proyecto se utilizó la gradación sugerida por el instituto de Asfalto de Estados Unidos tipo IVc con las características recomendadas:

Contenido normal de asfalto: 3,5 – 7,0 % por peso del total de la mezcla, el límite superior podrá aumentarse en caso de uso de agregado absorbente.

2.2.5 ENSAYOS DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente considerada como un factor de calidad; sin embargo, este no es el caso necesariamente para mezclas en caliente para pavimento. Una estabilidad

extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados y viceversa.

Los áridos se emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezcla de usos muy diversos. Como los áridos constituyen normalmente el 90% al 95% en peso de las mezclas asfálticas sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado. Los áridos más empleados son piedra canto rodado, grava triturada o natural, arena y filler natural.

En la construcción de pavimentos asfálticos, el control de las propiedades de los áridos es tan importante como el de las del asfalto.

A continuación, se detalla brevemente los ensayos normalizados que son realizados sobre los áridos y se hace referencia a los procedimientos normalizados para la realización de estos ensayos.

2.2.5.1 GRANULOMETRIA

Este método de ensayo abarca el procedimiento para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso y de agregado fino, empleando tamices de aberturas cuadradas, siendo también aplicable el empleo de cribas de laboratorio de aberturas circulares.

Hay dos métodos para determinar las proporciones relativas de los diversos tamaños de partículas en una muestra de áridos:

- **Análisis granulométrico por vía seca.**

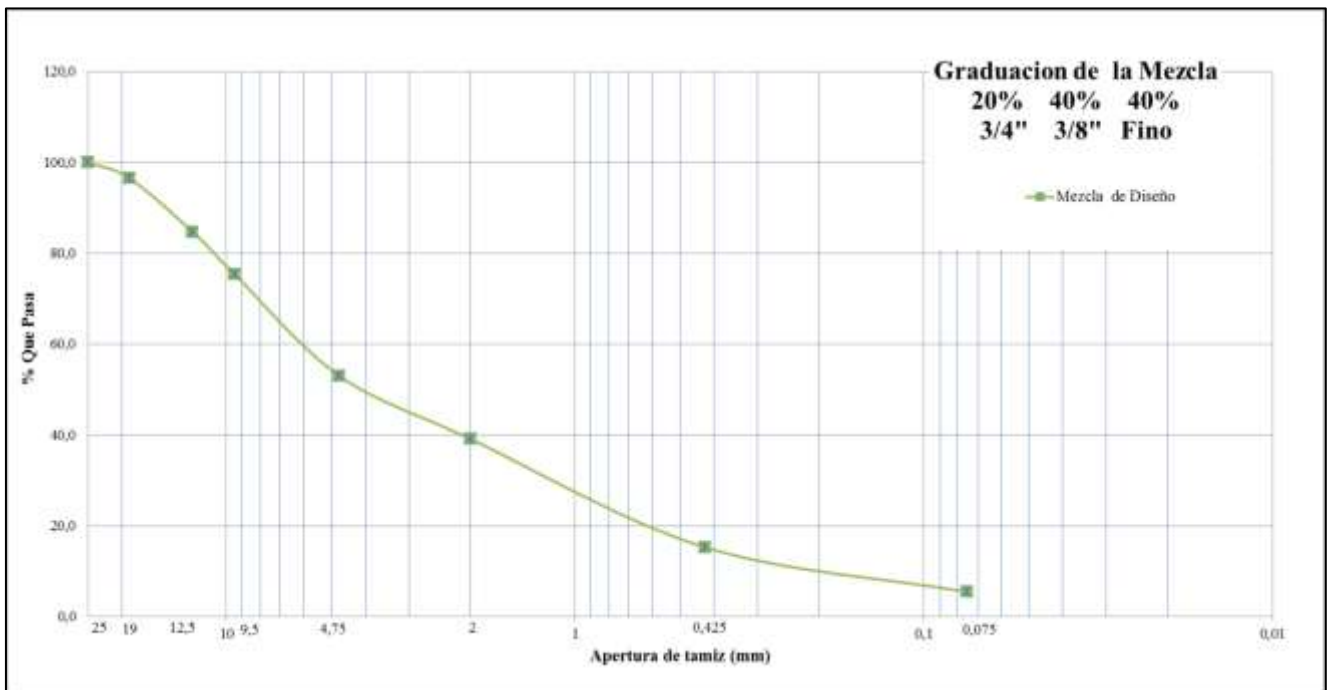
Este método consiste en el tamizado por vía seca, el procedimiento es de agitar una cantidad pesada de áridos perfectamente secos sobre una serie de tamices con aberturas cuadradas. Los tamices están unidos de forma que el de mayor abertura está en la parte superior y los de abertura más pequeña están situados debajo. Bajo el último tamiz se coloca una bandeja que recoge todo el material que pasa a través de él. La agitación se aplica

normalmente con aparatos automáticos, pero si no se disponen de estos se puede realizar manualmente sin pérdida de áridos.

Se determina el peso de material retenido en cada tamiz y se expresa en porcentaje del peso de la muestra original. Usualmente resulta conveniente anotar estos datos en un gráfico. En estos gráficos debe indicarse el porcentaje total, el peso que pasa por cada tamiz. Las curvas así obtenidas son instrumentos que dan rápidamente idea de las características granulométricas de los áridos.

Granulometría de una mezcla

Figura 2.2



- **Análisis granulométrico por vía húmeda.**

Este método de ensayo da un procedimiento para determinar por vía húmeda la distribución de tamaños de los áridos finos y gruesos. Este procedimiento es deseable frecuentemente cuando los áridos contienen polvo extremadamente fino o arcilla que pueden pegarse a las partículas

más gruesas. En estos casos los resultados obtenidos del análisis granulométrico por vía seca son evidentemente erróneos.

2.2.5.2 RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION

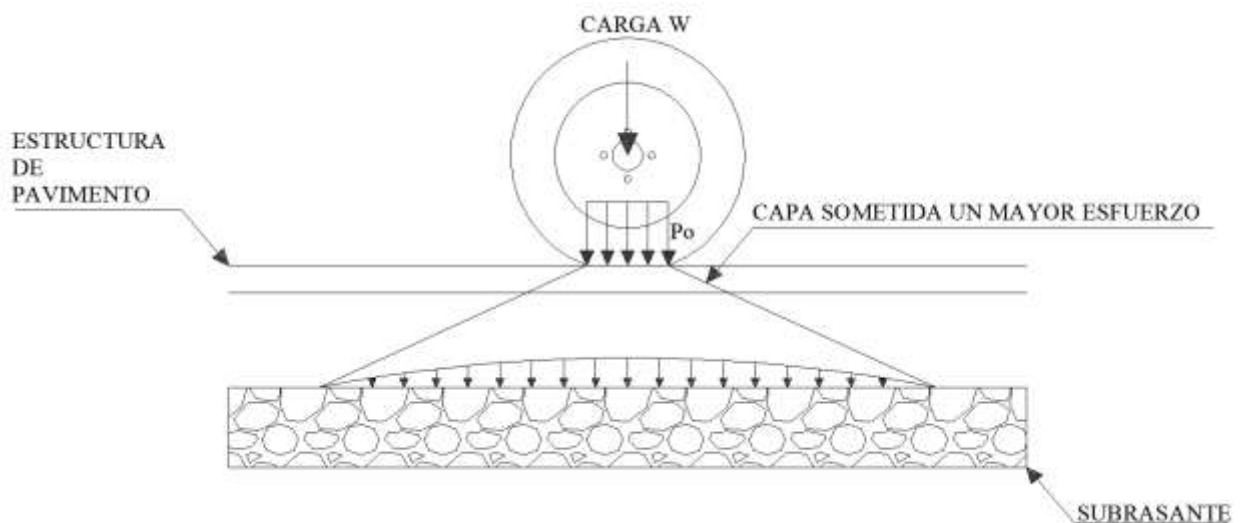
El agregado pétreo está sujeto a una rotura adicional y a un desgaste por abrasión durante la elaboración, colocación y compactación de la mezcla asfáltica para pavimentación. El agregado sufre, además, la abrasión debido a las cargas del tránsito.

Deben tener por lo tanto, en cierto grado, capacidad de resistir la trituración degradación y desintegración.

El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores donde las cargas resultan disipadas o no son tan concentradas como se puede observar en la figura 2.3

Distribución de esfuerzos

Figura 2.3



El ensayo de abrasión o desgaste “Los Ángeles” mide la resistencia al uso o abrasión del agregado mineral cuando el pavimento es sometido al tráfico

vehicular. El porcentaje de desgaste medido por el ensayo de Los Ángeles no tiene en general ninguna relación con el pulimento de los áridos bajo el desgaste del tráfico.

El tambor de la máquina de desgaste, el cual es cargado con un peso determinado de partículas de agregado grueso con una graduación prefijada que se asemeja al material propuesto para el diseño en la mezcla asfáltica, así como un peso normalizado de esferas de acero que han de actuar como carga abrasiva. A continuación se hace dar al tambor 500 vueltas, después de lo cual se extrae el material y se determina el porcentaje de material que pasa por el tamiz número 12, que se define como porcentaje de desgaste.

La elevada resistencia al desgaste indica por un bajo porcentaje de pérdida por la abrasión es una característica deseable de los áridos que han de emplearse en la construcción de pavimentos asfálticos.

2.2.5.3 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO

- **Peso específico:**

Usualmente se determina el peso específico de los áridos por dos razones:

- Para determinar el cálculo de los huecos de las mezclas asfálticas compactadas.
- Para corregir las cantidades de áridos empleado en una mezcla para pavimentación cuando su peso específico varía apreciablemente.

Los vacíos en la capa de pavimento asfáltico compactada, aparecen en la muestra como pequeñas cavidades de aire entre las partículas de agregado recubiertas por asfalto. La elección del peso específico de un agregado usado en los cálculos de una mezcla asfáltica podría tener un efecto sustancial sobre la cantidad calculada de vacíos en el pavimento compactado. El peso específico del agregado en la mezcla depende del grado en el que el mismo absorbe asfalto. Cuando se usa el peso específico aparente se asume que el asfalto será absorbido por todos los poros

permeables al agua. Si se usa el peso específico bruto, se acepta que el asfalto no será absorbido por los poros permeables al agua. Excepto en algunos casos, ninguno de los dos es correcto. El concepto de peso específico efectivo se aproxima más al valor verdadero para la determinación de los vacíos de la mezcla asfáltica compactada. El peso específico bruto puede ser usado, sin embargo, si se considera una tolerancia por asfalto absorbido por el agregado.

Para una combinación de agregados, los porcentajes de componentes del agregado total deberán requerir un ajuste por la diferencia de pesos específicos de cada uno de ellos. Cuando esto es necesario, los pesos específicos brutos son los que usualmente se emplean en los cálculos.

El peso específico de un agregado es el cociente entre el peso de un volumen unitario de material y el peso de igual volumen de agua a una temperatura entre 20° y 25°C (68 y 77°F). Existen tres tipos aceptados de pesos específicos de los agregados, los que dependen de la definición de volumen de la partícula:

Hay tres tipos ampliamente usados de pesos específicos de los áridos:

– **Peso específico aparente (G).**

Es la relación entre el peso de un volumen del material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada a esa temperatura. El volumen incluye los poros impermeables del material (esto es, la materia sólida, incluyendo sus huecos o poros impermeables).

Considera al volumen del agregado como el volumen total excluyendo el volumen de poros o capilares que pueden llenarse de agua en 24 horas de embebimiento.

– **Peso específico masivo del agregado seco (real-efectivo) (Gb)**

Es la relación entre el peso de un volumen del material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada estando el

material en condición de saturado a superficie seca. El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material.

Considera el volumen total del agregado excluyendo al volumen de poros que absorbe el asfalto.

– **Peso específico aparente con agregado saturado (bruto) (Gbs)**

Es la relación entre el peso saturado a superficie seca de un volumen del material a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada.

El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material (incluyendo tanto los huecos permeables como los impermeables propios del material).

Considera el volumen total de las partículas del agregado, incluye los poros que pueden ser llenados con agua en 24 horas de embebimiento.

• **Absorción del Agregado:**

Es el volumen de los vacíos permeables del material expresado en por cientos del peso en el aire del mismo secado en estufa.

Como se ve por estas definiciones, la diferencia entre el peso específico aparente y el peso específico aparente con áridos saturados, indica la proporción de huecos permeables al agua de los áridos. Como el volumen medido para determinar el peso específico aparente con áridos saturados incluye los huecos impermeables, mientras que el volumen para el peso específico aparente excluye los huecos, es evidente que el volumen correspondiente al peso específico aparente es más pequeño que el empleado para el peso específico aparente con áridos saturados, si los áridos tienen huecos permeables. Si no existen tales huecos, ambos volúmenes son iguales.

Como el peso específico es una relación peso-volumen, se deduce que el peso específico aparente es mayor que el peso específico aparente con áridos saturados en áridos que contienen huecos permeables, y que ambos valores son iguales para áridos que no contienen huecos de este tipo. De esta forma, en áridos que contienen huecos permeables, la elección de uno u otro tipo de peso específico puede tener un efecto apreciable sobre la proporción de huecos calculada en una mezcla asfáltica compactada.

El peso específico aparente de los áridos en una mezcla asfáltica depende de la proporción en que el asfalto penetre en los huecos permeables. Como el asfalto es más viscoso que el agua, usualmente penetrará en los huecos menos que el agua. Por ello ha empezado a usarse el término “peso específico efectivo” para indicar la proporción en que el árido es permeable al asfalto empleado en la mezcla.

Como puede verse, el peso específico efectivo estará normalmente comprendido entre el peso específico aparente y el peso específico aparente con áridos saturados.

2.2.5.4 CUBICIDAD DE LAS PARTÍCULAS

La cubicidad es un método que establece el procedimiento para determinar la masa de angularidad (chancado), canto rodado, alargamiento y laminaridad. Consiste en calcular el porcentaje de cada una de estas fracciones presentes en la muestra de agregado.

Este método se aplicará a todos los agregados pétreos que se emplearán en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

- **Angularidad del agregado grueso.**

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75mm, con una o más caras fracturadas.

Para medir la angularidad del agregado grueso, deben contarse las partículas manualmente para determinar las caras fracturadas. Una cara fracturada se define como alguna superficie fracturada que ocupa más del 25% del área del contorno de la partícula del agregado visible en esa orientación.

- **Angularidad del agregado fino.**

Esta propiedad asegura un alto grado de la fricción interna del agregado fino y de la resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados, menores de 2.36mm levemente compactados, contenidos de vacíos mayores significan más caras fracturadas.

- **Alargamiento y laminaridad.**

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y cuando es sometido al tráfico vehicular.

Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado se emplea un calibrador.

2.2.5.5 AFINIDAD CON ES ASFALTO

Este método describe el descubrimiento (separación de la película de asfalto del agregado por la acción del agua) y el procedimiento de inmersión estática a fin de determinar la adherencia del par betunen agregado en presencia de agua.

El descubrimiento puede hacer que un material no sea conveniente para ser usado en mezclas asfálticas de pavimentación.

Si la granulometría del material es cuestionable o no convencedora de su calidad, se lo puede emplear en forma satisfactoria realizando un ajuste mediante la combinación con otros agregados.

2.3 MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL

2.3.1 DEFINICION

Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes o pavimentos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, para el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

La mezcla asfáltica tiene que ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, elevadas temperaturas, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno.

Estas mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor.

Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para obtener una adecuada trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como el asfalto deben ser calentados antes del mezclado, de ahí el término “Mezcla Asfáltica en Caliente”.

Con la finalidad de que el asfalto tenga la suficiente trabajabilidad, existen métodos alternativos de producción de mezclas sin necesidad de calentar los ingredientes, puede ser con emulsiones asfálticas o la alternativa que se plantea en el presente proyecto de investigación.

2.3.2 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

2.3.2.1 PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS

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

$$G_{agreg} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{G_{ag}(a)} + \frac{\%AF(b)}{G_{ag}(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%A(n)}{G(n)}}$$

(Ec. 2.1 Peso específico de los agregados)

Dónde:

G_{agreg} : Peso específico promedio del agregado mineral combinado.

PA : Peso total expresado en porcentaje

$AG(a)$, $AF(b)$, $F(c)$, ... , $A(n)$: Porcentaje de los agregados a, b, c, ..., n

G_{ag} : Pesos específicos brutos de los agregados a, b, c, ..., n

Nota.- La fórmula puede ser válida para el cálculo del agregado usando mezclas tradicionales o de asfaltos espumados puesto que es empleada sólo para determinar el peso específico del agregado.

2.3.2.2 CONTENIDO DE ASFALTO (%)

El contenido efectivo de asfalto de una mezcla para pavimentación es el total, menos la cantidad de asfalto perdida por absorción de los agregados; es esta porción de asfalto efectivo total la que permanece como recubrimiento exterior de las partículas del agregado. El comportamiento de una mezcla depende del contenido efectivo de asfalto.

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión durante la elaboración de la mezcla en planta. El contenido de asfalto de una mezcla en particular se establece usando criterios del método utilizado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran parte, de las características de los agregados, tales como granulometría y capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto, entre más finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor la cantidad de asfalto necesaria para cubrir uniformemente las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más gruesos) exigen menos asfalto puesto que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan el tamiz #200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber literalmente gran parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Las pequeñas dimensiones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda.

Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, durante el proceso de elaboración de la mezcla probablemente la empeore. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá hacer un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de la mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir la absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas en su totalidad con una película adecuada de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que se debe adicionar a la mezcla para producir las cualidades deseadas en ella. El contenido efectivo es la cantidad de asfalto que forma una película delgada sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de la mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosamente cuando se usan nuevos bancos de agregados.

El contenido óptimo de cemento asfáltico se determina a partir del diseño Marshall de una mezcla, en la que se tiene que satisfacer una serie de especificaciones según el tipo de agregado y de cemento asfáltico a utilizar.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica con asfalto espumado también puede ser calculado con el método Marshall, con ligeras diferencias en la metodología de producción de la mezcla.

2.3.2.3 DENSIDAD MAXIMA REAL DE LA MEZCLA (gr/cm³)

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

Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, al fin de tapar todos los poros o vacíos de la mezcla y dejar la muestra al aire 30 minutos antes de pesarla.

La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$Dr \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PB(gr)}{VP(cm^3)}$$

(Ec. 2.2 Densidad Máxima Real de la Mezcla)

Dónde:

Dr: Densidad real de la mezcla (briqueta)

PB: Peso de la briqueta sin parafina

VP: Volumen de la briqueta sin parafina

2.3.2.4 DENSIDAD MAXIMA TEORICA (gr/cm³)

El peso máximo teórico de una mezcla asfáltica compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula de cálculo es la siguiente:

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

(Ec. 2.3 Densidad Máxima Teórica)

Dónde:

Dmt: Densidad máxima teórica

%C.A.: Porcentaje de cemento asfáltico

GCA: Peso específico de cemento asfáltico

G_{agreg}: Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente en kilos por metro cúbico (kg/m³), gramos por centímetro cúbico (gr/cm³), o libras por pie cúbico (lb/ft³). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³) o (62.416 lb/ft³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un

porcentaje de la densidad en el laboratorio (porque en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%)

2.3.2.5 VACIOS DE LA MEZCLA (%)

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen del aire en la muestra compactada. Es importante tomar en cuenta que en una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos o poros existentes entre las partículas del agregado mineral, se llena de asfalto, quedando lleno de aire el resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Como dijimos anteriormente, la mezcla asfáltica compacta deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 y 5% del volumen total de la mezcla.

Por lo tanto, como ya se indicó, los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire o bolsas de aire que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 y 5 % dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

$$Vm(\%) = \frac{Dmt - Dm}{Dmt} * 100$$

(Ec. 2.4 Vacíos de la Mezcla)

Dónde:

V_m: Vacíos de la mezcla compactada

D_{mt}: Densidad máxima teórica

D_{rm}: Densidad real promedio

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

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta es la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos.

2.3.2.6 VACIOS DEL AGREGADO MINERAL V.A.M. (%)

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

Distribución de volúmenes en una mezcla asfáltica

Figura 2.4



(Fuente: Tecnología del asfalto y Prácticas de construcción, Guía para instructores, I.A.)

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

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen de la mezcla compacta que no es ocupado por el agregado. El espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denomina vacíos del agregado mineral VAM. En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, es el VAM. El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del VAM. Por lo tanto, los vacíos del

agregado mineral, son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compacta de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos de la mezcla.

Los valores recomendados para el V.A.M. de acuerdo al tamaño de las partículas se indican en la siguiente tabla.

Valores recomendados para los V.A.M.

Tabla 2.4

Tamices Standard		Tamaño Nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm)	Alternativo	mm	Plg.	
1.18	N° 16	1.18	0.0469	23.5
2.36	N° 8	2.36	0.093	21.0
4.75	N° 4	4.75	0.187	18.0
9.50	3/8	9.50	0.375	16.0
12.50	1/2	12.50	0.5	15.0
19.00	3/4	19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

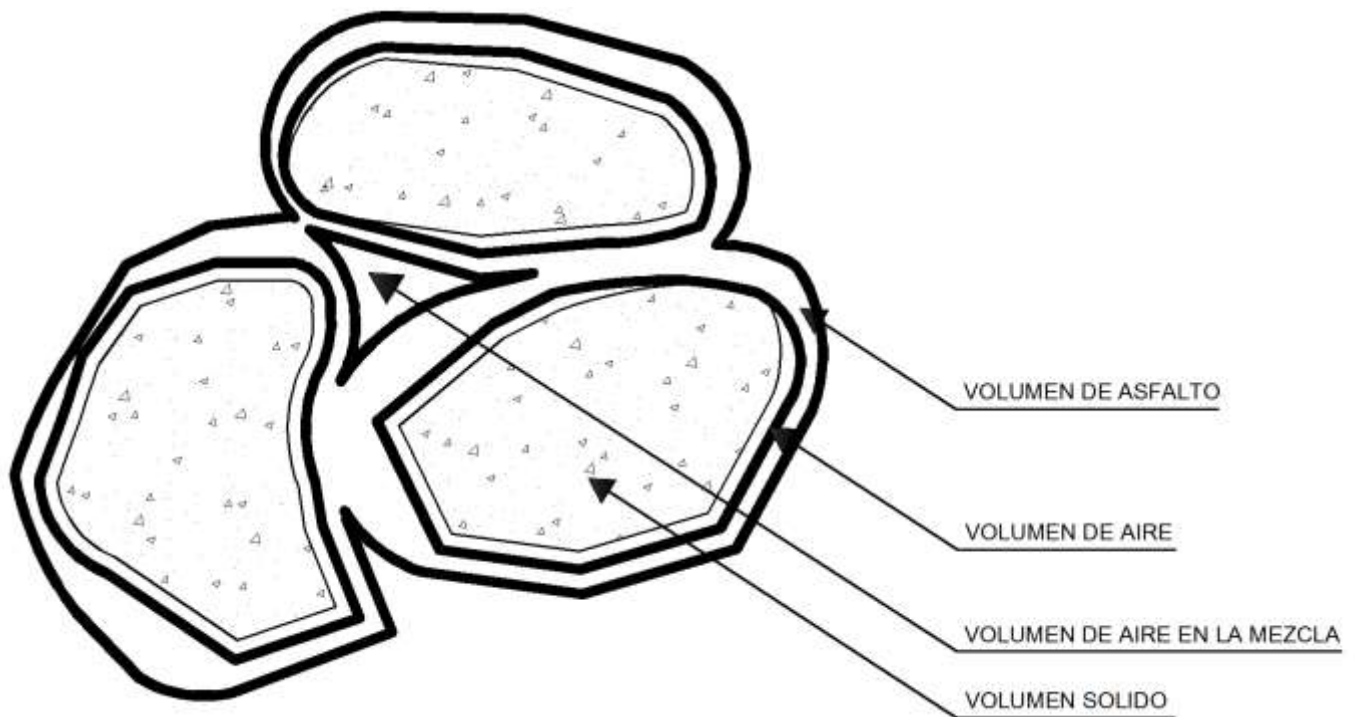
(Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, I.A.)

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM como se detalla en el cuadro anterior los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en contenido de asfalto.

Diagrama de partículas en la mezcla asfáltica

(Figura 2.5



En el esquema gráfico se puede observar que el volumen de vacíos puede ser índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada, para el pasaje del aire o agua es de mucha importancia la interconexión de los vacíos con la superficie.

En casos extremos, cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1% en los vacíos.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$VAM (\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

(Ec. 2.5 Vacíos del Agregado Mineral)

Dónde:

VAM (%): Vacíos del agregado mineral

Vm(%): Vacíos de la mezcla compactada

CA(%): Porcentaje de cemento asfáltico

GCA: Peso específico del cemento asfáltico

D_{rm}: Densidad real promedio

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

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

2.3.2.7 RELACIÓN BETUMEN VACÍOS (%)

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta.

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM) que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

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

(Ec. 2.6 Relación Betumen-Vacíos)

Dónde:

RBV(%): Relación betumen vacíos

VAM(%): Vacíos del agregado mineral

Vm(%): Vacíos de la mezcla compactada

2.3.2.8 ESTABILIDAD DE LA MEZCLA (Lb)

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

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

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

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

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

Generalmente, para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea generalmente, diversos métodos pero para nuestro caso de estudio se usa el método Marshall.

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

2.3.2.9 FLUENCIA DE LA MEZCLA (1/100”)

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

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

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

2.3.2.10 RELACIÓN ESTABILIDAD – FLUENCIA

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

La tendencia a fabricar mezclas muy rígidas, con la falsa idea de que mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, genera, en consecuencia, una ausencia de la flexibilidad típica del pavimento asfáltico, que puede influir en la fisuración prematura de las capas asfálticas sometidas a tráfico pesado.

El problema de especificar independientemente estos parámetros radica en que se suele rechazar mezclas cuando alguno de estos no cumple con los valores establecidos para control, es decir, que se está argumentando que al cumplir con los parámetros de estabilidad y flujo la mezcla es buena, pero antes de llegar a esta conclusión es indispensable verificar la rigidez de la mezcla, como una medida de su carácter deformable o quebradizo (dúctil o frágil). Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleada en la relación

estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas.

Para la elaboración de asfaltos espumados, no se realizó ningún estudio que relacione ambas propiedades mecánicas y de esta manera poder hacer una evaluación de su factibilidad como método de fabricación de asfaltos, que pueda salvar los problemas suscitados durante la fabricación de un asfalto tradicional como es la pérdida de la temperatura de la mezcla antes del proceso de compactación.

Es de considerar que para el método Marshall, las especificaciones establecen un valor mínimo de estabilidad, mas no definen un máximo; en consecuencia es frecuente ver que en muchos casos los diseños de mezclas asfálticas se toman valores extremadamente altos de estabilidad, sin tomar en cuenta que pueden llegar a ser perjudiciales; la estabilidad es un índice de la mezcla que indica rigidez, que al ser puesto en la estructura del pavimento, éste será fácilmente quebradizo bajo las cargas del tránsito y más susceptible a los agentes del intemperismo, degenerándose completamente hasta el punto de perder la capa asfáltica.

2.3.2.11 ADHERENCIA AGREGADOS – CEMENTO ASFÁLTICO

La adherencia es la capacidad de un agregado de retener una película delgada de ligante bituminoso sobre su superficie aun en presencia de agua.

De acuerdo a dicha capacidad, los agregados se clasifican en hidrófilos cuando son más afines al agua que los cementos asfálticos (agregados ácidos) e hidrofílicos cuando no presentan afinidad por el agua (agregados alcalinos).

La afinidad es también una función de la actividad superficial de los agregados, la que esta presentada principalmente por el tipo de carga que tiene la superficie de las partículas que dependen principalmente de los minerales presentes.

Haciendo repaso de la fisicoquímica de los suelos, se puede llegar a una comparación del comportamiento de una mezcla de concreto asfáltico con una arcilla, suelo donde las fuerzas de superficie creadas por las valencias no satisfechas (iones de intercambio) de los minerales ionizados generan cargas

eléctricas que producen fenómenos de atracción y repulsión. En estos materiales, el conjunto formado por la capa de agua absorbida y las sustancias disueltas se denomina complejo de absorción y se puede decir que es lugar geométrico donde se producen todas las reacciones de atracción y repulsión necesarias para generar la resistencia al corte de los suelos arcillosos. En cambio, en el caso de un suelo granular, la mencionada actividad es mucho menor ya que las partículas presentan una superficie específica menor y una masa mucho mayor que las partículas de arcilla.

Resumiendo, se puede decir entonces que, la actividad de un suelo se mide a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar la forma a la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar en forma aproximada la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través de aglutinante para que ésta, en combinación con la fricción interna de las partículas granulares, genere una resistencia al corte adecuado del material artificialmente producido. Esta cohesión dependerá entonces de la capacidad de las partículas de absorber una película de aglutinante que, además de recubrir las partículas y protegerlas del intemperismo, produce un efecto análogo al de la capa de agua absorbida por los suelos arcillosos.

La capacidad de absorber la película de ligante dependerá entonces de la actividad superficial de las partículas de agregado y, principalmente, del tipo de carga disponible. La carga eléctrica debido a las valencias no satisfechas podrá ser positiva o negativa. En el primer caso, las partículas granulares repelerán a las moléculas bipolares de agua produciendo un buen mojado de su superficie por parte del cemento asfáltico (buena afinidad con el cemento asfáltico) y, en el segundo, ocurrirá un fenómeno inverso, es decir, las moléculas bipolares de agua serán atraídas por las partículas de los agregados y la absorción del aglutinante se verá inhibida (mala afinidad con el cemento asfáltico).

Cuando el contenido de sílice en el agregado es superior a 66% se denomina al material como agregado ácido o hidrófilo y será un material con afinidad pobre por el ligante. En cambio, cuando el contenido de sílice es inferior a 55%, se tiene un predominio de cargas positivas y el agregado es de tipo alcalino presentando una buena afinidad con el asfalto.

Si el contenido de sílice varía entre 55 a 66 % el agregado se denomina como agregado intermedio y su comportamiento estará determinado no sólo por su naturaleza sino también por el tipo de cemento asfáltico.

La mayoría de los agregados existentes en la naturaleza son de características ácidas ya que los principales minerales constituyentes son el sílice, el cuarzo y las cuarcitas; es decir, minerales que en presencia de agua absorben una capa de esta al atraer a los dipolos de agua por tener superficie saturada de aniones (iones negativos). Los agregados de naturaleza calcárea son los agregados que mejor adherencia presentan ya que su superficie posee una carga positiva (catiónica).

En consecuencia, se puede decir que en la adherencia de las mezclas asfálticas intervienen fenómenos superficiales entre los agregados y el cemento asfáltico gobernados por la energía generada por las fuerzas en la interface de ambos, donde el factor más importante y decisivo en la adherencia es la naturaleza de los agregados pero, en mayor o menor grado interviene también la naturaleza del cemento asfáltico.

De las características de los iones de intercambio de los agregados base entonces la definición de agregados hidrófilos y agregados hidrófobos son denominados hidrófilos cuando la carga superficial está determinada por iones negativos (aniones) e hidrófobos cuando son cationes los que definen la carga superficial de la piedra (carga positiva). En el primer caso, la afinidad de los agregados será mala y en el segundo buena.

El estudio de la adherencia del agregado con un determinado ligante bituminoso es un tema de creciente importancia en la ingeniería de pavimentos, disciplina que considera que el comportamiento de las mezclas depende, en general, de su correcta dosificación, del empleo de una técnica constructiva adecuada y,

fundamentalmente, de las características físico químicas de ambos componentes (agregado pétreo y cemento asfáltico). En una práctica general al estudiar una mezcla bituminosa ensayar por separado los componentes de la misma sin comprobar dicha mezcla, a pesar de cumplir con los ensayos de rutina, puede tener un comportamiento posterior no satisfactorio debido a una mala adherencia entre ligante y el agregado.

2.3.3 CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Las mezclas asfálticas de granulometría densa y gruesa (cerrada y semi cerrada) deberán cumplir con los siguientes requisitos especificados en la siguiente tabla, de acuerdo a los ensayos del Método Marshall (Fuente: MOP – 001 – F – 2002).

Especificaciones de mezclas asfálticas

Tabla 2.5

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max
CRITERIOS MARSHALL								
# de golpes/cara	75		75		50		50	
Estabilidad (lb)	2200	-	1800	-	1200	-	1000	2400
Flujo (plg/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos de la mezcla								
*Capa de rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
*Capa intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
*Capa base	3	9	3	9	3	9	3	9
% de vacíos en el agregado								
Relación Filler/Betún	75	82	75	82				
% estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente								
*Capa de rodadura	70	-	70	-				
*Intermedio o base	60	-	60	-				

(Fuente: Carreteras calles y Aeropistas, Valle Rodas Raúl)

Para las mezclas asfálticas de granulometría abierta, se deberá cumplir con los mismos requisitos de estabilidad y flujo Marshall establecidos en la tabla anterior.

2.3.4 PROPORCIONAMIENTO Y MEZCLADOS DE LOS ASFALTOS Y AGREGADOS.

La precisión en el proporcionamiento del asfalto y el agregado, como así también el control de la granulometría de este último son vitales en la construcción de un buen pavimento. Un pavimento con mucho asfalto hace que aquél carezca de estabilidad interna y se distorsione bajo el tránsito. Poco asfalto determina que el pavimento se ponga áspero y se desintegre, careciendo además de las cualidades necesarias de impermeabilidad y durabilidad. El propósito del diseño y proporcionamiento, es lograr mejor relación entre el asfalto y el agregado. Eso proporciona una buena y controlada granulometría resultado de una mezcla con adecuada estabilidad y durabilidad.

Se debe recalcar que lo que se busca es una adecuada estabilidad, no la estabilidad máxima. Una estabilidad excesiva generalmente significa algún sacrificio en la durabilidad. Por esta razón, se requieren técnicos competentes para el diseño y control de las mezclas asfálticas.

2.3.5 PREPARACIÓN DEL ASFALTO.

El asfalto para la pavimentación (cemento asfáltico), que a temperatura atmosférica es semisólido y altamente viscoso, debe ser llevado temporariamente a fluido (licuificarlo) para poder manipularlo durante las operaciones de construcción, como el bombeo a través de cañerías, transporte en tanques, distribución a través de picos rociadores y el mezclado con el agregado pétreo.

Cuando las operaciones de construcción del pavimento terminan, el cemento asfáltico vuelve a su condición normal y funciona como agente cementante (o ligante) o impermeabilizante que hace al pavimento estable y durable.

El cemento asfáltico puede ser llevado temporariamente a condición fluida (liquido) durante las operaciones de construcción, de tres maneras:

- **Derritiéndolo.-** Después de las operaciones de construcción, el cemento asfáltico líquido y caliente se enfría y retoma su condición semisólida.
- **Diluyéndolo.-** En solventes de petróleo seleccionados. Este proceso se llama recomposición (*cutting back*). El asfalto obtenido se denomina *asfalto diluido*. Después de la construcción, el solvente se evapora dejando en el lugar el cemento asfáltico. El asfalto diluido ha declinado en su aplicación producto de la escasez del petróleo y las regulaciones ambientales. El asfalto diluido está siendo remplazado actualmente por emulsiones asfálticas, las cuales contienen poco o nada de solvente y pueden ser utilizadas para casi cualquier propósito para el que se quiera utilizar el asfalto diluido.
- **Emulsificado con agua.-** Como el asfalto y el agua ordinariamente no se mezclan puede hacerse que lleguen a esta condición mediante la agitación del asfalto con el agua en un molino coloidal y la adición de una pequeña cantidad de un agente emulsificador o emulsivo. El producto resultante denominado emulsión asfáltica, es fluido y está listo para usarse en las operaciones de construcción. Durante la construcción, el agua y el asfalto se separan, las partículas de asfalto se unen por coalescencia y congelación en una película continua, que cementa las partículas del agregado cuando se evapora. Cuando el agua y el asfalto se separan se dice que la emulsión se rompe o se ha curado.
- **Espumando el asfalto.-** Es la más nueva y reciente manera de darle al asfalto las propiedades necesarias para la mezcla con el agregado, para lo cual se agrega una pequeña cantidad de agua al asfalto en caliente, generando la reacción físico-química que hace del asfalto un material mucho menos viscoso y más fácil de mezclar. Siendo este el objetivo de estudio del presente proyecto.

2.3.6 TIPOS DE ELABORACION DE MEZCLAS ASFALTICAS TRADICIONALES

2.3.6.1 MEZCLA EN PLANTA

Las mezclas asfálticas para pavimentos preparadas en planta central son conocidas como mezclas asfálticas en planta. El concreto asfáltico se considera como una mezcla en planta de máxima calidad. Consiste en un agregado pétreo bien graduado, de alta calidad, mezclado con cemento asfáltico. El asfalto y el árido calentados separadamente entre 120 y 165°C cuidadosamente medidos y proporcionados y luego mezclados hasta que las partículas del agregado son recubiertas con asfalto. La mezcla se hace en la unidad mezcladora de la planta. La mezcla en caliente, tiene que ser conservada así durante su transporte, hasta que llega al lugar de construcción donde la distribuyen en la calzada con una maquina denominada Terminadora Asfáltica. La capa lisa es compactada por rodillos hasta lograr la densidad apropiada, antes de que el asfalto se enfríe.

El concreto asfáltico es una de las varias mezclas hechas en planta. También se preparan otras mezclas, tales como arena-asfalto, mortero asfáltico, y mezclas de agregado grueso que se preparan y distribuyen en forma similar. No obstante, todas ellas tienen un ingrediente común: el cemento asfáltico.

Las mezclas asfálticas que contienen asfaltos diluidos o emulsificados pueden ser preparadas también en plantas mezcladoras centrales. El agregado puede ser parcialmente secado y calentado, o mezclado como se lo extrae de la pila de almacenamiento. Estas mezclas son denominadas usualmente mezclas en frío, aun cuando el agregado utilizado en el proceso de mezclado hubiera sido calentado a temperaturas bastante inferiores a las temperaturas necesarias para la elaboración de mezclas en caliente.

Las mezclas hechas con emulsiones asfálticas y algunos asfaltos diluidos pueden ser distribuidas y compactadas en camino mientras están bastante frías. Tales mezclas se llaman asfálticas para distribución en frío. Se las transporta y distribuye a temperatura templada normal. Para asegurar la evaporación del

agua de la emulsión o de los solventes, estas mezclas, después de haber sido colocadas en el camino, son a veces removidas en caballetes desplazados lateralmente en calzada mediante motoniveladora antes de su distribución final y compactación.

2.3.6.2 MEZCLA EN CAMINO (ROAD MIX)

Las emulsiones asfálticas y muchos asfaltos diluidos (aunque el uso de estos está declinando como consecuencia de su costo) son suficientemente fluidos para ser distribuidos y mezclados con el agregado a temperatura ambiente entre normal y templada. Cuando esto se realiza en el área a ser pavimentada, se denomina construcción tipo mezcla en-sitio. Aunque este sea el término más general y se aplique tanto para la construcción de un camino, área de estacionamiento o pista de aterrizaje de aviones, el término *mezcla en el camino* es empleado generalmente cuando se trata de la construcción de este tipo de obra.

La mezcla en sitio puede ser usada para capas de rodamiento, bases y sub-bases. Cuando se emplea como capas superiores o de rodamiento, por lo común es satisfactoria para tránsitos livianos y de volumen medio más que pesado. Sin embargo, los avances en tecnologías de pavimentación, han desarrollado avances en la elaboración de mezclas asfálticas en camino que cumplen con especificaciones de una planta asfáltica estacionaria. Las ventajas del mezclado en sitio incluyen:

- Utilización de agregados existentes en el lecho del camino o disponibles en yacimientos vecinos, que pueden emplearse sin un procesamiento considerable.
- Eliminación del empleo de una planta mezcladora central. La construcción puede ser ejecutada con una variedad de maquinaria frecuentemente disponible en forma rápida, tal como motoniveladoras, mezcladoras giratorias y plantas mezcladoras ambulooperantes.

2.4 EL ASFALTO ESPUMADO

2.4.1 INTRODUCCION Y ORIGEN

2.4.1.1 INTRODUCCION

El tratamiento de materiales con asfalto espumado es una técnica que utiliza procesos constructivos especializados y de alto rendimiento, que permite para elaborar mezclas capaces de ser empleadas en la construcción de nuevos pavimentos, el reciclado en frío y en la estabilización de suelos.

El tratamiento que se realiza en la cámara mezcladora de la máquina de estabilización utilizada para fabricar capas con asfalto espumado, incluye la expansión del asfalto líquido y el mezclado con el material proveniente del pulverizado del camino viejo, o del agregado disponible para la nueva capa. El asfalto expandido tiene mayor potencial de cobertura que el estado líquido, dado su mayor volumen y produce un recubrimiento en el espesor más completo del material tratado.

Si bien es cierto, el asfalto espumado se ha masificado en los últimos 20 años, su utilización en Bolivia es aún incipiente y su estudio ha sido nulo.

La mezcla íntima que se produce entre asfalto y agregado es diferente, pero sin embargo, este tipo de mezclas tiene un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional. Las mezclas con asfalto espumado presentan ventajas especiales frente a mezclas tradicionales; entre éstas las más importantes son las del tipo constructivas, energéticas y ambientales.

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de técnicas modernas especialmente desarrolladas para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento. El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfálticos reciclados. Las mezclas

con asfalto espumado pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en una planta central.

2.4.1.2 ORIGEN Y DESARROLLO DEL ASFALTO ESPUMADO

El primer investigador en detectar la potencialidad del uso del asfalto espumado en mezclas asfálticas fue el Profesor Ladis Csanyi, en la estación experimental de ingeniería de la Universidad estatal de IOWA en 1956, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Los primeros reportes de aplicaciones de asfalto espumado datan del año 1957 y corresponden a aplicaciones realizadas en una carretera estatal de Iowa (USA). En años posteriores se reportan varias otras aplicaciones, entre otras: Arizona (USA) en 1960 y en Nipawin (Canadá) en 1962.

Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la empresa petrolera Mobil Oil en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención del Profesor Ladis Csanyi y desarrollar la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso.

Desde 1970 la tecnología Mobil Oil de asfalto espumado, ha sido usada en proyectos de estabilización en Australia, Sudáfrica, Inglaterra, Alemania, Francia, Egipto y varios otros países. Simultáneamente, en 1970, Continental Oil Company (CONOCO) obtuvo los derechos de comercialización en USA y desarrolló un laboratorio de asfalto espumado para facilitar el estudio de esta nueva tecnología. Desde entonces ha sido utilizada en varios estados del país del Norte (Colorado, North Dakota, Virginia, Pennsylvania, Michigan, Oklahoma, entre otros).

Luego que en 1991 expiraran los derechos de Mobil, se desarrollaron otros sistemas de espumación entre los cuales destaca el método Escandinavo “Nesotec”, actualmente utilizado en Noruega, Suecia y Finlandia.

2.4.2 OBTENCION DEL ASFALTO ESPUMADO

El asfalto espumado o ligante expandido es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 % y 4% sobre el peso de ligante) al asfalto caliente (140 °C a 180 °C) dentro de una cámara de expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de espuma en el asfalto. 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 (de 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.

2.4.3 CARACTERIZACION DEL ASFALTO ESPUMADO

Se sostiene que espumar el asfalto reduce la viscosidad, aumentando las propiedades adherentes, haciéndolo apto para mezclar con agregados fríos y húmedos. La realidad es que bajo un mismo nivel de temperatura, el bitumen sin espumar posee exactamente la misma viscosidad que uno espumado, ya que sólo es un cambio físico, la diferencia se encuentra al considerar el volumen completo, ya espumado, porque se incluye la cantidad de gas en la estimación de la viscosidad; por lo tanto, se obtiene un sistema bitumen-aire, que realmente es menos viscoso. A este efecto se le suma la mayor área superficial por unidad de masa, derivando en que sea más fácil de dispersar en materiales granulares fríos.

La intensidad y eficiencia del bitumen espumado se puede controlar óptimamente mediante la relación agua/asfalto, teniendo en cuenta condiciones físicas y ambientales, tales como presión y temperatura.

El asfalto espumado es caracterizado principalmente, por medio de dos propiedades:

2.4.3.1 RELACIÓN DE EXPANSIÓN:

Es la medida de la viscosidad de la espuma y determina que tan bien está dispersa la mezcla. Indica la trabajabilidad del asfalto y su capacidad de recubrir los agregados. Se define la relación entre el volumen máximo alcanzado del betún en estado espumado y el volumen del betún sin espumar. Normalmente, la expansión del asfalto es entre 12 y 20 veces el volumen inicial.

2.4.3.2 VIDA MEDIA:

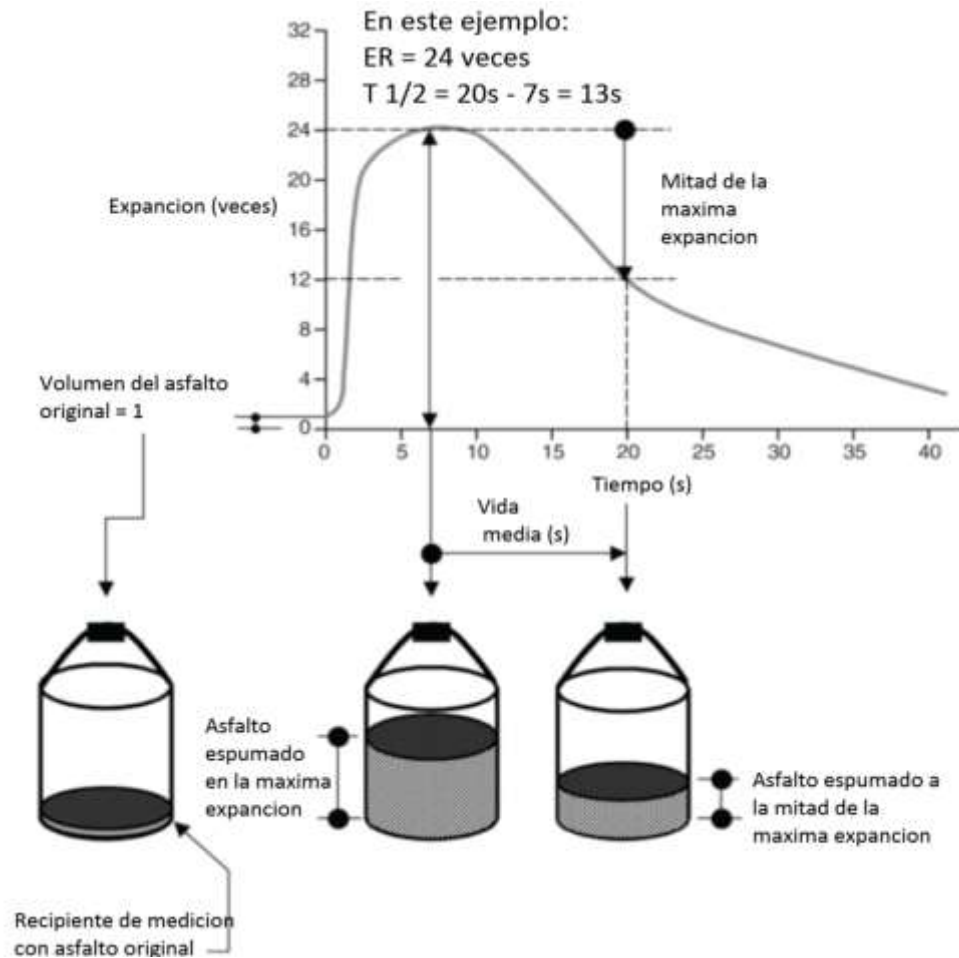
La Vida Media es el tiempo tomado, en segundos, desde el estado espumado hasta llegar a la mitad del máximo volumen obtenido.

A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media; sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media. Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico, para distintas cantidades de agua y temperaturas. En general, no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

El uso de algunos aditivos, por ejemplo, los compuestos por silicona, hacen perder la capacidad de espumacion del asfalto. La presión del asfalto y agua; mayores presiones permiten una mejor “atomización” de las partículas que mejora la uniformidad del asfalto, no es concluyente la influencia de esta propiedad sobre la razón de expansión y la vida media.

Ejemplo de Vida Media Vs. Relación de Expansión

Figura 2.6

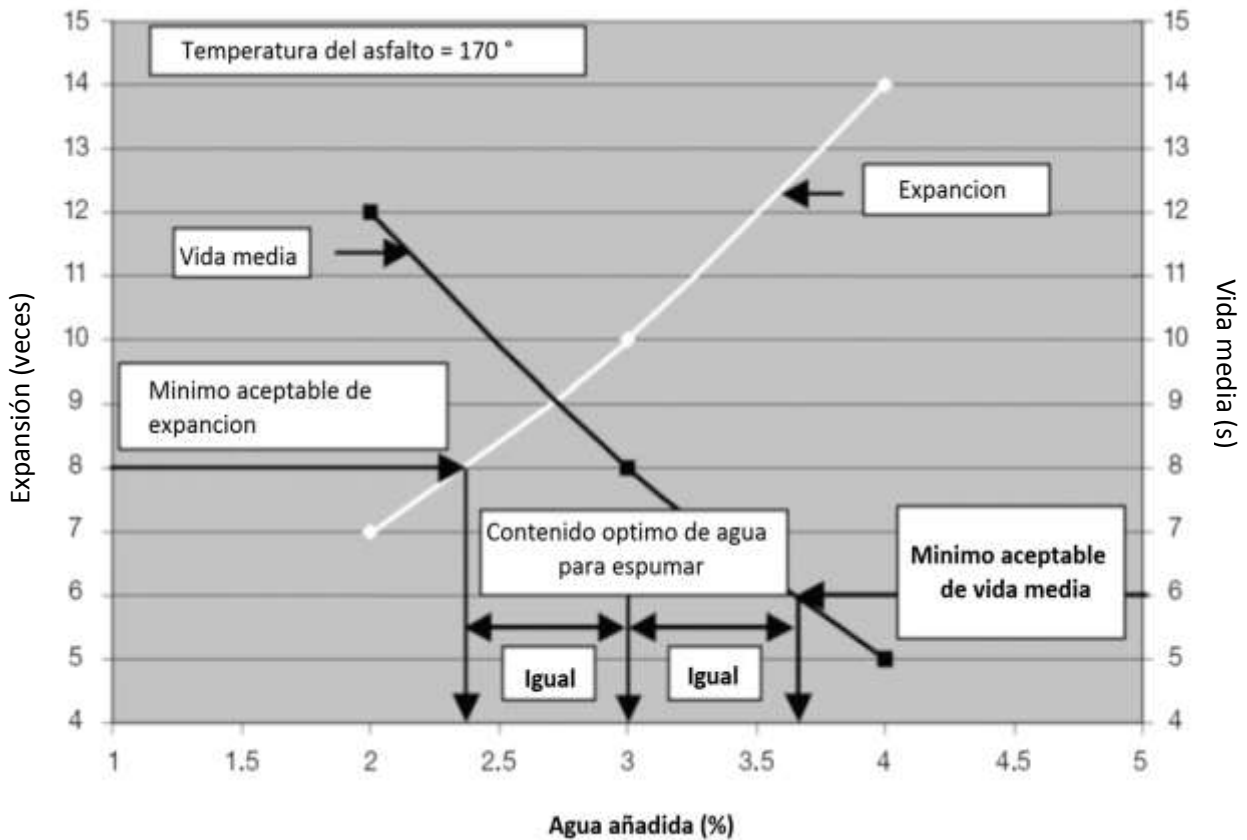


(Fuente: “Boletín Técnico PITRA”)

Como se ve que el contenido de agua 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 2.7.

Características del asfalto espumado en función del agua inyectada

Figura 2.7



(Fuente: “Boletín Técnico PITRA”)

Las características de espumado (Razón de Expansión y Vida Media) no son medidas exactas, sino más bien órdenes de magnitud. En general, se recomienda una Razón de Expansión entre 12 y 20, y al menos 15 segundos de Vida Media. Por otro lado, mediante el empleo de aditivos activos se pueden obtener valores más elevados, tanto de la Razón de Expansión (superiores a 20) como de la Vida Media (superiores a 60 segundos) (Macarrone et al., 1994). Cuando las características de espumado son extremadamente pobres (una Razón de Expansión menor que 5 y una Vida Media bajo los 5 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.

2.4.4 PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS ESPUMADOS

2.4.4.1 PROPIEDADES FISICAS

- **Volumen de Expansión**

Para calcular el volumen de expansión teórico de la espuma de asfalto en laboratorio, se requiere entender cómo se produce el intercambio energético dentro del sistema agua-asfalto-recipientes.

Se puede determinar el volumen de expansión, utilizando la ley universal de gases ($PxV = nxRxT$). Para entender mejor el proceso se presenta el siguiente ejemplo (Jenkins et al., 1999), que representa las condiciones de laboratorio: al descargar una masa de 500 gr de asfalto espumado en un recipiente metálico (de masa 1500 gr) con un 2,5 % de agua (% en peso del asfalto), se obtiene un volumen de 21,2 litros de vapor proveniente del agua inyectada la cual sufre un cambio de fase. Esto, entrega una razón de expansión (razón entre el máximo volumen alcanzado y el volumen sin espumar), de 42,4 para el asfalto, lo cual es 2,5 veces más alto que los valores medidos normalmente bajo condiciones de laboratorio. Las explicaciones para estas diferencias son:

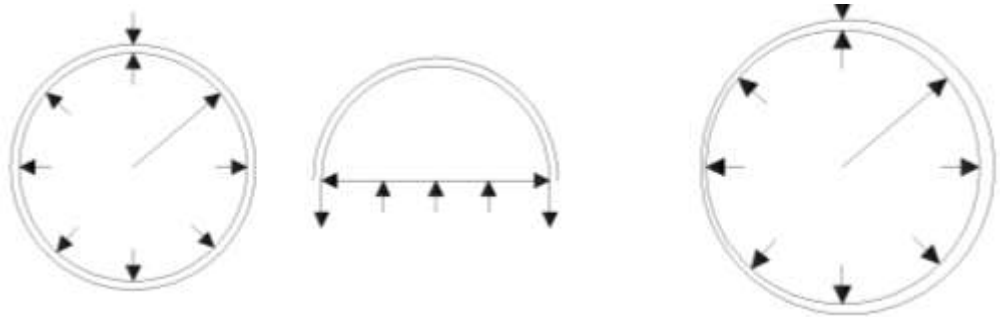
- El vapor de agua no es encapsulado en su totalidad y parte de éste se escapa durante el proceso de espumado del asfalto.
- No toda el agua es utilizada para generar espuma, es decir, pequeñas cantidades de ésta son aisladas por el vapor dentro de las burbujas de asfalto.
- Otros factores dados por las condiciones de borde de la cámara de expansión y del recipiente.
- Debido a que son diversos los factores que determinan la magnitud real de expansión, es que se requiere de varias pruebas de laboratorio para determinar el valor máximo de expansión práctico.

- **Tamaño y Espesor Burbuja de Asfalto**

Para explicar la interacción física entre el vapor y el asfalto, se analiza una burbuja aislada de asfalto espumado.

Dimensiones medidas en una burbuja de asfalto

Figura 2.8



(Fuente: THENOUX Guillermo, JAMET Andrés, “Tecnología del Asfalto Espumado”, Revista de Ingeniería de Construcción, Vol. 17)

Usando la geometría de una esfera, se puede demostrar que los esfuerzos de tracción permanecen constantes a medida que la burbuja se expande (Jenkins, 1999). Sin embargo, existen una serie de factores físicos que limitan la expansión de las burbujas y por ende de la espuma.

Heukelom en 1973, estableció una relación entre la elongación y el módulo de rigidez de los asfaltos con diferentes grados de penetración. Usando esta relación como un indicador de la elongación de la película de asfalto que forma las burbujas, se puede estimar la máxima elongación de la burbuja.

Del monograma de Heukelom y la relación establecida entre el Módulo de Rigidez y elongación, se obtiene una elongación igual a 100 veces el valor del perímetro de la circunferencia. Esto significa que las gotas de agua de 0,1 mm de radio y un perímetro de 0,628 mm, que son encapsuladas en el asfalto, se expandirán hasta 62,8 mm antes de la rotura, es decir, una circunferencia de 10 mm de radio. Esto concuerda con las observaciones realizadas en laboratorio (burbujas de 10 a 15 mm). Basado en estos

cálculos se determina un espesor crítico para la burbuja (espesor antes del quiebre) entre 100 a 150 Micras (Jenkins et al., 1999).

2.4.4.2 PROPIEDADES EMPIRICAS

Las propiedades empíricas más importantes del asfalto espumado que se estudian en la actualidad son: Estabilidad, Razón de Expansión, Vida Media e Índice de Espumación.

- **Estabilidad del Asfalto Espumado**

La estabilidad del asfalto espumado se determina por medio del estudio del tiempo que requiere la espuma para colapsar. Dichos estudios son realizados en laboratorio. El quiebre en pruebas de laboratorio ocurre cuando uno de los dos siguientes efectos ocurre primero:

- Reducción en la temperatura del vapor debido al contacto de la película de asfalto con el aire (o el recipiente), que se encuentra a menor temperatura. Las burbujas más grandes, aunque posean teóricamente la misma tensión superficial que sus contrapartes más pequeñas, tienen una mayor área superficial expuesta y por lo tanto experimentarán una mayor disminución de la temperatura lo que las hará colapsar primero (Jenkins et al., 1999).
- Superación del límite de elongación de la película de asfalto. Cuando la presión de vapor al interior de la burbuja es demasiado grande, la película de asfalto se expandirá más allá de su límite de elongación, resultando en su quiebre antes de lograr el equilibrio (Jenkins et al., 1999).

- **Razón de Expansión**

La Razón de Expansión como se mencionó anteriormente está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar.

- **Vida Media**

Esta propiedad de espumación del asfalto, descrita anteriormente, puede ser susceptible a diversos factores, entre estos:

- En laboratorio, uno de los parámetros que afectan las propiedades de espumación es el tamaño del recipiente donde estas propiedades son medidas (Ruckel et al., 1982).
- Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la mayoría de los asfaltos mejoran con temperaturas más altas. Espumas aceptables se consiguen con temperaturas sobre 149 ° C (Abel, 1978).
- Cantidad de agua agregada al asfalto: Generalmente la Relación de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua agregada, mientras la Vida Media decrece.
- Presión bajo la cual el asfalto es inyectado en la cámara de expansión. Bajas presiones (menores a 3 bar) afectan negativamente tanto a la Relación de Expansión como a la Vida Media.
- Uso de agentes anti-espumantes, tales como compuestos de silicona, en el asfalto virgen (Abel, 1978).
- Viscosidad del asfalto: En cuanto a la viscosidad del asfalto, los resultados obtenidos en varios estudios no permiten relacionar de forma concluyente esta característica con las variaciones en la Razón de Expansión y Vida Media.

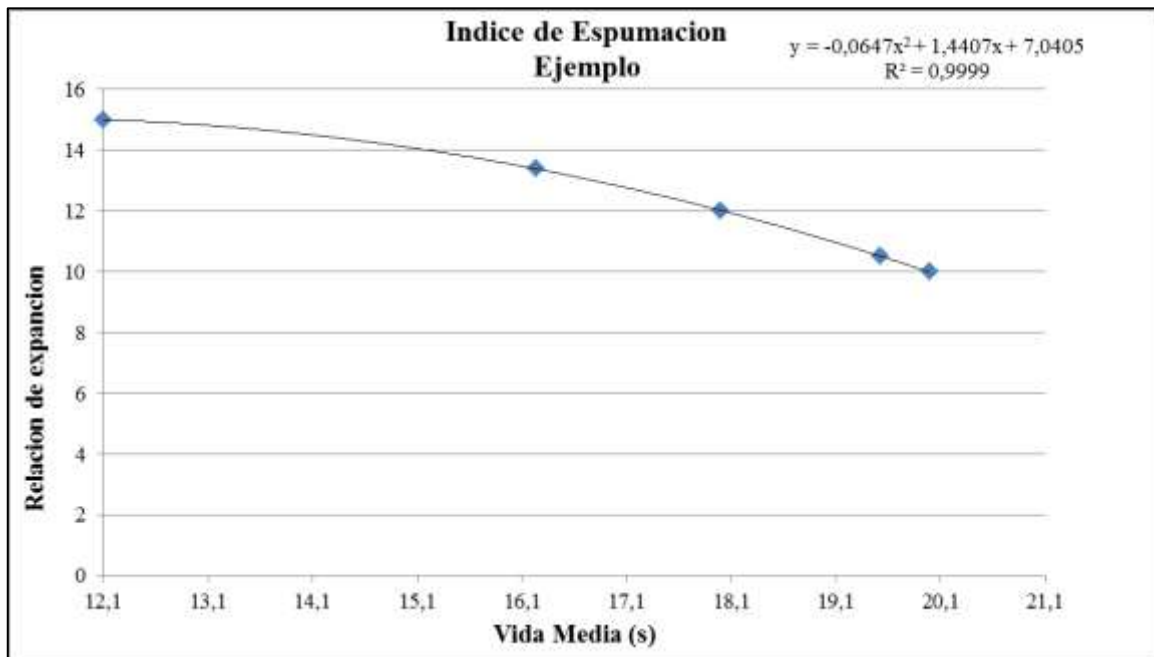
- **Índice de Espumación**

En la actualidad, el asfalto espumado se caracteriza mediante sus propiedades empíricas (Razón de Expansión y Vida Media). Estudios actuales demuestran que estos dos parámetros y la manera en la cual ellos son generalmente determinados no son suficientes para una adecuada caracterización del asfalto espumado (Jenkins et al., 1999). Ninguno de estos dos parámetros permite establecer la habilidad de la burbuja para ser mezclada con el agregado mineral.

El Índice de Espumación se define como el área bajo la curva de la Razón de Expansión y Tiempo de Colapso (Jenkins et al., 1999). La curva que se obtiene de esta gráfica que corresponde a la curva de colapso, la cual es un indicador del tiempo disponible para el mezclado. El área A formada por la intersección de la curva, el eje de las ordenadas y la recta correspondiente a una razón de expansión 4.0 se conoce como Índice de Espumación. La Razón de Expansión 4.0 es considerada como la mínima para obtener mezclas con propiedades consideradas como aceptables (Shell Bitumen, 1990). Este índice no es utilizado en la actualidad en los métodos de diseño de mezclas.

Ejemplo de índice de espumacion

Figura 2.9



2.4.4.3 PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga.

Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad; sin embargo existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad, al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad.

Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30 ° C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en caliente equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente).

Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros: Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga:

- **Tracción Indirecta**

Para un buen comportamiento en terreno las mezclas deben tener como mínimo una resistencia a la tracción indirecta de 100 kpa, para probetas de laboratorio ensayadas bajo condiciones de saturación y un mínimo de 200 kpa en condición seca.

- **Módulo Resiliente**

Del mismo modo que todos los materiales viscoelásticos, el Módulo Resiliente de las mezclas con asfalto espumado dependen del tiempo de carga, del nivel de esfuerzo y la temperatura. Los valores medios que alcanzan mezclas correctamente dosificadas, pueden ser comparados con

aquellos obtenidos en materiales tratados con cemento, pero con la ventaja de la mayor flexibilidad y mayor resistencia a la fatiga.

– Resistencia a la Fatiga

Las características de resistencia a la fatiga de las mezclas con asfalto espumado son similares a aquellas obtenidas en mezclas asfálticas en caliente (Maccarrone et al., 1993).

Como una aproximación para el diseño estructural de las capas estabilizadas, se presenta en la Tabla 6 algunos valores propuestos por WIRTGEN S.A. para las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado (Wirtgen GMBH, 1998).

Rango de valores de diseño estructural sugerido por WRITGEN

Tabla 2.6

Material	% Asfalto	Tracción Indirecta (Kpa)	Módulo Resiliente (Mpa)
RAP / Chancado (50/50)	1.5 – 3	350 – 800	2500 - 5000
Chancado	2.5 - 4	400 – 900	3000 - 6000
Grava Rodada	3 – 4.5	250 – 500	2000 - 4000

2.4.5 VENTAJAS DEL ASFALTO ESPUMADO

Esta técnica presenta las siguientes ventajas frente a la utilización del asfalto tradicional:

- Como estabilizante puede utilizarse junto con una gran variedad de tipos de agregados.
- Aumenta la resistencia a cortante 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 comparado 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.
- 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.
- Y, principalmente, la conservación de energía; sólo se necesita calentar el asfalto antes de ser espumado, los agregados se pueden mezclar en frío y húmedos (no requieren de secado). comparados con los métodos tradicionales de mezcla asfáltica en caliente. En un tramo de prueba de un proyecto realizado en Hartford Kent (UK), se estudió la eficiencia energética de dos alternativas de reconstrucción señaladas en la tabla 2.7:

Alternativas de reconstrucción

Tabla 2.7

Alternativa de reconstrucción	Estructura de pavimento
Método tradicional	Sub-base granular Base asfáltica Capa de rodado
Asfalto espumado	Base reciclada con asfalto espumado (tecnología en sitio) Capa de rodado (tecnología en sitio)

(Fuente: <http://www.wirtgen.de/de/>, WIRTGEN GMBH)

Ambas estructuras de pavimento son equivalentes estructuralmente. Un resumen de los resultados de esta prueba se presenta en la siguiente tabla. El consumo de energía para la aplicación con asfalto espumado en esta experiencia fue sólo un 12% de la requerida por los métodos tradicionales (Akeroyd y Hicks, 1988).

Eficiencia energética

Tabla 2.8

Reconstrucción con Métodos Tradicionales	
Excavación, carga y transporte de material (21" de espesor)	126
Proceso, transporte y colocación de subbase (13")	74
Proceso, transporte y colocación de base asfáltica (8")	283
TOTAL	483*13² (Joule/m²)
Reconstrucción con asfalto espumado	
Fresado del material existente en terreno	29
Carga y transporte de material desde empréstito	20
Estabilización y compactación del material existente	8
TOTAL	57*10⁶(joule/m₂)

(Fuente: <http://asphalt.csir.co.za/FArefs/Akeroyd%20&%20Hicks.pdf>,

AKEROYD y HICKS)

Comparativamente, es evidente que existe una gran diferencia entre la energía empleada en un asfalto tradicional y el asfalto espumado.

Las ventajas antes mencionadas son resultado de investigaciones de los autores Akeroyd y Hicks, en 1988.

2.4.6 CONSIDERACIONES BASICAS DE DISEÑO DE LA MEZCLA

En esta sección se presenta un resumen de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de una mezcla con asfalto espumado. Estos son:

2.4.6.1 ELECCIÓN DEL GRADO DEL 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).

2.4.6.2 TEMPERATURA DEL ASFALTO Y PORCENTAJE DE AGUA DE INYECCIÓN

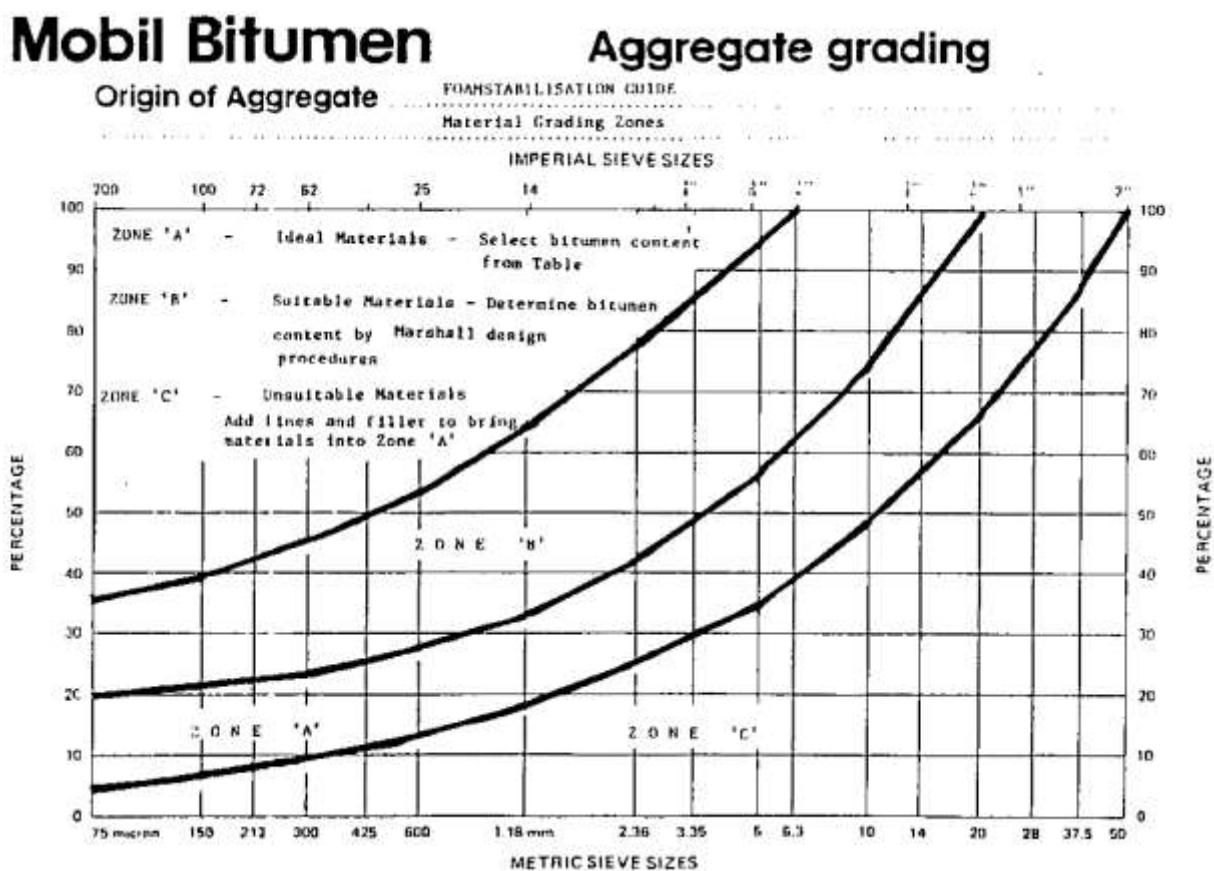
La temperatura del asfalto y el porcentaje de agua a inyectar se determinan en función de la Razón de Expansión y Vida Media. El porcentaje de agua de inyección es independiente del agua empleada para la compactación de la mezcla.

2.4.6.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Las investigaciones realizadas, muestran que una gran variedad de agregados pueden ser mezclados con asfalto espumado. Esta variedad incluye áridos chancados, arena arcillosa, RAP y otros materiales tales como escorias. Sin embargo, algunos tipos de materiales (principalmente el RAP) requieren ser mezclados con cemento o cal, para incrementar su contenido de finos y mejorar las propiedades de la mezcla. En la Figura 10 se indica la clasificación de materiales granulares empleados para estabilización de suelos con asfalto espumado, realizada por Akeroyd y Hicks en 1988, para Mobil Oil.

Clasificación de materiales granulares para su uso con A.E.

Figura 2.10



(Fuente: <http://asphalt.csir.co.za/FArefs/Akeroyd%20&%20Hicks.pdf>)

Si el material se encuentra en la Zona A de esta clasificación (como es el caso de la investigación), es apropiado para ser empleado en carreteras con tráfico pesado. Los materiales de la Zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas. Los materiales de la Zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos. El contenido de finos del agregado, es un parámetro de gran importancia y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al., 1982). La relación entre el contenido de finos y asfalto es crítica, ya que un exceso de asfalto en el mortero generará un incremento en la lubricación lo que resultará

en una pérdida de resistencia y estabilidad. Las mezclas con altos porcentajes de finos poseen valores elevados de tracción indirecta.

En general, las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado son influenciadas por la trabazón de los agregados más que por la viscosidad del asfalto, lo cual difiere de las mezclas asfálticas en caliente.

2.4.6.4 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

En las mezclas con asfalto espumado, el contenido óptimo de asfalto no puede ser determinado con la precisión de las mezclas asfálticas en caliente; sin embargo, una buena aproximación a este valor puede ser obtenida mediante la optimización de sus propiedades mecánicas.

Otra de las aproximaciones al contenido óptimo de asfalto es el uso de la relación asfalto - material fino, debido al importante rol que ésta juega en las propiedades mecánicas de las mezclas. En la Tabla 2.9 se presenta una serie de valores que pueden ser usados como guía para seleccionar el contenido óptimo de asfalto en función del contenido de finos (Csir Transportek, 1999). Otra propuesta abarca un contenido de asfalto de 3,5 % para 5% de finos hasta un contenido de asfalto de 5% para 20% de finos; sin embargo, esta propuesta no es válida para todos los tipos de materiales debido a las distintas características de absorción de cada uno de ellos.

Guía de valores para el contenido óptimo de asfalto

Tabla 2.9

% Pasa Tamiz 4.75 mm	% Pasa Tamiz 0.075 mm	% Asfalto Espumado
< 50 (gravas)	3 – 5	3
	5 – 7.5	3.5
	7.5 – 10	4
	>10	4.5
>50 (arenas)	3 – 5	3
	5 – 7.5	3.5
	7.5 – 10	4
	>	4.5

(Fuente: http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/28ThenouxAsfaltoEspumado.pdf.

, THENOUX Y JANET)

2.4.6.5 CONDICIONES DE TEMPERATURA DE LOS AGREGADOS

Distintos investigadores han reconocido la influencia de la temperatura de los áridos en el comportamiento de las mezclas con asfalto espumado. Los esfuerzos se han orientado a determinar la mínima temperatura a la cual los áridos deben encontrarse para evitar una baja dispersión del asfalto en la mezcla. Se determinó que al calentar los áridos se logra incrementar la dispersión del asfalto en la mezcla lo que se traduce en un mejor cubrimiento de los agregados más gruesos; sin embargo, los principios que dominan este proceso no han sido explicados en su totalidad.

La temperatura óptima de mezclado para los agregados se encuentra entre los 13 y los 23°C dependiendo del tipo de agregado, ya que para temperaturas fuera de este rango resultan mezclas de mala calidad (Bowering y Martin, 1976). Las temperaturas empleadas en investigaciones generalmente no superan los 60° C.

2.4.7 MEZCLAS Y MATERIALES TRATADOS CON ASFALTO ESPUMADO

2.4.7.1 MEZCLAS

Una diferencia marcada entre las mezclas producidas con asfalto espumado y las mezclas con asfalto caliente, o mezclas usando emulsiones asfálticas, es la manera cómo el asfalto se dispersa a través del agregado. En todos los últimos casos, el asfalto tiende a cubrir todas las partículas, mientras que en las mezclas de asfalto espumado las partículas largas no son cubiertas totalmente. El asfalto espumado se dispersa a sí mismo entre las partículas finas, formando un mortero, el cual se adhiere de manera efectiva manteniendo unida la mezcla.

Este revestimiento parcial es el responsable del pequeño cambio de color de los agregados tratados con asfalto espumado. Materiales similares mezclados con un asfalto caliente, o en frío con emulsiones bituminosas, tienden a ser más oscuros o aún más negros. Si un agregado claro es usado, el producto tratado con la espuma tenderá a permanecer de color ligeramente más claro.

Una espuma con una alta relación de expansión y una alta vida media, se dispersará de una manera adecuada en el material pétreo, mejorándose el cubrimiento de los agregados por el asfalto y, por lo tanto, las propiedades de la mezcla.

Son limitadas las referencias disponibles, sobre las magnitudes más apropiadas de la relación de expansión y la vida media, para la elaboración de las mezclas de asfalto espumado con materiales pétreos. Sin embargo, parece existir consenso que con relaciones de expansión mayores a 10 se logra una adecuada dispersión de asfalto en el agregado mineral.

Ruckel (1983) recomienda valores superiores a 8 ó 15 de relación de expansión y como mínimo de 20 segundos para la vida media. Maccarrone y otros (1995), sugieren que con el uso de ciertos tipos de agentes de superficie activa, es posible fabricar asfaltos espumados con relaciones de expansión superiores a 15 y vidas medias mayores a 60 segundos. De acuerdo con la experiencia

sudafricana, vidas medias de alrededor de 10 segundos han resultado apropiadas, teniendo expansiones superiores a 10, en diferentes aplicaciones realizadas en la obra.

2.4.7.2 AGREGADOS

En la tabla 10 a continuación se muestra una clasificación de materiales, agrupados por tipo de suelo, de acuerdo con su conveniencia para ser tratados con asfalto espumado, desarrollada por Bowering y Martin. Esta clasificación se logró a partir del análisis de los resultados de ensayos realizados sobre un total de 50 materiales.

**Clasificación de suelos y conveniencia para el tratado con asfalto
espumado**

Tabla 2.10

USC	Conveniencia para el tratamiento	Rangos de Contenidos de asfalto		Cohesión	Factores de equivalencia de capa	Comentarios
		Total	Optimo			
GW	Buena	1.5 - 5.0	2.0 – 2.5	300-700	1.21 – 1.50	Mezclas permeables
GW-GM	Buena	1.5 - 5.5	2.0 – 4.5	300-400	1.25 – 1.33	Mezclas permeables
GP-GC	Buena	1.5 - 4.0	2.5 – 3.0	300-400	1.25 – 1.33	Baja permeabilidad
GC	Pobre	4.0 - 6.0	4.0 – 6.0	300-400	1.25 – 1.33	Impermeable Contenido de asfalto crítico Puede usarse añadiendo bajo % de cal
SW	Regular	3.5 - 5.0	4.0 – 5.0	100		Requiere adición de finos – pasa No. 200
SW-SM	Buena	1.0 - 6.0	2.5 – 4.0	100-400	1.0 – 1.33	
SP-SM	Pobre	4.85 - 6.0+	3.0 – 4.5	100		Requiere asfaltos de baja penetración y adición de finos
SP	Regular	1.0 - 6.0	2.5 – 5.0	100-300	1.0 – 1.25	Posiblemente requiera adición de finos
SM	Buena	1.5 - 6.0	2.5 – 4.5	100-400	1.0 – 1.33	
SM-SC	Buena	2.5 - 6.0	4.0	400-700	1.33 – 1.50	
SC	Sola - Pobre	3.5 - 6.0+	4.0 – 6.0	400-700	1.33 – 1.50	Requiere la adición de un pequeño % de cal
	Con cal - Buena	-	3.0 – 4.0		1.33 – 1.50	

Observando estos resultados, parece ser que los materiales que resultan adecuados para ser tratados con asfalto espumado se extienden desde arenas arcillosas de baja plasticidad, hasta gravas y piedras trituradas.

2.4.7.3 CONDICIONES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

Tanto los trabajos originales de estabilización de suelos con asfalto espumado, desarrollados por el profesor Csanyi a quien se le atribuye el origen de la tecnología, como diversos estudios realizados en Australia y otros lugares, han mostrado la necesidad de agregar agua al suelo o al agregado antes de adicionarle el asfalto espumado.

El profesor Csanyi realizó la siguiente observación:

“El agua añadida al agregado, durante el proceso de mezcla, ablanda los materiales arcillosos o las fracciones duras, rompe las aglomeraciones y se distribuye uniformemente en la mezcla. El agua, además, separa las partículas finas y las suspende en un medio líquido, creando canales de humedad a través de los cuales el asfalto espumado puede penetrar y cubrir todas las partículas minerales. La cantidad de agua no es crítica, procede a agregar la suficiente para que la mezcla se haga satisfactoriamente. El exceso de agua es indeseable, porque hace que la mezcla se reblandezca demasiado y se reduce la cobertura de los agregados. La cantidad de agua de la mezcla debe determinarse haciendo ensayos de prueba y error en algunas cochadas de material.”

El contenido de humedad durante el proceso de mezclado y compactación es considerado por muchos investigadores como el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado. La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et al., 1982)

Una insuficiente cantidad de agua resultará en una inadecuada dispersión del asfalto, mientras que un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla. El contenido óptimo de humedad varía, dependiendo de las propiedades de la mezcla que se requieren optimizar (resistencia, densidad, etc.).

Investigaciones realizadas por Mobil Oil, sugieren que el contenido óptimo de humedad, es aquel que maximiza la pérdida de volumen (70% - 80% de la humedad óptima AASHTO de los agregados). Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado (Bowering, 1970)

En general, el contenido óptimo de humedad para el proceso de mezclado debe ser aproximadamente un 10 a 20 % mayor que la humedad de compactación, debido a la pérdida que tiene lugar entre ambos procesos (Sakr y Manke, 1985).

– Condiciones de curado

Las mezclas con asfalto espumado no desarrollan la totalidad de su resistencia hasta que un gran porcentaje de su humedad se pierde después del proceso de compactación. Este proceso se denomina curado y mediante él, la mezcla obtiene gradualmente resistencia en el tiempo, a medida que disminuye el contenido de humedad. Sin embargo, existe evidencia experimental que demuestra que la pérdida de humedad no es un pre-requisito para la obtención de resistencia de las mezclas con asfalto espumado.

Aun considerando las discrepancias presentadas, el procedimiento de diseño de mezclas en laboratorio debe simular las condiciones del proceso de curado en terreno, con la finalidad de correlacionar las propiedades de la mezcla en laboratorio con terreno. Debido a que el proceso de curado en terreno se desarrolla durante varios meses, la simulación de estas condiciones de terreno se realiza mediante un proceso acelerado de curado. Existen varios procesos de curado acelerado entre los cuales destacan:

- Periodo de tres días a una temperatura de 60° C (Bowering, 1970), que representa el estado conseguido en terreno después de un año de servicio (Macarrone et al., 1995)
- Secado en horno a masa constante a una temperatura de 40° C.

Para algunos autores el contenido óptimo de fluidos para la compactación, tal como el usado para mezclas como emulsiones asfálticas, resulta valido para las mezclas con asfalto espumado; en este concepto, se considera la acción lubricante del ligante y del agua, de manera que el contenido de porción en que se incremente la cantidad de ligante.

Sark y Manke (1985) desarrollaron la ecuación mediante la cual es posible calcular el contenido de la humedad requerido para alcanzar la máxima densidad, después de la compactación de mezclas elaboradas con asfalto espumado. Como sugiere esta ecuación, con un mayor contenido de ligante se requerirá un menor contenido de humedad de compactación.

$$CHMD = 8.92 + 1.48CHO - 0.4PF - 0.39CA$$

(Ec. 2.7 Contenido óptimo de humedad de compactación)

Dónde:

CHMD: Contenido de humedad para la máxima densidad

CHO: Contenido de humedad óptimo

PF: Porcentaje de finos

CA: Contenido de cemento asfáltico

De acuerdo con la expresión anterior, el contenido óptimo de humedad para mezclado resulta ser aproximadamente 10 a 20% mayor que el contenido de humedad requerido para la compactación (*CHMD*). Con el objeto de reducir el consumo de tiempo en el secado de material, después de mezclado, para alcanzar la humedad de compactación y debido a que no se presentan diferencias significativas en las propiedades de las mezclas, Sark y Manke sugieren que el valor *CHMD* sea usado tanto para la mezcla como para la compactación.

En síntesis, las mezclas con asfalto espumado requieren un contenido definido de humedad de los agregados para romper los terrones y alcanzar una buena dispersión del asfalto durante el proceso de mezclado, colaborando de esta manera con su compactación y, por tanto, con la estabilidad de la mezcla.

Este contenido de humedad varía según el tipo de material y, en especial, con el contenido de la fracción inferior a 0.075mm; pero, en general, se encuentra entre el 65% y el 85% del contenido óptimo determinado en una prueba AASHTO T99. Resulta importante mencionar que la adición del agua a la mezcla, posterior a la inyección del asfalto espumado, no tiene efectos benéficos.

2.4.8 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE LA MEZCLA

El procedimiento de diseño de la mezcla requiere el uso de una pequeña planta de laboratorio para producir el asfalto espumado. Es importante que este equipo simule cuidadosamente el asfalto espumado que será producido durante la producción a gran escala.

La planta de laboratorio de asfalto espumado consiste, esencialmente, en una caldera para calentar el asfalto, y dos sistemas de bombeo calibrados, uno para el asfalto caliente y otro usado para el agua en la producción de la 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 arriba mencionadas.

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 la vida media de un asfalto espumado pueden ser variadas por la alteración de las proporciones de agua que se adicionan al asfalto, o por la adición de aditivos químicos.

En el diseño de 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 la 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 del etéreo 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 130°C a 180°C, presiones de aire entre 1 y 5 bares (1bar = 14.5psi) y concentraciones de agua desde 1% al 4% usando incrementos del 0.5%. En caso particular del desarrollo de la investigación, el asfalto usado tiene una temperatura máxima de calentamiento de 165°C recomendada por el fabricante.

Una vez la relación agua-asfalto ha sido determinada, un volumen predeterminado de asfalto espumado se descarga directamente sobre una muestra de agregado mientras está siendo agitado y homogéneamente mezclado. Normalmente se producen 4 muestras de esta manera, con variaciones en el contenido de asfalto. Antes de la adición de asfalto espumado, el material es llevado a su óptimo contenido de humedad. Si hay necesidad de cal, esta se adiciona en este estado.

Briquetas tipo Marshall se elaboran de cada una de las muestras aplicando 75 golpes por cara. En algunos países como Australia, el compactador giratorio es usado en lugar del martillo Marshall. Las briquetas son curadas en sus moldes durante 24 horas a temperatura ambiente. Luego son extraídas de los moldes y curadas en un horno por 72 horas, a temperatura de 60°C.

El contenido óptimo de aglutinante está basado en el volumen y en el diseño de las curvas de estabilidad Marshall, como en las mezclas con asfalto caliente.

2.4.9 CONDICIONES DE CURADO

Otro aspecto relevante a ser tenido en cuenta en la tecnología de los asfaltos espumados, es el curado de las mezclas y el efecto de las condiciones del mismo, sobre las propiedades mecánicas del material tratado.

El curado es el proceso mediante el cual la mezcla del agregado con asfalto espumado gana gradualmente resistencia con el tiempo, mientras se presenta la reducción en el contenido de humedad. La temperatura del curado, su duración y por lo tanto las condiciones de humedad, afectan severamente la resistencia de las mezclas con asfalto espumado.

De manera similar a lo que sucede con las mezclas en frío, elaboradas con emulsiones asfálticas, las mezclas con asfalto espumado desarrollan su resistencia con el tiempo, aunque se requiere un periodo relativamente menor para alcanzar su resistencia final.

Ruckel y otros investigadores proponen los procedimientos de curado que se muestran en la tabla, con objeto de reproducir en laboratorio las condiciones de humedad y así mismo de resistencia obtenida de material tratado en obra, a diferentes edades: corto, mediano y largo plazo.

En un gran número de trabajos e investigaciones se ha adoptado el procedimiento de curado de las mezclas propuesto por Bowering (1970), consiste en el secado de las muestras en horno a 60°C durante 3 días. Algunos autores consideran que esta temperatura, por el hecho de ser superior a la temperatura correspondiente a la del punto de ablandamiento del cemento asfáltico, puede generar cambios en su dispersión y un posible envejecimiento del mismo.

Tiempo de curado de mezclas asfálticas tratadas con asfalto espumado

Tabla 2.11

Procedimientos propuestos para el curado de las mezclas			
Termino	Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo
Duración en laboratorio	24 horas	48 horas	96 horas
Condiciones de curado	Dentro de los moldes	24 h dentro de los moldes y 24 h fuera de los moldes	24 h dentro de los moldes y 72 h fuera de los moldes
Temperatura	Ambiente	40° C	40°C
Similitud con la obra			
- Duración después de extendida la capa	1 día	7 a 14 días	30 días
- Condición climática	Seca	Seca	Seca

(Fuente: A.A London & Partners. Consulting Engineers. South Africa.

Rehabilitation of distressed Pavements. Recommended Pavement. Procedures for Deep Recycling 1996)

2.4.10 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO CON ASFALTO ESPUMADO

Esta técnica permite la construcción eficiente de capas de rodadura y de base ligadas de forma bituminosa, mediante el procesamiento y tratamiento con maquinaria especializada, que puede cumplir con las funciones de recicladora de carpetas deterioradas o de pavimentadora de nuevas capas.

Para la elaboración de un pavimento nuevo:

- Se esparce una capa del material granular no ligado que cumpla con las especificaciones para el diseño de la mezcla.

- Una cisterna pasa esparciendo agua sobre el material, y una motoniveladora, por detrás mezclando el material para que se humedezca homogéneamente, cual si se trataría de la preparación de una capa base.
- Siguiendo en la fila, la pavimentadora autopropulsada, que tiene unas aspas rotatorias agitan el material en el interior de una cámara de expansión, mientras el asfalto espumado es rociado en su interior y mezclado homogéneamente. La pavimentadora es calibrada electrónicamente mediante computadora, para expulsar la cantidad de diseño de asfalto, según la velocidad de desplazamiento y espesor de la capa de pavimento.
- El material humedecido queda detrás de la pavimentadora a medida que esta avanza, para su compactación y perfilado con la maquinaria tradicional.

2.4.11 ALTERNATIVAS Y COSTOS DE PAVIMENTADORAS

Por su práctico tamaño, versatilidad de funciones, tanto como para pavimentar nuevas superficies como para el reciclado de pavimentos viejos, la recicladora *WIRTGEN WR 2500 S* es una excelente alternativa al uso de una planta de elaboración de mezclas asfálticas tradicionales. Con un costo de 4026400 (cuatro millones veintiséis mil cuatrocientos) Bolivianos, frente a los 7000000 (siete millones) de Bolivianos de la planta de preparación de mezclas asfálticas tradicionales ubicada en “La Pintada”, más el costo de instalación de 4000000 (cuatro millones) de Bolivianos, el equipo de asfalto espumado es una alternativa atractiva considerando la eficiencia en los trabajos de pavimentación, frente a los de una planta tradicional. A continuación se presentan las características técnicas del equipo *WR 2500 S*:

Especificaciones del equipo WR 2500 S - Tabla 2.12

Anchura de trabajo	2438 mm
Profundidad de trabajo	0 – 500 mm
Potencia de motor	500 Kw / 670.51 Hp
Peso de servicio	32000 Kg
Accionamiento del tambor de fresado	mecánico
Número de ruedas	4
Accionamiento de traslación	Hidráulico en todas las ruedas

La recicladora cuenta además con las siguientes características:

- **Rendimiento y rentabilidad.-** Gracias a su enorme potencia, dispone de energía suficiente para realizar múltiples tareas, desde la estabilización de suelos, elaboración de mezclas con asfalto espumado, hasta el reciclado en frío. La instalación de inyección dispone de unos microprocesadores que controlan la dosificación de agua, emulsión, suspensión de cemento y asfalto espumado en función de las respectivas exigencias.
- **Seguridad para el trabajo.-** Faros montados en los cuatro lados de la máquina para iluminación perfecta, iluminación interior en la cabina.
- **Sistemas de nivelación para trabajos perfectos.-** A objeto de conseguir resultados perfectos, la WR 2500 S cuenta con sistemas de nivelación automáticos, palpadores de transductor de giro, sensores de inclinación, palpadores laser, entre otros.

Entre otras características cuenta con:

- **Tracción en las cuatro ruedas.**

Wirtgen WR 2500 S, tracción en las 4 ruedas

Figura 2.11



- **Dirección versátil**

Wirtgen WR 2500 S, Dirección versátil

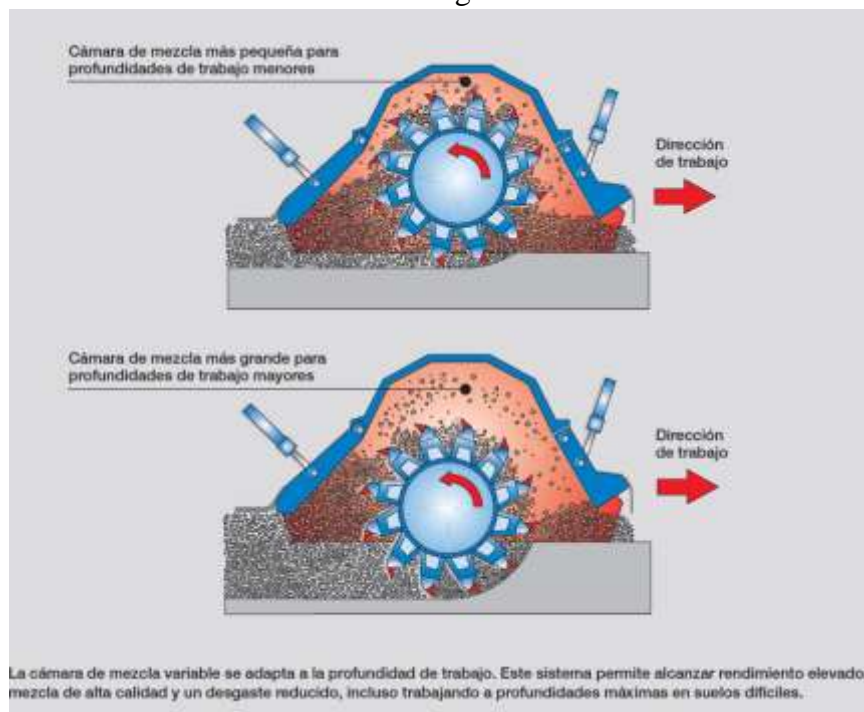
Figura 2.12



- **Calidad Homogénea en toda profundidad**

Wirtgen WR 2500 S, Mezclado homogéneo de material

Figura 2.13



(Fuente de las imágenes: http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/p_wr2500s_s.pdf)

2.4.12 LA ECONOMIA Y EFICIENCIA DEL ASFALTO ESPUMADO

El proceso del asfalto espumado ha demostrado ser una manera favorablemente económica de mezclar el asfalto con los agregados. No hay costo por el calentamiento del agregado, el cual es significativo en el costo de producción del asfalto. No hay ningún costo de manufactura, lo cual hace que la emulsión asfáltica relativamente costosa y además la eficiencia en los trabajos de pavimentación es mucho mayor. El proceso de asfalto espumado emplea solamente asfalto de un grado de penetración constante, y agua. (MONTEJO FONSECA Alfonso, “Ingeniería de Pavimentos”)

2.5 DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFALTICAS.

2.5.1 ANTECEDENTES

El concepto del método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi.

El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

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

2.5.2 PROPOSITO

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

El método Marshall, como se presenta en esta sección, sólo se aplica a mezclas asfálticas de pavimentación que usan cemento asfáltico con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 (1 pulgada) o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas de pavimentación.

2.5.3 DESCRIPCION

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T245 (o ASTM D 1559).

- **Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

Como es conocido, diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente seleccionar el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

- **Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la “receta” para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

- **Preparación del agregado**

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

Con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto, se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecúe al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (Grava de 3/4, Grava de 3/8 y Arena Natural).

Como indica el nombre del método, se tantea con diferentes porcentajes de agregado, hasta que se encuentre una combinación que se adecúe de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que se tiene que elaborar briquetas con un peso de 1200 g; se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total de la briqueta.

Conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briqueta por la diferencia en peso entre el total de la briqueta y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que aporta cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado, por contenido de asfalto, para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall, y se separa cada uno en bolsas o platos correctamente identificados.

Es importante mencionar que para la elaboración del método tradicional de mezcla asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco; para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material en horno a 110°C durante 24 horas.

Para la aplicación de este método al diseño de una mezcla con asfalto espumado, no es necesario el secado previo del agregado, ya que el método permite adicionar al asfalto el agregado húmedo y frío. Salvo esta acepción, el método sigue los mismos pasos hasta el final.

- **Preparación de las muestras (briquetas) de ensayo.**

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la comparación, donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, m 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes, realmente, recibe un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación, las briquetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.5.4 PROCEDIMIENTO RESUMIDO DEL ENSAYO MARSHALL

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

- **Determinación del peso específico total.**

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

peso específico total se determina usando el procedimiento en la norma AASHTO T 166.

- **Ensayo de Estabilidad y Fluencia.**

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la consistencia a la deformación de la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- 1) Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60° (140°F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- 2) La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un aparato que aplica carga constante sobre la briqueta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia)
- 3) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- 4) La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

- **Valor de Estabilidad Marshall**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una briqueta cede o falla totalmente. La figura 11 muestra una mordaza en la que están acoplados dos medidores, uno del desplazamiento o fluencia, y otro de la carga aplicada sobre la briqueta (estabilidad). Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, el cabezal superior se acerca al cabezal inferior lentamente, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador. Luego se suspende la aplicación de la carga una vez que la briqueta falla después de haber registrado la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de la Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto es mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material, es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

Mordaza con medidores de estabilidad

Figura 2.14



- **Valor de fluencia Marshall.**

La fluencia Marshall medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La figura 12 muestra un medidor típico de fluencia para medir la deformación que ocurre durante el ensayo Marshall. La

deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad Marshall son considerados demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo cargas del tránsito.

Medidor típico de fluencia

Figura 2.15



- **Análisis de Densidad y Vacíos.**

Una vez se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de briquetas de prueba.

El propósito del análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

- **Análisis de Vacíos.**

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

- **Análisis de Peso Unitario.**

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 kg/m^3 (64 lb/pie^3).

- **Análisis de VAM.**

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada. Incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VAM es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

- **Análisis de VLLA**

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

2.5.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL

- **Gráficos de los resultados.**

Los técnicos de laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficas, para poder entender las características particulares de cada briqueta usada en la serie. Mediante el estudio de las gráficas, ellos pueden determinar cuál briqueta de la serie cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento determinado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta briqueta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Usualmente se representan gráficas de los porcentajes de vacíos, de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral, los porcentajes de vacíos llenos de asfalto, los pesos unitarios, los valores de estabilidad Marshall y los valores de Fluencia Marshall.

- **Relaciones y observaciones de los ensayos.**

Cuando los resultados de los ensayos se traza gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas; estas tendencias son simplemente sugerencias y parámetros de una mezcla tradicional que no tienen como finalidad definir los resultados de un ensayo aleatorio.

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para el peso unitario (densidad) de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.

- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto.

- **Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto.**

El contenido óptimo de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de los resultados descritos anteriormente. Primero, se determina el contenido de asfalto para el cual los vacíos de la mezcla son el 3% del volumen total. Luego, evalúe todas las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto, y compárelas con los criterios de diseño. Si se cumplen con todos los criterios, este es el contenido de diseño de asfalto, si no se cumplen todos los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla.

- **Verificación de los criterios de diseño.**

Usando los datos anteriores, podemos seleccionar una muestra cuyo contenido de vacíos este dentro de los parámetros de diseño, correspondiente a esto, se tendrá un contenido específico de asfalto para la mezcla, parámetro principal por el cual se clasificará. Los valores de las otras propiedades de la mezcla son luego revisados para garantizar que cumplen todos los criterios de diseño Marshall.

- **Selección de un Diseño de Mezcla.**

El diseño de mezclas seleccionado para ser usado en un pavimento es, generalmente, aquel que cumple, de la manera más económica, con todos los criterios establecidos. Sin embargo, no se deberá diseñar una mezcla para optimizar una propiedad en particular. Por ejemplo, las mezclas con valores muy altos de estabilidad son, con frecuencia, poco deseables, debido a que los pavimentos que contienen este tipo de mezclas tienden a ser menos durables y pueden agrietarse prematuramente bajo volúmenes grandes de tránsito. Cualquier variación en los criterios de diseño deberá ser permitida sólo bajo circunstancias poco usuales, a no ser que el comportamiento en servicio de una mezcla en particular indique que dicha mezcla alternativa es satisfactoria.

CAPITULO III

CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA, Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS CON ASFALTO ESPUMANDO Y TRADICIONAL.

1.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACION DEL CEMENTO ASFALTICO.

Por condiciones de disponibilidad, y familiaridad con los equipos necesarios para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfaltico, se realizaron en el SEDECA los ensayos de: *Viscosidad Saybolt Furol*, *Punto de Inflamación* y *Penetración*. Con la finalidad de complementar el Proyecto de Grado, se realizó un ensayo más de *Destilación del Cemento Asfaltico* para encontrar el *Contenido De Agua* en el asfalto en instalaciones del Laboratorio de Suelos y Asfaltos de la UAJMS.

1.1.1 VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

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

- Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140 °C.
- Paralelamente, se calentó el cemento asfaltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que un vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). El calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.
- Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.

- Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboste, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo (± 0.05 °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.
- Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor.
- Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Resultados Viscosidad Saybolt Furol

Tabla 3.1

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-72	seg	148.0	130.0	139.0	85	-----

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

1.1.2 PUNTO DE INFLAMACION

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

- Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y se apagó el ventilador para eliminar corrientes de aire.
- Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.

- Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse. Hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la tasa de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

Se anotaron los siguientes resultados:

Resultados punto de inflamación

Tabla 3.2

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T - 48	°C	237	240	238.5	232	-----

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

1.1.3 PENETRACION

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

- Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes. Se cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100 °C al punto de ablandamiento, también con el objeto que colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.
- Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperada. Se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.
- Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20 y 30 °C durante un periodo aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.
- Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 °C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.
- Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración se limpió con gasolina y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.

- La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la cara superior del asfalto.
- Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

Resultados ensayo de penetración

Tabla 3.3

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25 °C, 100g, 5 seg. AASHTO T49	Lectura 1	mm	89	89	-----	-----	-----
	Lectura 2	mm	89	90	-----	-----	-----
	Lectura 3	mm	91	93	-----	-----	-----
	Promedio	mm	89.7	90.7	90.2	85	100

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

1.1.4 DESTILACION Y CONTENIDO DE AGUA DEL ASFALTO

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

- Se pesó una muestra total de 200 gr. de asfalto, descontando el alambique metálico, la tapa, tapones y termómetro.
- Como se utilizó un alambique metálico, fue necesario colocar un aro de cartón grueso, humedecido en aceite, entre la base del alambique y la tapa, con la finalidad de sellar cualquier filtración.

- Se montó el alambique metálico en su posición, con el mechero anular alrededor del mismo.
- Se hizo circular agua fría a través de la camisa de refrigeración y se inició con el proceso de destilación.
- Se calentó el alambique en su parte central inicialmente, haciéndola descender progresivamente a medida que el asfalto alcanzó la temperatura de 260°C.
- Cuando se alcanzó la temperatura de ensayo, se la mantuvo constante por 15 minutos.
- Como consecuencia de no obtener una destilación aparente, es decir, no se obtuvo una gota de agua producto de la destilación del cemento asfáltico, fue que se determinó el contenido de agua haciendo diferencia entre los pesos inicial y final.
- Para esto, inmediatamente después de suspendida la aplicación de calor, se desconectó el alambique y se pesó con todos sus accesorios, como parte del procedimiento; es necesario agregar al peso final después del ensayo 1.5 gr para compensar la flotación del alambique caliente.

Se reportan los siguientes resultados:

Destilación del Asfalto

Tabla 3.4

Ensayo	Peso Total Inicial (gr)	Peso Total Final (gr)	% Agua	Especificaciones Máximo (%)
Destilación del Asfalto 260°C AASHTO T55	2526.07	2525.70	0.014	<0.02

1.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS.

Para la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se recurrió en primera instancia al Laboratorio de Suelos y Asfaltos de la UAJMS para realizar los ensayos de *Granulometría*, y *Peso Específico*. Con la finalidad de complementar los ensayos de caracterización para determinar las aptitudes del agregado para la elaboración de mezclas asfálticas, se recurrió al

Laboratorio de Suelos y Materiales del SEDECA donde se realizaron los ensayos de *Caras Fracturadas, Desgaste de Los Ángeles y Equivalente de Arena* los resultados se presentan a continuación:

1.2.1 GRANULOMETRIA

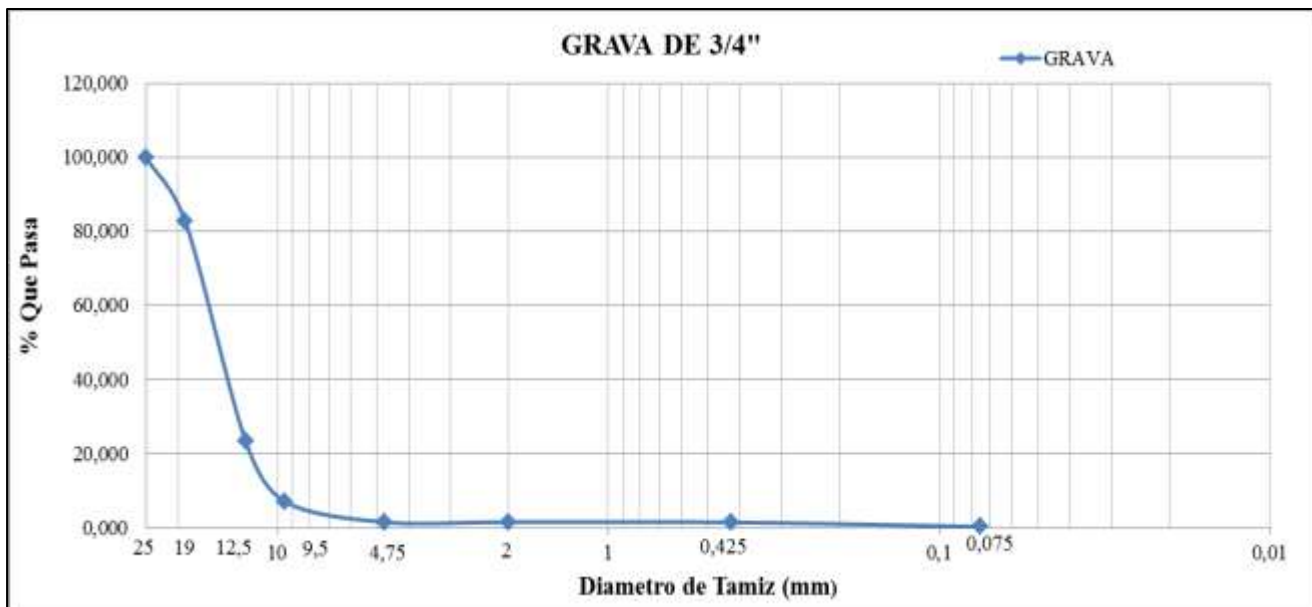
Resumen granulométrico - Grava de 3/4"

Tabla 3.5

Granulometría									
Nº	Origen	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
1	Santa Ana	100	81,651	24,521	7,984	1,239	1,583	1,397	0,417
2	Santa Ana	100	83,31	24,101	7,604	1,458	1,601	1,492	0,301
3	Santa Ana	100	83,031	21,83	5,816	1,969	1,444	1,576	0,227
Resumen de datos									
Número de Datos		3	3	3	3	3	3	3	3
Promedio		100,0	82,7	23,5	7,1	1,6	1,5	1,5	0,3
Dato Máximo		100,0	83,3	24,5	8,0	2,0	1,6	1,6	0,4
Dato Mínimo		100,0	81,7	21,8	5,8	1,2	1,4	1,4	0,2
Desviación Estándar		0,0	0,9	1,4	1,2	0,4	0,1	0,1	0,1

Curva granulometrica – Grava de 3/4"

Figura 3.1



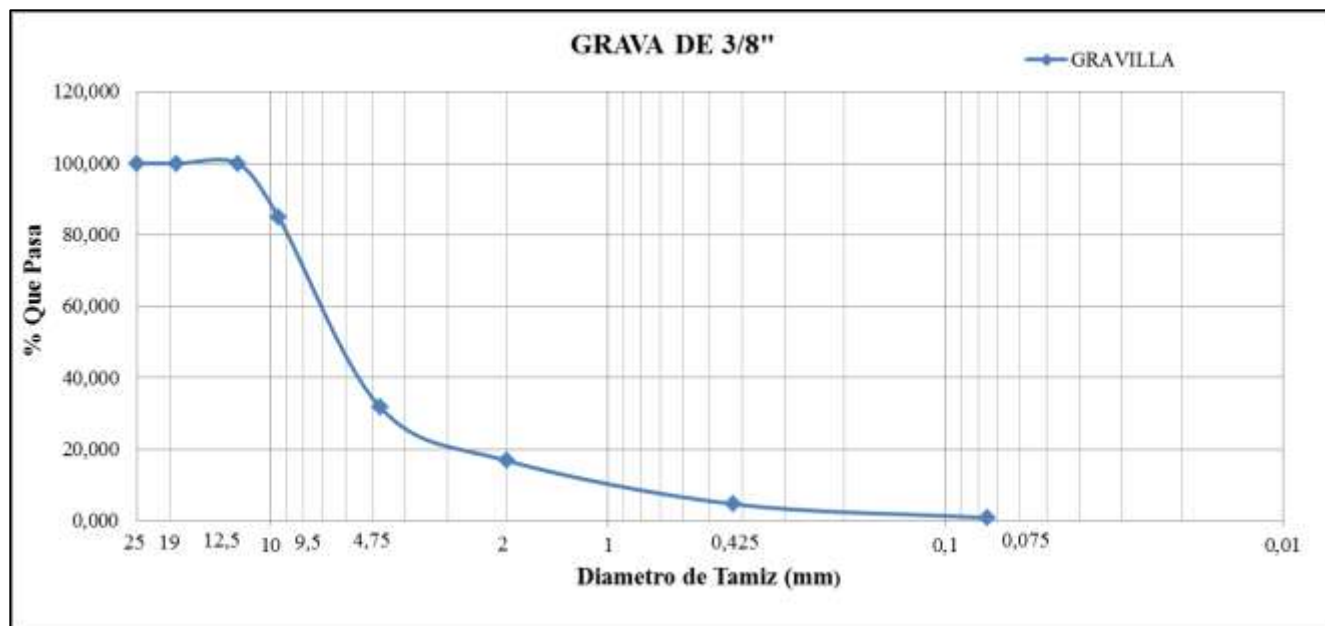
Resumen granulométrico - Grava de 3/8"

Tabla 3.5

Granulometría									
Nº	Origen	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
1	Santa Ana	100	100	100	84,907	31,418	17,012	4,253	0,75
2	Santa Ana	100	100	100	85,103	32,024	16,873	4,5	0,268
3	Santa Ana	100	100	100	85,205	32,076	16,598	5,248	1,432
Resumen de Datos									
Número de Datos		3	3	3	3	3	3	3	3
Promedio		100,0	100,0	100,0	85,1	31,8	16,8	4,7	0,8
Dato Máximo		100,0	100,0	100,0	85,2	32,1	17,0	5,2	1,4
Dato Mínimo		100,0	100,0	100,0	84,9	31,4	16,6	4,3	0,3
Desviación Estándar		0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,2	0,5	0,6

Curva granulométrica – Grava de 3/8"

Figura 3.2



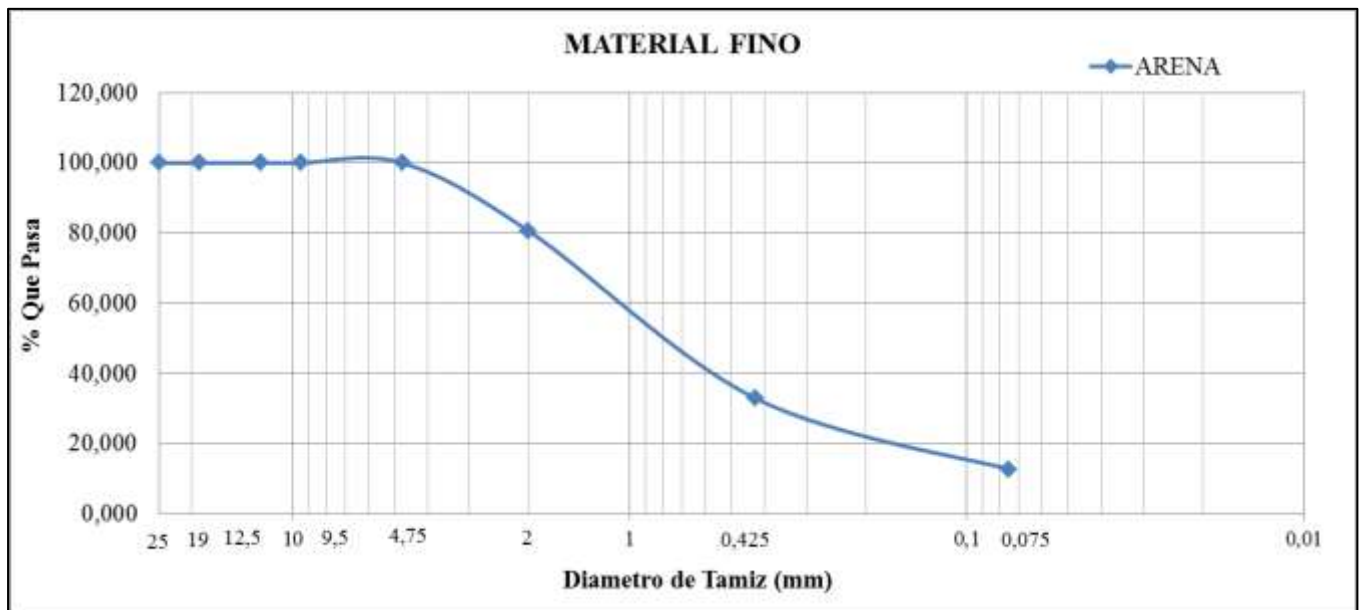
Resumen Granulométrico - Material Fino (Arena)

Tabla 3.7

Granulometría									
N°	Origen	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200
1	Santa Ana	100	100	100	100	100	81,302	32,0	12,687
2	Santa Ana	100	100	100	100	100	80,483	32,432	12,487
3	Santa Ana	100	100	100	100	100	79,977	34,265	12,911
RESUMEN DE DATOS									
Número de Datos		3	3	3	3	3	3	3	3
Promedio		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,6	32,9	12,7
Dato Máximo		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	81,3	34,3	12,9
Dato Mínimo		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,0	32,0	12,5
Desviación Estándar		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,2	0,2

Curva granulometrica – material fino (Arena)

Figura 3.3



1.2.2 PESO ESPECIFICO

Peso específico de la grava de 3/4"

Tabla 3.8

MATERIAL	CARACTERISTICA	PESO ESPECIFICO	OBSERVACIONES
Grava de 3/4"	Peso Específico Bruto Seco (PEBS)	2,57	
	Peso Específico Aparente (PEA)	2,67	Material pesado, denso y bueno para trabajar
	Peso Esp. Bruto Sat. Sup. Seca (PEBSSS)	2,61	
	% de Absorción (%D)	1,44	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

Peso específico de la grava de 3/8"

Tabla 3.9

MATERIAL	CARACTERISTICA	PESO ESPECIFICO	OBSERVACIONES
Grava de 3/8"	Peso Específico Bruto Seco (PEBS)	3,01	
	Peso Específico Aparente (PEA)	3,27	Material bastante pesado, denso y bueno para trabajar
	Peso Esp. Bruto Sat. Sup. Seca (PEBSSS)	3,09	
	% de Absorción (%D)	2,64	Baja absorción (<4) refleja baja porosidad y gran densidad

Peso específico del material fino (Arena)

Tabla 3.10

MATERIAL	CARACTERISTICA	PESO ESPECIFICO	OBSERVACIONES
Material Fino Arena	Peso específico seco	2,35	
	Peso Específico Sat. Sup Seca	2,41	
	Peso Específico Aparente	2,50	
	% de Absorción (%)	2,59	

1.2.3 CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

Contenido de humedad natural de los agregados

Tabla 3.11

CARACTERISTICA	MATERIAL			TOTAL
	Grava	Gravilla	Arena	
Peso de la bandeja (grs.)	349,50	405,400	236,400	
Peso de la muestra humedad + bandeja (grs.)	10818,900	10539,600	6593,300	
Peso de la muestra seca + bandeja (grs.)	10738,200	10301,900	6202,300	
Peso de la muestra seca (grs.)	10388,700	9896,500	5965,900	
Peso del agua (grs.)	80,700	237,700	391,000	
Contenido de humedad (%)	0,777	2,402	6,554	3.738

1.2.4 CARAS FRACTURADAS

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

Para el agregado de 3/4”:

- Se tamizó el agregado y se trabajó utilizando un tamaño máximo de partícula de 3/4”.
- Se lavó el material para apreciar mejor las caras fracturadas del material.

- Se secó el material para pesar la totalidad de la muestra.
- Se separó el agregado que tiene caras fracturadas del canto rodado y se pesaron los materiales separados, los resultados obtenidos son los siguientes:

Caras fracturadas material de 3/4"

Tabla 3.12

ENSAYO DE CARAS FRATURADAS				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de caras Sanas (gr)	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	855	145	85.5	>75

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas

Para el agregado de 3/4":

Se repitió el mismo procedimiento para el agregado de 3/4" y se obtuvieron los siguientes resultados:

Caras fracturadas, material de 3/8"

Tabla 3.13

ENSAYO DE CARAS FRATURADAS				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de caras Sanas (gr)	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	808	192	80.8	>75

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas

1.2.5 DESGASTE DE LOS ANGELES

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

Para el material de 3/4"

- Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo "B". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo.
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/2" y pasante el de 3/4".
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/8" y pasante el de 1/2".
- Introducir el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.
- Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Desgaste de Los Ángeles, material de 3/4"

Tabla 3.14

ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES						
Retenido 1/2 (gr)	Retenido 3/8 (gr)	Total (gr)	Retenido #12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones
2500	2500	5000	3453	1547	30.94	<40

El resultado es satisfactorio, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas.

Para el material de 3/4”:

- Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo “C”. En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/4” y pasante el de 3/4”.
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz #4 y pasante el de 1/2”.
- Introducir el material combinado dentro del tambor con 8 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.
- Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

Desgaste de Los Ángeles, material de 3/8”

Tabla 3.15

ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES						
Retenido 1/4 (gr)	Retenido #4 (gr)	Total (gr)	Retenido #12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones
2500	2500	5000	3513	1487	29.74	<40

El resultado es satisfactorio, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas.

1.2.6 EQUIVALENTE DE ARENA

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

- Se tamizó el material, separando las partículas que quedan retenidas en el tamiz #4 y trabajando solamente con el material pasante.
- En una probeta, se vierte 4 pulgadas de solución (Cloruro de calcio combinado con agua destilada).
- Se virtió una tara con una cantidad determinada de arena (aproximadamente 350 gr) tamizada en el #4.

- Se dejó reposar 5 minutos, y posteriormente se agitó vigorosamente durante 30 segundos, con la finalidad de que las partículas de arcilla sean suspendidas completamente en la solución.
- Se agregó solución hasta completar las 15 pulgadas, haciendo que toda la arena pegada en las paredes y el corcho de goma, caigan hasta el fondo; se dejó reposar durante 20 minutos.
- Después de observar una evidente separación entre el material fino y la arena, se leyeron los resultados en la escala graduada de la probeta en pulgadas y se repitió el mismo procedimiento 3 veces.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Equivalente de arena

Tabla 3.15

Ensayo	Lecturas			Prom.	Esp.
	1	2	3		
Lectura nivel superior	6.8	6.5	6	49.3	>45
Lectura nivel inferior	3.2	3.2	3.1		
% de arena	47.06	49.23	51.67		

Los resultados son satisfactorios, y el material es apto para el uso en mezclas asfálticas según las especificaciones.

1.3 RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

- Se estableció un volumen inicial de asfalto de 50cm³.
- Se calculó el peso de ese volumen de asfalto.
- Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones entre 2 y 4%, con incrementos de 0.5%.
- Para la elaboración del ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150 y 160°C.

- Se calentó una muestra de asfalto a la temperatura más baja, a la que se inyectó el primer porcentaje de agua en ml, se registró el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto. Posteriormente, con una nueva muestra de asfalto, se repitió el procedimiento y se inyectó porcentaje de agua.
- El mismo procedimiento se repitió para las 5 cantidades de agua correspondientes a las 3 temperaturas escogidas para la realización del ensayo.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

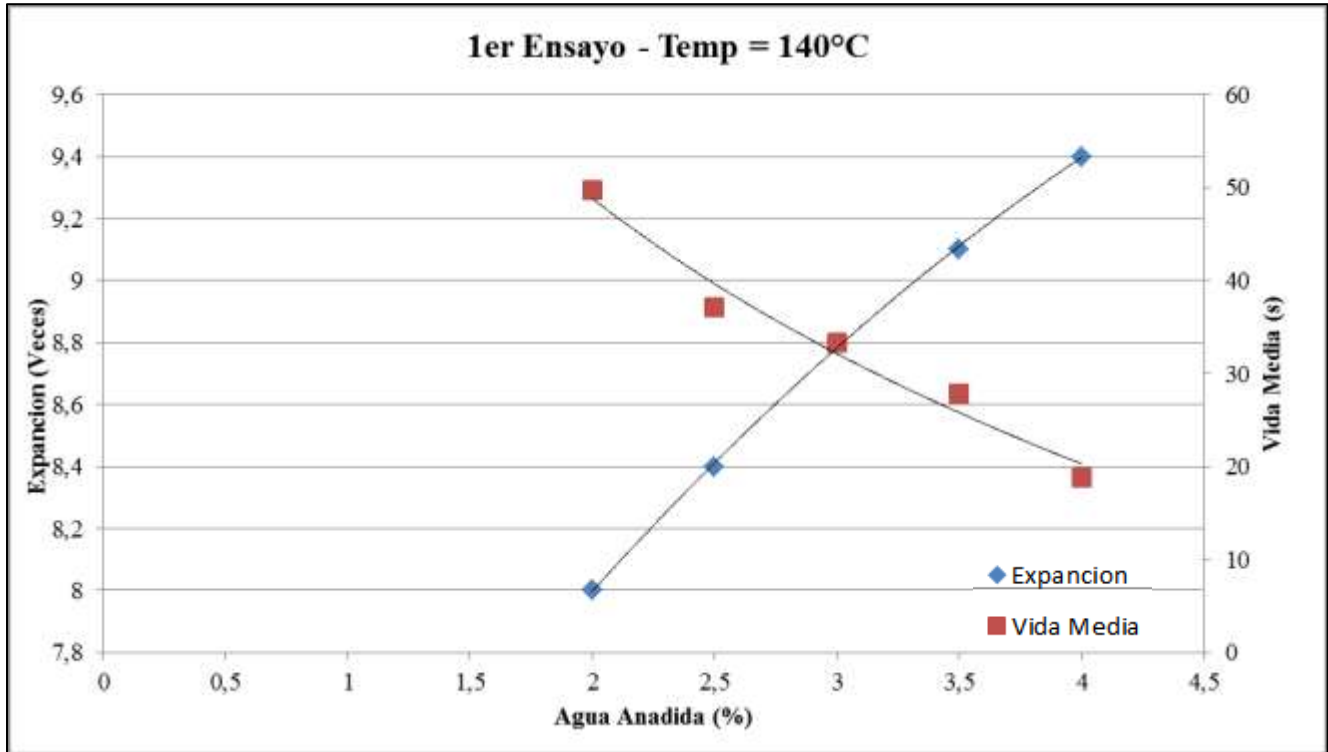
1er Ensayo – 140°C - RE vs VM

Tabla 3.17

Temperatura (°C)	140					
Vol. Inicial de asfalto (cm3)	50					
Peso del asfalto (g)	51					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua (ml)	1,02	1,275	1,53	1,785	2,04	Esp.
VIDA MEDIA (s)	49,7	37,15	33,25	27,9	18,76	>15
Vol. Final de asfalto (cm3)	400	420	440	455	470	
Relación de Expansión	8	8,4	8,8	9,1	9,4	12 - 20

Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 140 °C

Figura 3.4



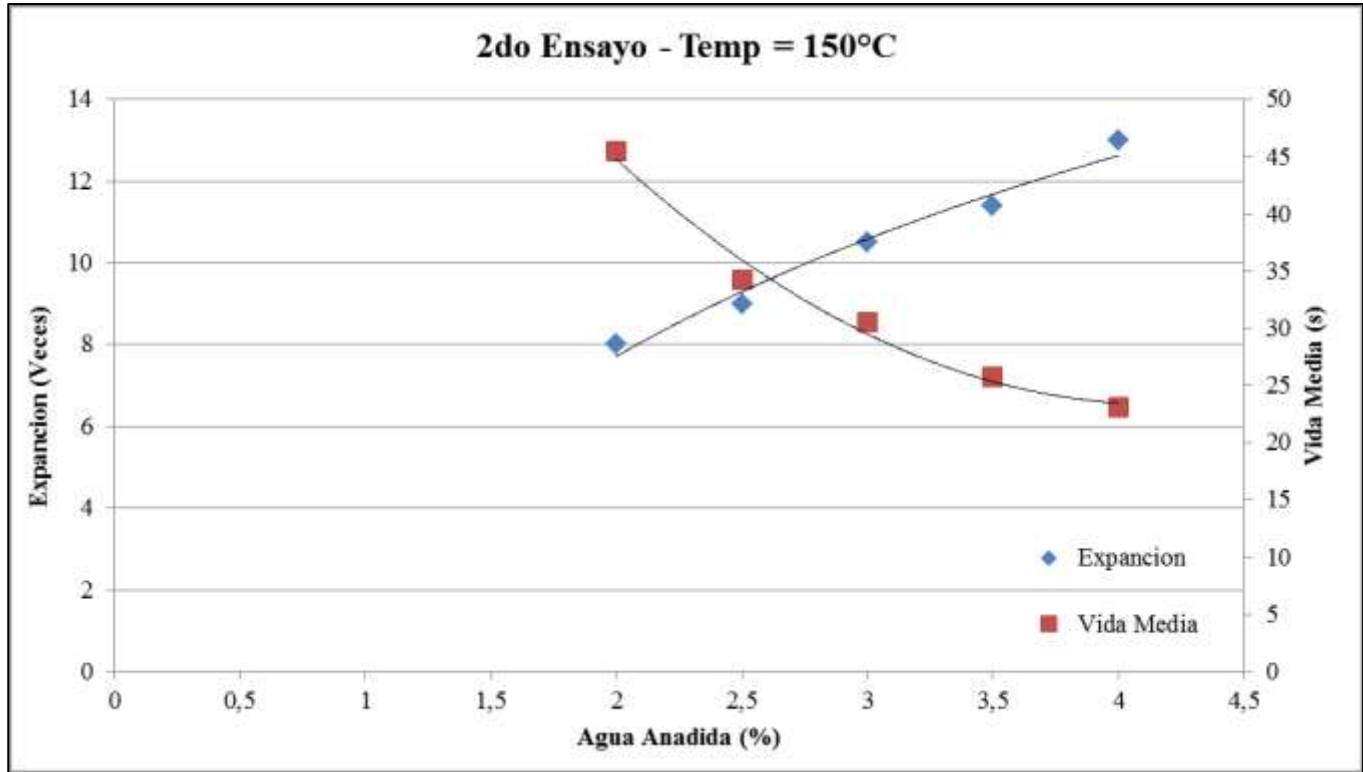
2do Ensayo – 150°C - RE vs VM

Tabla 3.18

Temperatura (°C)	150					
Vol. Inicial de asfalto (cm3)	50					
Peso del asfalto (g)	51					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua cm3	1,02	1,275	1,53	1,785	2,04	Esp.
Vida Media	45,5	34,21	30,5	25,78	23,09	>15
Vol. final de asfalto (cm3)	400	450	525	620	650	
Relación de Expansión	8	9	10,5	12,4	13	12 - 20

Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 150 °C

Figura 3.5



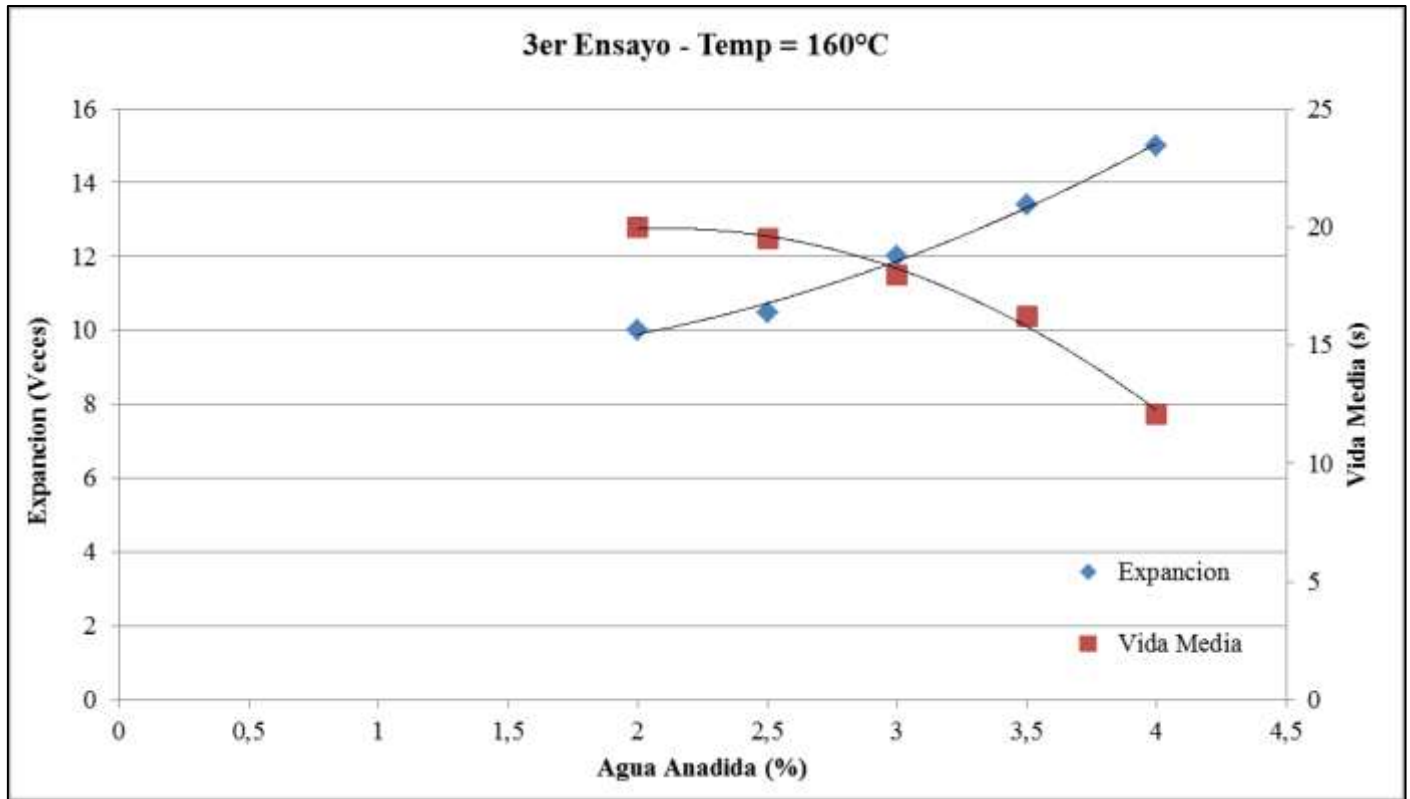
3ero Ensayo - 160°C - RE vs VM

Tabla 3.19

Temperatura (°C)	160					
Vol. Inicial de asfalto (cm3)	50					
Peso del asfalto (g)	51					
% Agua	2	2,5	3	3,5	4	
Vol. Agua cm3	1,02	1,275	1,53	1,785	2,04	Esp.
Vida Media	20	19,52	18	16,23	12,1	>15
Vol. final de asfalto (cm3)	500	525	600	670	750	
Relación de Expansión	10	10,5	12	13,4	15	12 - 20

Relación de Expansión (azul) Vs. Vida Media (rojo) – 160 °C

Figura 3.6



1.4 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL, Y CON ASAFLTO ESPUMADO.

Para poder comparar las características de una mezcla asfáltica con asfalto espumado, es necesario tener una mezcla de referencia, de la que se conozcan todas las características Marshall. Con esta finalidad, se realizó el diseño de una mezcla asfáltica tradicional y posteriormente una con asfalto espumado.

1.4.1 DOSIFICACION POR EL MÉTODO DE TANTEOS.

Dosificación de materiales Tabla 3.20

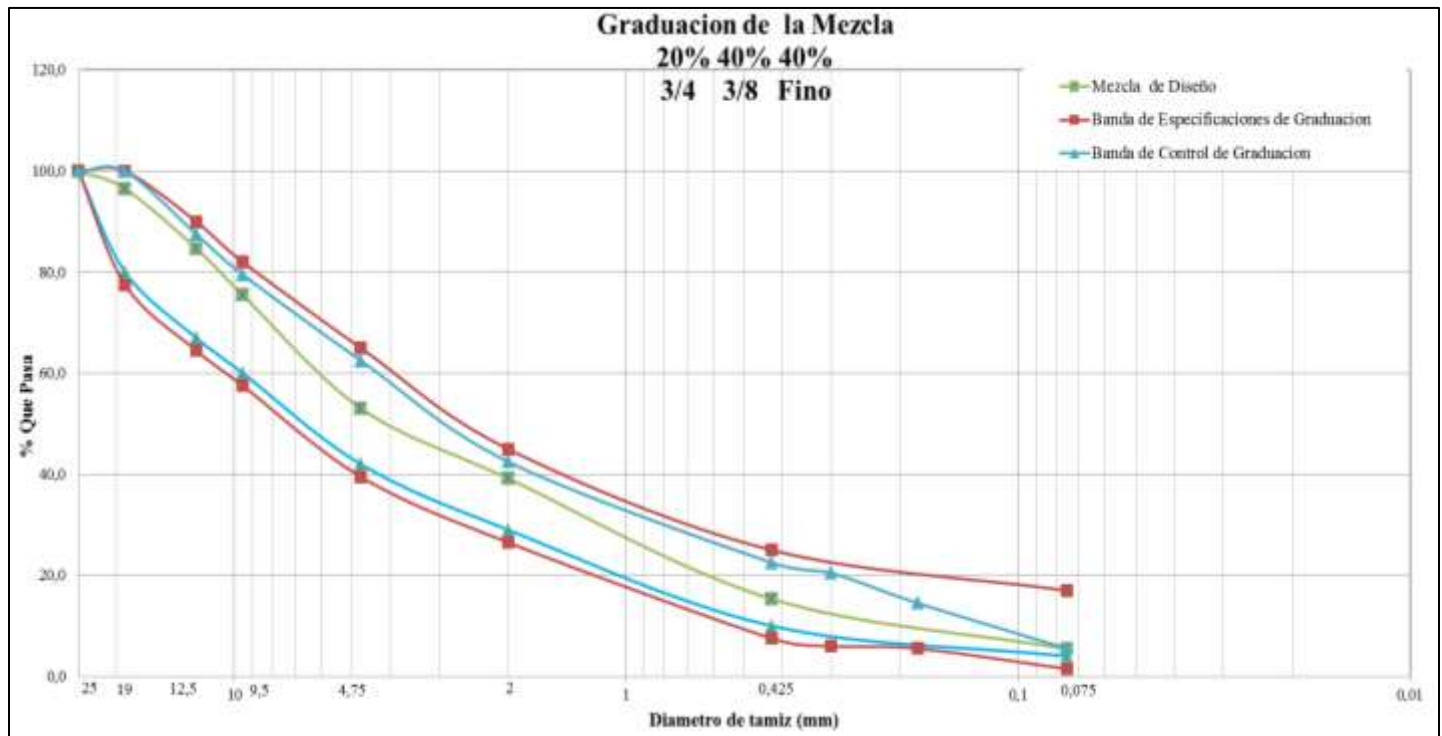
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES																							
PLANILLA DE GRANULOMETRIA PROYECTADA																							
MATERIAL	plg.	1"		3/4"		1/2"		3/8"		N°4		N° 10		N° 16		N° 40		N° 50		N° 80		N° 200	
	mm.	25,40		19,05		12,70		9,53		4,75		2,00		1,16		0,43		0,300		0,18		0,075	
	%	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M
Grava de 3/4"	20,0	100,0	20,0	82,7	16,5	23,5	4,7	7,1	1,4	1,6	0,3	1,5	0,3	0,0	0,0	1,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1
Grava de 3/8"	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	85,1	34,0	31,8	12,7	16,8	6,7	0,0	0,0	4,7	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,3
Arena Natural	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	80,3	32,1	0,0	0,0	32,9	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	12,7	5,1
RESULTANTE	100,0		100,0		96,5		84,7		75,45		53,0		39,2		25,0		15,3		12,5		9,6		5,5
ESPECIFICACIONES (min.-Máx.)		100	100	80	100	67	85	60	77	43	54	29	45	----	---	14	25	13	23	8	17	4	8

El método de tanteos recibe este nombre porque se tantean los porcentajes de aporte de cada material, hasta que la curva de la granulometría de la mezcla entre en el rango de las especificaciones.

Las especificaciones de esta combinación de agregados corresponden a la mezcla tipo IV (Gradación Densa), subtipo c, sugeridas por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

Granulometría de diseño

Figura 3.7



Se verifica que la dosificación escogida esté dentro de la banda de control de la obra, que es una faja de trabajo que permite una tolerancia en la gradación del agregado para el trabajo en obra.

1.4.1.1 CONTENIDO MINIMO DE ASFALTO

El procedimiento de cálculo del porcentaje mínimo de asfalto necesario en una mezcla, es muy importante como punto de partida del diseño de la mezcla. Se considera el contenido mínimo de asfalto, como la cantidad mínima de asfalto, que es necesaria para cubrir todas las partículas de agregado, ser absorbido y además, cumplir como cementante en la mezcla. El procedimiento de cálculo de contenido mínimo se presenta a continuación:

- Se determina la composición granulométrica del material pétreo. Para el cálculo del contenido de cemento asfáltico el método se basa en la estimación de la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material. Para hacer dicha estimación se hace uso de las siguientes constantes de área en metros cuadrados por kilo de material pétreo:

Constantes de Área Correspondientes al Material

Tabla 3.21

CONSTANTES DE ÁREA CORRESPONDIENTES AL MATERIAL RETENIDO		
Material que pasa	Material que retiene	Constante de Área (m²/kg)
1½"	¾"	0.27
¾"	#4	0.41
#4	#40	2.05
#40	#200	15.38
#200	Base	53.30

- Cada una de las constantes anteriores se multiplican por los porcentajes de partículas entre las mallas correspondientes, dando por resultado que se obtengan determinadas superficies por kilogramo de material.
- Se suman todas las superficies calculadas y el resultado se multiplica por el Índice Asfáltico, que varía de 0.0055 a 0.0100, de acuerdo con la

rugosidad y la porosidad de los agregados, de acuerdo a la siguiente tabla:

Índice Asfáltico Para Materiales

Tabla 3.21

Material Pétreo	Índice Asfáltico		
	Absorción 0.0 a 2.5 %	Absorción 2.6 a 5.0 %	Absorción Mayor de 5.0%
Redondeados	0.0055	0.0065	0.0075
Sub-Angulosas	0.0065	0.0075	0.0085
Angulosas	0.0075	0.0085	0.0100

- Se multiplican las constantes de área, por el porcentaje de material retenido en cada tamiz y el contenido mínimo de asfalto es el producto de la suma de todas las multiplicaciones por el índice asfáltico dependiente del tipo de agregado y de la absorción del mismo.

Los resultados obtenidos son los siguientes

Contenido mínimo de asfalto

Tabla 3.23

Tamiz	%retenido	Constante de área	m ² /kg
3/4"	0,035	0,27	0,00945
#4	0,4349	0,41	0,178309
#40	0,3771	2,05	0,773055
#200	0,0986	15,38	1,516468
Base	0,0547	53,3	2,91551
		SUMA	5,392792
		Cont. Mínimo	4,0%

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla y a la precisión que se le quiera dar a las ecuaciones de la nube de puntos.

1.4.1.2 DEFINICION DEL NUMERO DE MUESTRAS (Guía para instructores, INSTITUTO DE ASFALTO)

Para la determinación óptima del asfalto, éste debe ser primeramente estimado. Se destina una serie de muestras de prueba para un rango de distintos contenidos de asfalto de manera tal que las curvas de los ensayos, muestren un valor óptimo bien definido. El contenido de asfalto debe variar en incrementos de 0.5% por lo menos con dos valores que estén por encima y dos que estén por debajo del valor óptimo. Para proveer datos adecuados se designan tres probetas para cada combinación de agregados y contenido de asfaltos.

1.4.1.3 DOSIFICACIONES DE BRIQUETAS PARA MEZCLA TRADICIONAL

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 4 %Asf

Tabla 3.21

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		4	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	40,0	40,0
3/4"	1/2"	136,4	176,3
1/2"	3/8"	106,5	282,8
3/8"	N°4	258,2	540,9
N°4	N° 10	159,8	700,7
N° 10	N° 16	163,7	864,5
N° 16	N° 40	111,0	975,4
N° 40	N° 50	32,8	1008,2
N° 50	N° 80	32,8	1041,1
N° 80	N° 200	48,0	1089,0
N° 200	Fondo	63,0	1152,0
Suma Total		1152	
Cemento Asfáltico (gr)		48	

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 4,5 %Asf

Tabla 3.22

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		4,5	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	39,7	39,7
3/4"	1/2"	135,6	175,4
1/2"	3/8"	105,9	281,3
3/8"	N°4	256,8	538,1
N°4	N° 10	159,0	697,1
N° 10	N° 16	162,9	860,0
N° 16	N° 40	110,4	970,4
N° 40	N° 50	32,6	1003,0
N° 50	N° 80	32,7	1035,6
N° 80	N° 200	47,7	1083,4
N° 200	Fondo	62,6	1146,0
Suma Total		1146	
Cemento Asfáltico (gr)		54	

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 5 %Asf

Tabla 3.23

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		5	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	39,5	39,5
3/4"	1/2"	134,9	174,5
1/2"	3/8"	105,3	279,8
3/8"	N°4	255,5	535,3
N°4	N° 10	158,2	693,4
N° 10	N° 16	162,0	855,5
N° 16	N° 40	109,8	965,3
N° 40	N° 50	32,4	997,7
N° 50	N° 80	32,5	1030,2
N° 80	N° 200	47,5	1077,7
N° 200	Fondo	62,3	1140,0
Suma Total		1140	
Cemento Asfáltico (gr)		60	

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 5,5 %Asf

Tabla 3.24

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		5,5	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	39,3	39,3
3/4"	1/2"	134,2	173,5
1/2"	3/8"	104,8	278,3
3/8"	N°4	254,1	532,5
N°4	N° 10	157,3	689,8
N° 10	N° 16	161,2	851,0
N° 16	N° 40	109,2	960,2
N° 40	N° 50	32,3	992,5
N° 50	N° 80	32,3	1024,8
N° 80	N° 200	47,2	1072,0
N° 200	Fondo	62,0	1134,0
Suma Total		1134	
Cemento Asfáltico (gr)		66	

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 6 %Asf

Tabla 3.25

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		6	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	39,1	39,1
3/4"	1/2"	133,5	172,6
1/2"	3/8"	104,2	276,9
3/8"	N°4	252,8	529,6
N°4	N° 10	156,5	686,1
N° 10	N° 16	160,3	846,5
N° 16	N° 40	108,7	955,1
N° 40	N° 50	32,1	987,2
N° 50	N° 80	32,1	1019,4
N° 80	N° 200	47,0	1066,3
N° 200	Fondo	61,7	1128,0
Suma Total		1128	
Cemento Asfáltico (gr)		72	

Dosificación de materiales retenidos por tamiz – 6,5 %Asf

Tabla 3.26

Tamiz		% C.A.	PB (gr)
		6,5	1200
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0,0	0,0
1"	3/4"	38,9	38,9
3/4"	1/2"	132,8	171,7
1/2"	3/8"	103,7	275,4
3/8"	N°4	251,4	526,8
N°4	N° 10	155,7	682,5
N° 10	N° 16	159,5	841,9
N° 16	N° 40	108,1	950,0
N° 40	N° 50	31,9	982,0
N° 50	N° 80	32,0	1014,0
N° 80	N° 200	46,7	1060,7
N° 200	Fondo	61,3	1122,0
Suma Total		1122	
Cemento Asfáltico (gr)		78	

Se calculan las cantidades retenidas de material para cada tamiz, en base a una briqueta que pesa 1200 gramos, con contenidos de asfaltos que varían entre 4 y 6.5 % con incrementos parciales de cada 0.5%.

Este procedimiento se repite de forma idéntica para las briquetas con asfalto espumado, haciendo un total de 3 briquetas por contenido de asfalto, 18 para la mezcla tradicional y 18 para la mezcla con asfalto espumado.

Es importante mencionar, que el agregado para la elaboración de una mezcla tradicional tiene que estar seco, previo al pesado por tamices. Mientras que el agregado para la mezcla con asfalto espumado tiene una humedad natural, que posteriormente es uniformizada y llevada al Contenido de Humedad Optimo en el momento previo al mezclado con el asfalto espumado.

1.4.1.4 DOSIFICACION DE BRIQUETAS PARA MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado - 4 %Asf

Tabla 3.27

Tamices		% C.A.	PB (gr)	
		4	1200	
Pasa	Retiene	Peso Ag. Ret	Peso Ag. Acum	Peso de Agua
1"	0	0,0	0,0	0,0
1"	3/4"	36,5	40,0	3,5
3/4"	1/2"	124,5	176,3	11,9
1/2"	3/8"	97,2	282,8	9,3
3/8"	N°4	235,7	540,9	22,4
N°4	N° 10	145,9	700,7	13,9
N° 10	N° 16	149,5	864,5	14,2
N° 16	N° 40	101,3	975,4	9,7
N° 40	N° 50	29,9	1008,2	2,9
N° 50	N° 80	30,0	1041,1	2,9
N° 80	N° 200	43,8	1089,0	4,2
N° 200	Fondo	57,5	1152,0	5,5
Suma Total		1051,8		100,2
Cemento Asfáltico (gr)		48,0		
PF (%)	53.0			
CHO (%)	4,2			
CHMD (%)	8,6			

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado - 4,5 %Asf

Tabla 3.28

Tamiz		% C.A.	PB (gr)	Peso de Agua
		4,5	1200	
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum	
1"	0	0,0	0,0	0,0
1"	3/4"	36,3	39,7	3,4
3/4"	1/2"	123,9	175,4	11,8
1/2"	3/8"	96,7	281,3	9,2
3/8"	Nº4	234,5	538,1	22,3
Nº4	Nº 10	145,2	697,1	13,8
Nº 10	Nº 16	148,7	860,0	14,1
Nº 16	Nº 40	100,8	970,4	9,6
Nº 40	Nº 50	29,8	1003,0	2,8
Nº 50	Nº 80	29,8	1035,6	2,8
Nº 80	Nº 200	43,6	1083,4	4,1
Nº 200	Fondo	57,2	1146,0	5,4
Suma Total		1046,6		99,4
Cemento Asfáltico (gr)		54,0		
PF (%)	53,0			
CHO (%)	4,2			
CHMD (%)	8,6			

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado - 5 %Asf

Tabla 3.29

Tamiz		% C.A.	PB (gr)		
		5	1200		
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum	Peso de Agua	
1"	0	0,0	0,0	0,0	
1"	3/4"	36,1	39,5	3,4	
3/4"	1/2"	123,3	174,5	11,7	
1/2"	3/8"	96,2	279,8	9,1	
3/8"	N°4	233,4	535,3	22,1	
N°4	N° 10	144,5	693,4	13,7	
N° 10	N° 16	148,0	855,5	14,0	
N° 16	N° 40	100,3	965,3	9,5	
N° 40	N° 50	29,6	997,7	2,8	
N° 50	N° 80	29,7	1030,2	2,8	
N° 80	N° 200	43,4	1077,7	4,1	
N° 200	Fondo	56,9	1140,0	5,4	
Suma Total		1041,4		98,6	
Cemento Asfáltico (gr)		60,0			
PF (%)	53.0				
CHO (%)	4,2				
CHMD (%)	8,5				

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado - 5,5 %Asf

Tabla 3.30

Tamiz		% C.A.	PB (gr)	Peso de Agua
		5,5	1200	
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum	
1"	0	0,0	0,0	0,0
1"	3/4"	35,9	39,3	3,4
3/4"	1/2"	122,6	173,5	11,6
1/2"	3/8"	95,8	278,3	9,0
3/8"	Nº4	232,2	532,5	21,9
Nº4	Nº 10	143,8	689,8	13,6
Nº 10	Nº 16	147,3	851,0	13,9
Nº 16	Nº 40	99,8	960,2	9,4
Nº 40	Nº 50	29,5	992,5	2,8
Nº 50	Nº 80	29,5	1024,8	2,8
Nº 80	Nº 200	43,1	1072,0	4,1
Nº 200	Fondo	56,6	1134,0	5,3
Suma Total		1036,2		97,8
Cemento Asfáltico		66,0		
PF (%)	53.0			
CHO (%)	4,2			
CHMD (%)	8,5			

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado - 6 %Asf

Tabla 3.31

Tamiz		% C.A.	PB (gr)		
		6	1200		
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum	Peso de Agua	
1"	0	0,0	0,0	0,0	
1"	3/4"	35,8	39,1	3,4	
3/4"	1/2"	122,0	172,6	11,5	
1/2"	3/8"	95,3	276,9	9,0	
3/8"	Nº4	231,0	529,6	21,7	
Nº4	Nº 10	143,0	686,1	13,5	
Nº 10	Nº 16	146,5	846,5	13,8	
Nº 16	Nº 40	99,3	955,1	9,3	
Nº 40	Nº 50	29,3	987,2	2,8	
Nº 50	Nº 80	29,4	1019,4	2,8	
Nº 80	Nº 200	42,9	1066,3	4,0	
Nº 200	Fondo	56,4	1128,0	5,3	
Suma Total		1031,0		97,0	
Cemento Asfáltico (gr)		72,0			
PF (%)	53,0				
CHO (%)	4,2				
CHMD (ml)	8,5				

Dosificación de materiales retenidos por tamiz - Espumado – 6,5 %Asf

Tabla 3.32

Tamiz		% C.A.	PB (gr)		
		6,5	1200		
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum	Peso de Agua	
1"	0	0,0	0,0	0	
1"	3/4"	35,6	38,9	3,33782884	
3/4"	1/2"	121,4	171,7	11,3917365	
1/2"	3/8"	94,8	275,4	8,89433215	
3/8"	Nº4	229,9	526,8	21,5680721	
Nº4	Nº 10	142,3	682,5	13,3528553	
Nº 10	Nº 16	145,8	841,9	13,6785535	
Nº 16	Nº 40	98,8	950,0	9,27238843	
Nº 40	Nº 50	29,2	982,0	2,73917557	
Nº 50	Nº 80	29,2	1014,0	2,74302543	
Nº 80	Nº 200	42,7	1060,7	4,00693455	
Nº 200	Fondo	56,1	1122,0	5,26160401	
Suma Total		1025,8		96,2	
Cemento Asfáltico (gr)		78			
PF (%)	53,0				
CHO (%)	4,2				
CHMD (ml)	8,4				

Corresponde decir, que una mezcla con asfalto espumado, brinda la ventaja de poder usar el agregado húmedo. Pero para poder alcanzar una compactación óptima, es necesario adicionar una determinada cantidad de agua, calculada con la fórmula de Sark y Manke:

$$CHMD = 8.92 + 1.48CHO - 0.4PF - 0.39CA$$

1.4.2 CARACTERÍSTICAS MARSHALL DE MEZCLA LA TRADICIONAL

Tabla 3.33

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICAS TRADICIONAL EN CALIENTE METODO MARSHALL																					
Agregado	SANTA ANA	Destino (Km.)	Proyecto de Grado	N° Ensayo	I																
Muestra N°	I	Estructura	Carpeta Asfáltica	Fecha	16-may-13																
Origen (Km.)	Pozo (Km.)	Realizado	EST. RAKY JULIO CASTILLO																
Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		"Benúel - Brasil"																	
Mat. Retenido Tamiz N° 4		60		CEMENTO ASFÁLTICO 85-100																	
Mat. Pasa Tamiz N° 4		40		Peso Específico Total AASHTO T-228																	
Peso Específico Total		100		1,020																	
Peso Específico Bulk de Mezclas Bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)																					
Peso Esp. Max. de Mezclas Compact.(AASHTO T-209)																					
N° Probeta	Altura de Probeta		Vol.	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos			Estabilidad Marshall		Flujo									
	Base mezcba	Base Agregado					Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en Agua	Probeta	Gr./cm ³		Gr./cm ³	Gr./cm ³	Carga	Factor corrección	Carga Real Corrección	Carga Promedio	En 1/100 pulgadas		
	%	grs.	CC	grs./cm ³	grs./cm ³	grs./cm ³	%	%	%	Libras	Libras	Libras	Libras								
1	6.35	4.0	4.2	1181.7	1184.5	666.3	518.2	2.280		260	2795.84	1.000	2795.84	0.071		0.071					
2	6.37	4.0	4.2	1186.3	1189.6	667.7	521.9	2.273		245	2654.03	0.995	2640.76	0.073		0.073					
3	6.38	4.0	4.2	1191.1	1195.0	668.6	526.4	2.263	8.28	17.19	51.85	0.993	2485.44	0.071	7.15	0.071					
4	6.31	4.5	4.7	1190.3	1192.1	678.7	513.4	2.318		235	2533.07	1.011	2581.16	0.075		0.075					
5	6.28	4.5	4.7	1191.0	1193.4	682.1	511.3	2.329		290	3084.75	1.019	3143.36	0.077		0.077					
6	6.24	4.5	4.7	1191.8	1195.0	685.1	509.9	2.337	5.30	15.57	65.96	1.029	3667.52	0.067	7.28	0.067					
7	6.27	5.0	5.3	1193.6	1197.0	680.6	516.4	2.311		330	3468.25	1.021	3541.08	0.073		0.073					
8	6.24	5.0	5.3	1192.8	1195.0	682.8	512.3	2.328		325	3425.00	1.029	3524.32	0.083		0.083					
9	6.20	5.0	5.3	1192.1	1193.4	684.5	508.9	2.343	4.64	16.05	71.08	1.040	3507.29	0.079	7.81	0.079					
10	6.13	5.5	5.8	1198.5	1189.5	683.4	506.1	2.368		365	3804.61	1.062	4040.5	0.087		0.087					
11	6.14	5.5	5.8	1192.2	1188.2	682.6	505.6	2.358		350	3660.20	1.059	3876.15	0.085		0.085					
12	6.14	5.5	5.8	1186.0	1187.2	681.4	505.8	2.345	2.72	15.43	83.36	1.059	3672.87	0.083	8.46	0.083					
13	6.22	6.0	6.4	1189.9	1192.6	680.5	512.1	2.324		270	2892.37	1.035	2993.61	0.091		0.091					
14	6.23	6.0	6.4	1190.6	1192.4	682.6	509.8	2.335		270	2896.28	1.032	2988.96	0.091		0.091					
15	6.24	6.0	6.4	1191.5	1192.6	684.3	508.3	2.344	2.96	16.69	82.29	1.029	2976.25	0.083	8.79	0.083					
16	6.17	6.5	7.0	1180.0	1181.2	676.7	504.5	2.339		225	2455.26	1.049	2575.57	0.100		0.100					
17	6.19	6.5	7.0	1184.1	1185.3	677.9	507.4	2.334		210	2310.73	1.043	2410.09	0.098		0.098					
18	6.20	6.5	7.0	1188.4	1189.7	678.7	511.0	2.326	2.32	17.18	86.51	1.040	2245.04	0.108	10.24	0.108					
Especificación		Mínimo		Máximo		3		5		15		75		82		1800		8		14	

No. de Golpes Capa 75

Resumen de características Marshall - Tradicional

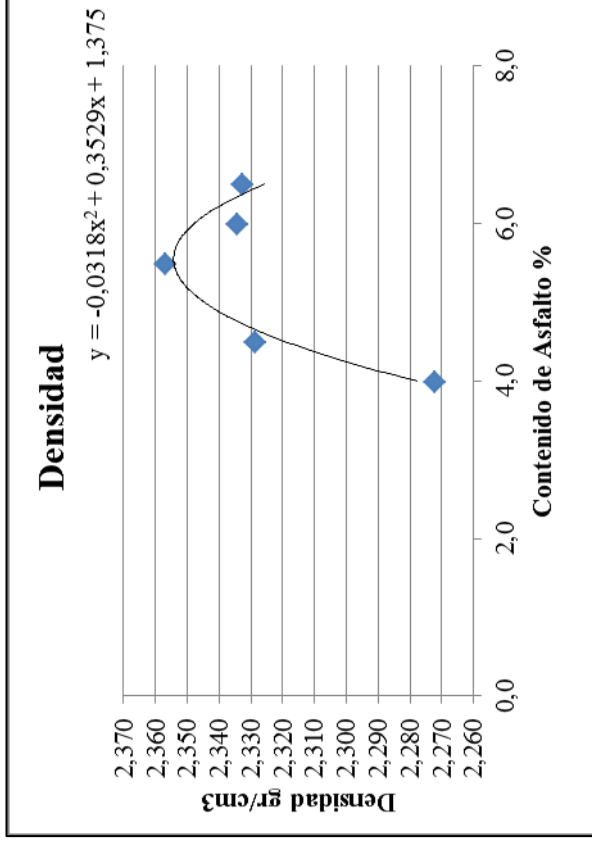
Tabla 3.34

Determinación del contenido óptimo de Asfalto. Tomando en cuenta Criterio de Vacíos Mezcla y R.B.V.	ENSAYO		Valores de Diseño		RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	
	Estabilidad Marshall <u>Lbs.</u>	% Asfalto	Estabilidad Marshall <u>Lbs.</u>	% Asfalto	Densidad	2,352
	3779,2	5,29	3779,2	5,29	Estabilidad	3629,245
	2,348	5,29	2,348	5,29	Fluencia	8,047
	3,34	5,14	3,34	5,14	Vacíos	3,469
	78,2	5,45	78,2	5,45	R.B.V.	77,658
5,3	5,29	5,29	5,3	5,3	V.A.M.	15,419

3.4.3 CURVAS MARSHALL PARA DETERMINAR EL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO

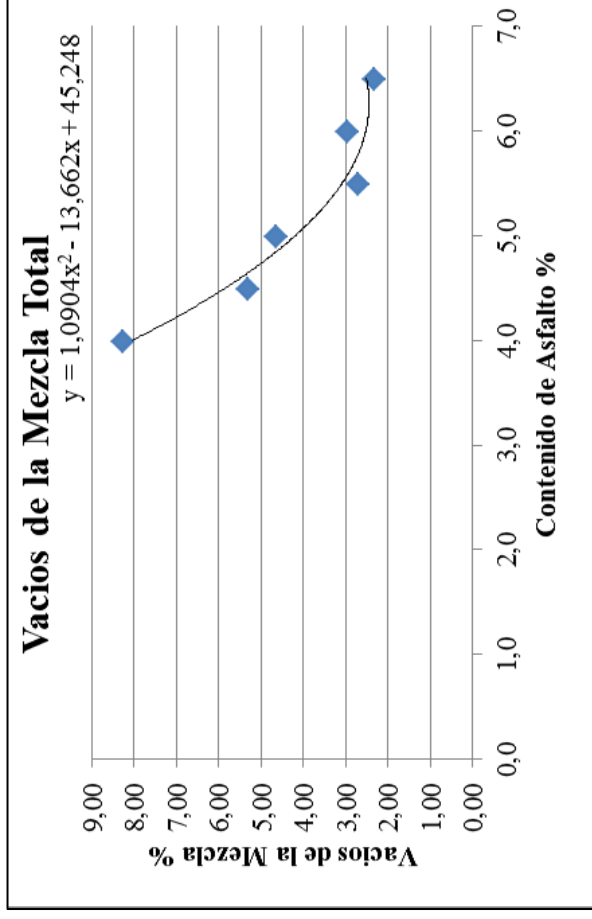
Densidad de la mezcla total Vs. %Asf – Tradicional

Figura 3.8



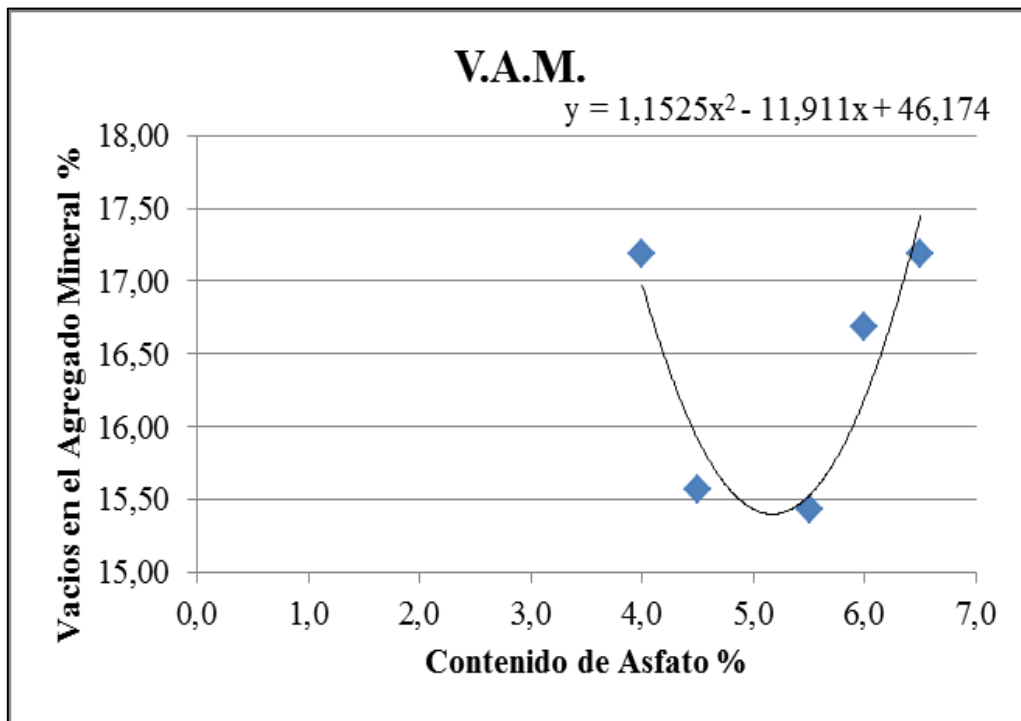
Vacíos de la mezcla total Vs. % Asf - Tradicional

Figura 3.9



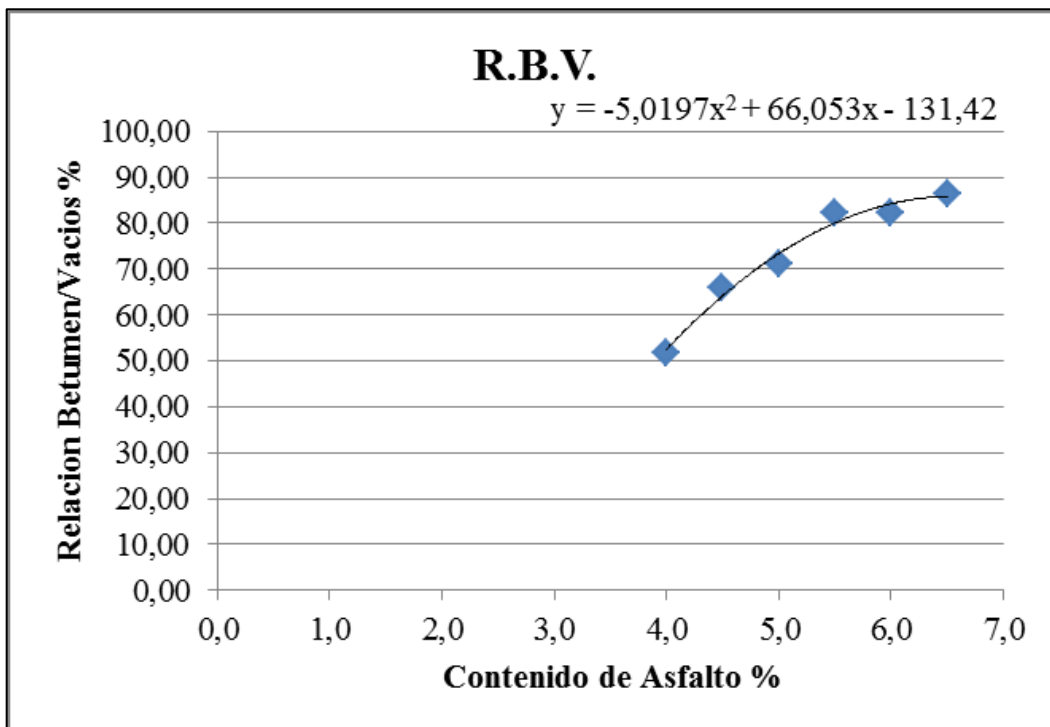
Vacios del agregado mineral Vs. %Asf – Tradicional

Figura 3.10



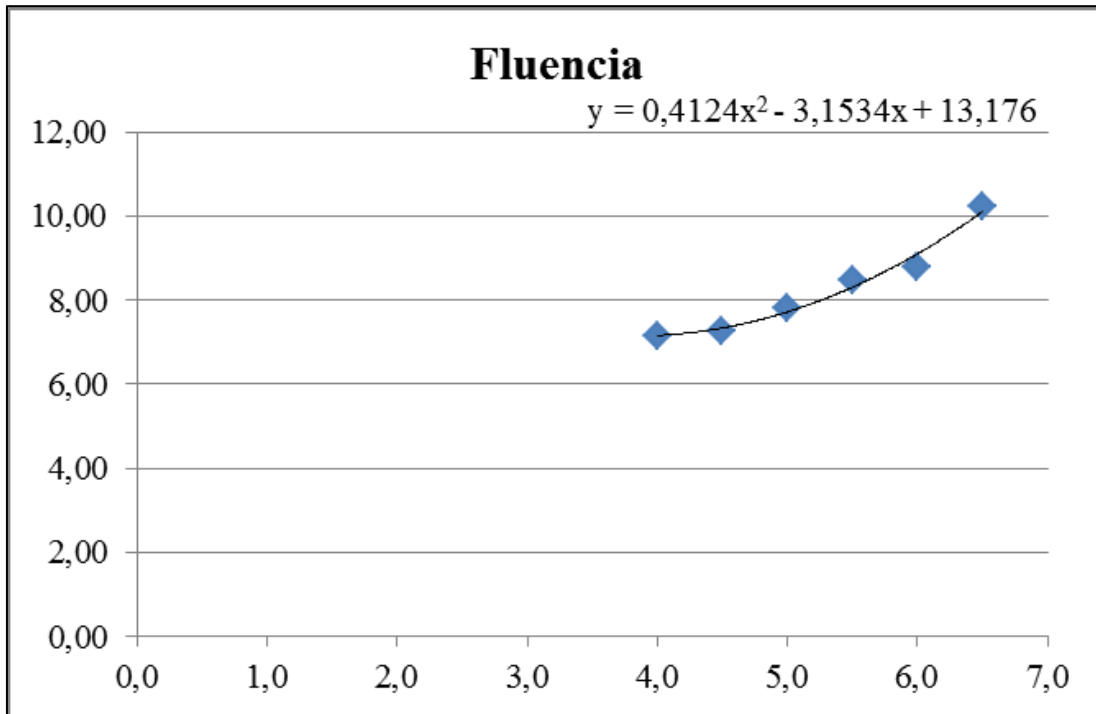
Densidad de la mezcla total Vs. %Asf – Tradicional

Figura 3.11



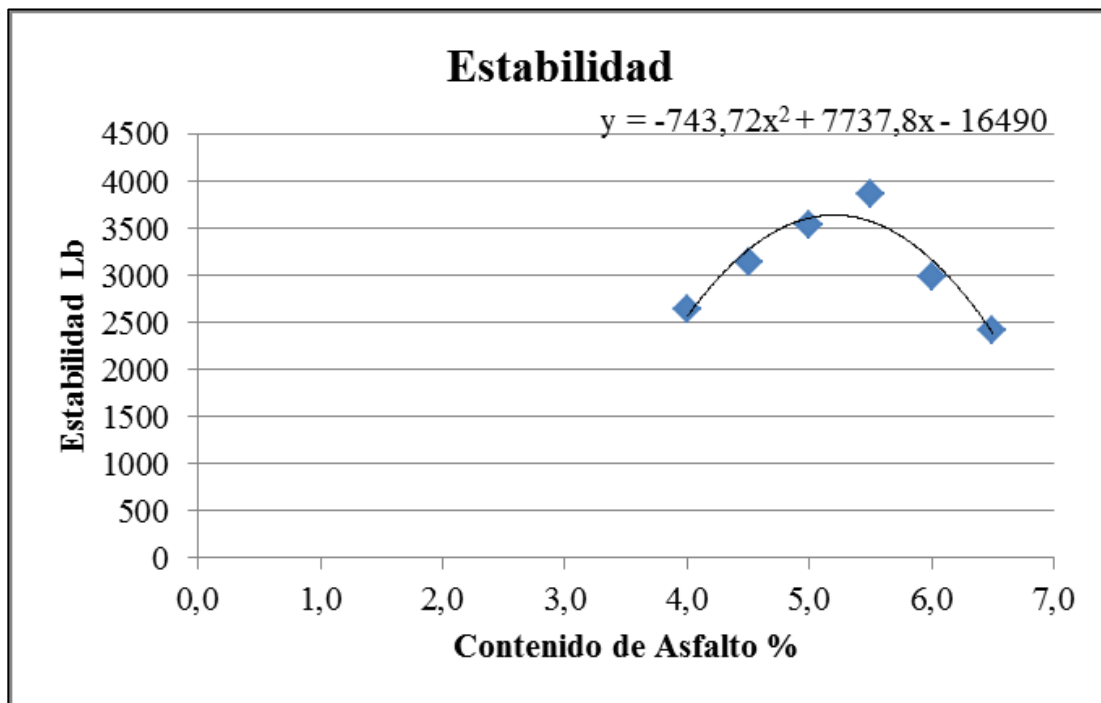
Fluencia Vs. %Asf – Tradicional

Figura 3.12



Estabilidad Vs. %Asf – Tradicional

Figura 3.13



3.4.4 CARACTERÍSTICAS MARSHALL DE LA MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO.

Tabla 3.35

TABLA: DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA CON ASFALTO ESPUMADO EN CALIENTE METODO MARSHALL																					
Agregado		SANTA ANA		Destino (Km.)		N° Ensayo		2													
Muestra N°		1		Estructura		Fecha		17-may-13													
Origen (Km.)			Pozo (Km.)		Realizado		EST. RAKY JULIO CASTILLO													
Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)				% de Agregados		"Benungl - Brasil"															
Mat. Retenido Tamiz N° 4				60		No. de Golpes/Capa															
Mat. Pasa Tamiz N° 4				40		75															
Peso Especifico Total				100		1,020															
Cemento Asfáltico AASHTO M 20				"Benungl - Brasil"																	
CEMENTO ASFALTICO 85-100				1,020																	
Peso Especifico Total AASHTO T-228				1,020																	
N° Probeta	Peso Especifico Bulk de Mezclas Bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)			Peso Esp. Max. de Mezclas Compactas (AASHTO T-209)				Estabilidad Marshall			Flujo										
	% Asfalto	Base Mezcla	Base Agregado	Vol. Probeta	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Maxima Teorica	% de Vacios Total	V.A.M. (Vacios Agregados Miental)	R.B.V. (Rechon Retencion Vacios)	LEC. DIAL	Carga	Factor correccion	Carga Real Correccion	Carga Promedio	En 1/100 pulgadas	Promedio				
1	6.35	4.0	4.2	1193.7	1194.8	680.2	514.6	2.320	2.320	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
2	6.37	4.0	4.2	1188.7	1190.2	676.1	514.2	2.312	2.312	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
3	6.38	4.0	4.2	1183.9	1186.0	671.5	514.5	2.301	2.301	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
4	6.31	4.5	4.7	1185.0	1187.3	672.2	515.1	2.299	2.299	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
5	6.28	4.5	4.7	1187.7	1189.5	677.6	511.9	2.320	2.320	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
6	6.24	4.5	4.7	1191.5	1192.0	682.5	509.5	2.339	2.339	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
7	6.27	5.0	5.3	1183.1	1185.6	678.0	507.6	2.331	2.331	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
8	6.24	5.0	5.3	1187.7	1189.6	682.5	507.1	2.342	2.342	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
9	6.20	5.0	5.3	1192.4	1193.9	686.6	507.4	2.330	2.330	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
10	6.13	5.5	5.8	1189.9	1193.0	681.3	511.7	2.325	2.325	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
11	6.14	5.5	5.8	1192.5	1195.3	683.6	511.7	2.330	2.330	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
12	6.14	5.5	5.8	1195.2	1198.0	685.5	512.5	2.332	2.332	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
13	6.22	6.0	6.4	1164.6	1166.0	669.9	496.1	2.348	2.348	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
14	6.23	6.0	6.4	1186.5	1187.8	682.8	505.0	2.349	2.349	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
15	6.24	6.0	6.4	1208.5	1210.0	695.3	514.7	2.348	2.348	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
16	6.17	6.5	7.0	1184.2	1186.7	678.9	507.8	2.332	2.332	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
17	6.19	6.5	7.0	1187.6	1189.8	678.3	511.5	2.322	2.322	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
18	6.20	6.5	7.0	1191.2	1193.2	677.3	515.9	2.309	2.309	2.311	2.477	6.71	15.77	57.47	250	3699.00	1.019	2750.28	5587	0.073	6.70
Especificación				Mínimo	3	15	75	82	1800	8	14										
				Máximo	5	82	82	1800	8	14											

Resumen de características Marshall – Espumado

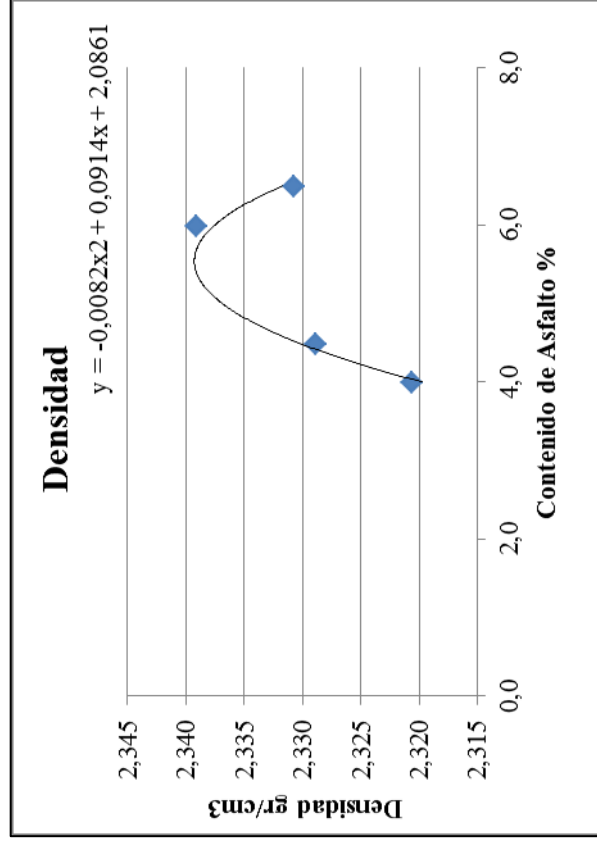
Tabla 3.36

Determinación del contenido óptimo de Asfalto. Tomando en cuenta Criterio de Vacíos Mezcla y R.B.V.	ENSAYO		Valores de Diseño		RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	
	Estabilidad Marshall Lbs.	% Asfalto	Estabilidad Marshall Lbs.	% Asfalto	Densidad	Densidad
5.2	3069,2	5,23	3069,2	5,23	Estabilidad	3108,380
	2,344	5,23	2,344	5,23	Fluencia	8,551
	3,65	5,00	3,65	5,00	Vacíos	3,602
	76,7	5,46	76,7	5,46	R.B.V.	77,610
	Promedio en %	5,23	5,23	V.A.M.L.	16,389	

3.4.5 CURVAS MARSHALL PARA DETERMINAR EL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO

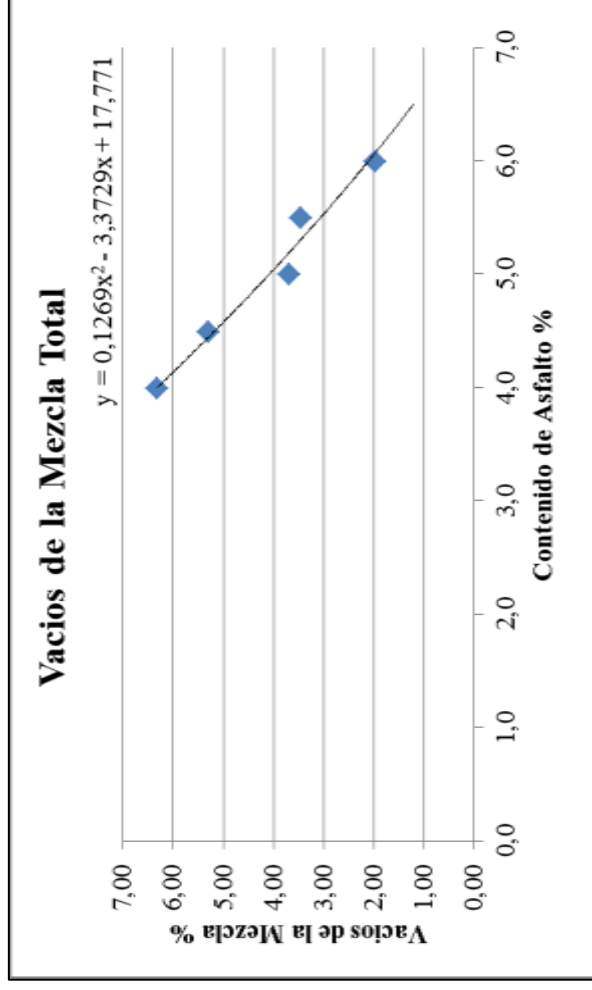
Densidad de la mezcla total Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.14



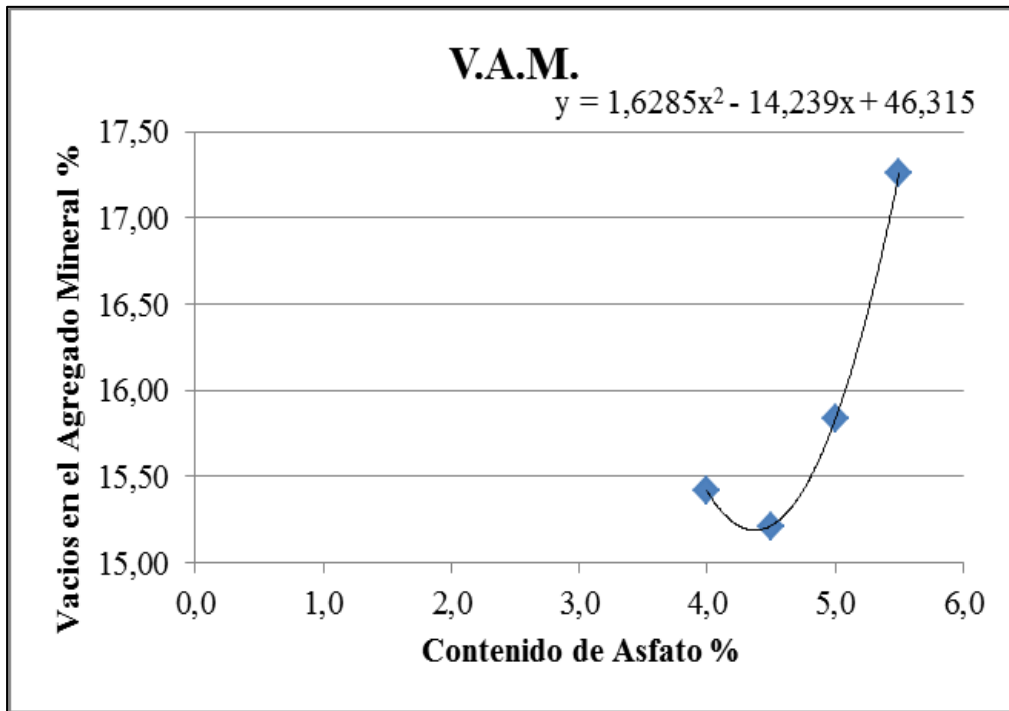
Vacíos de la mezcla total Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.15



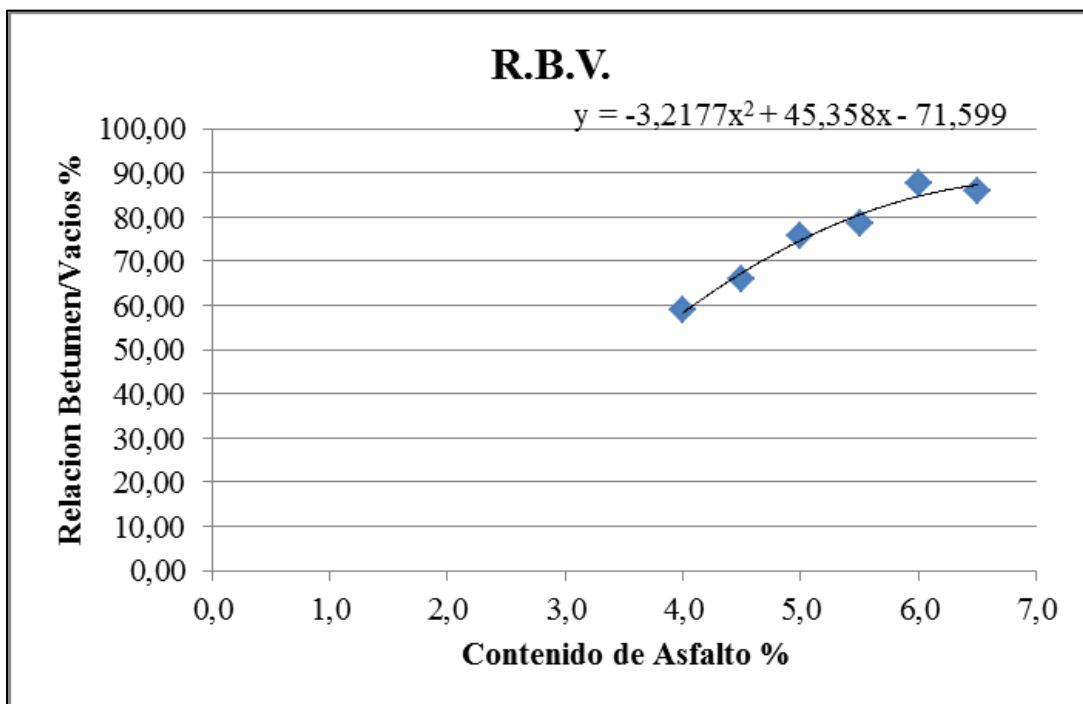
Vacíos del agregado mineral Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.16



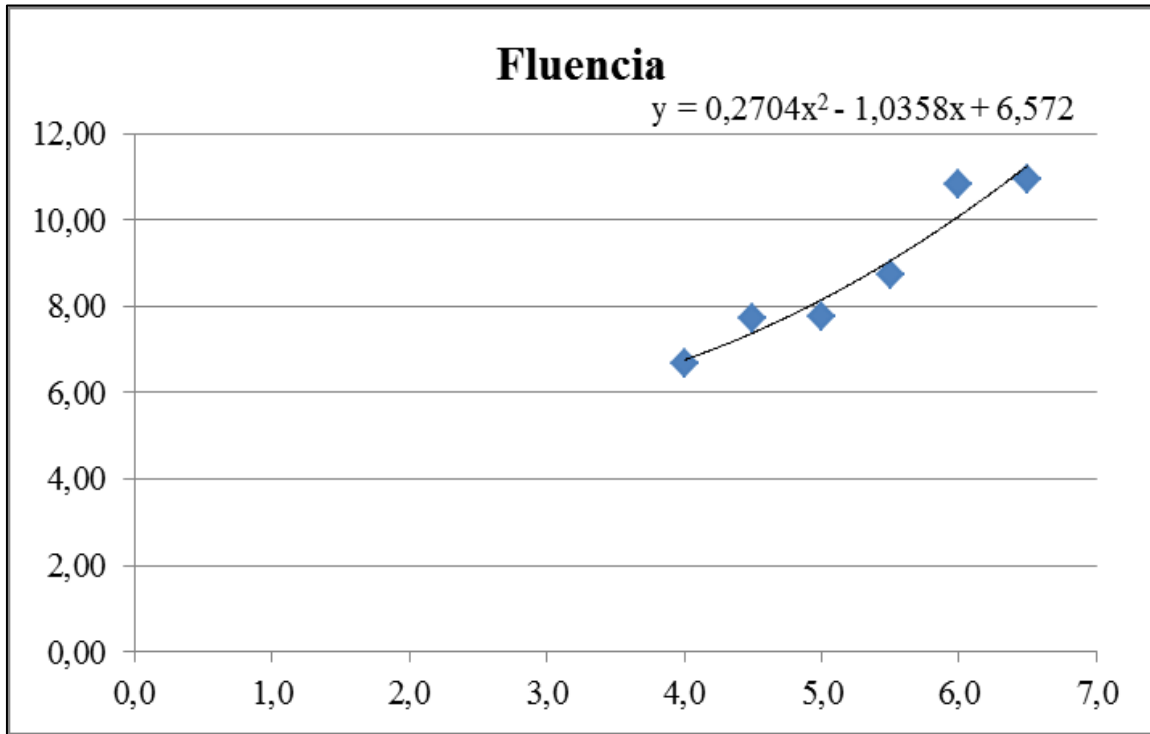
Relación Betumen Vacíos Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.17



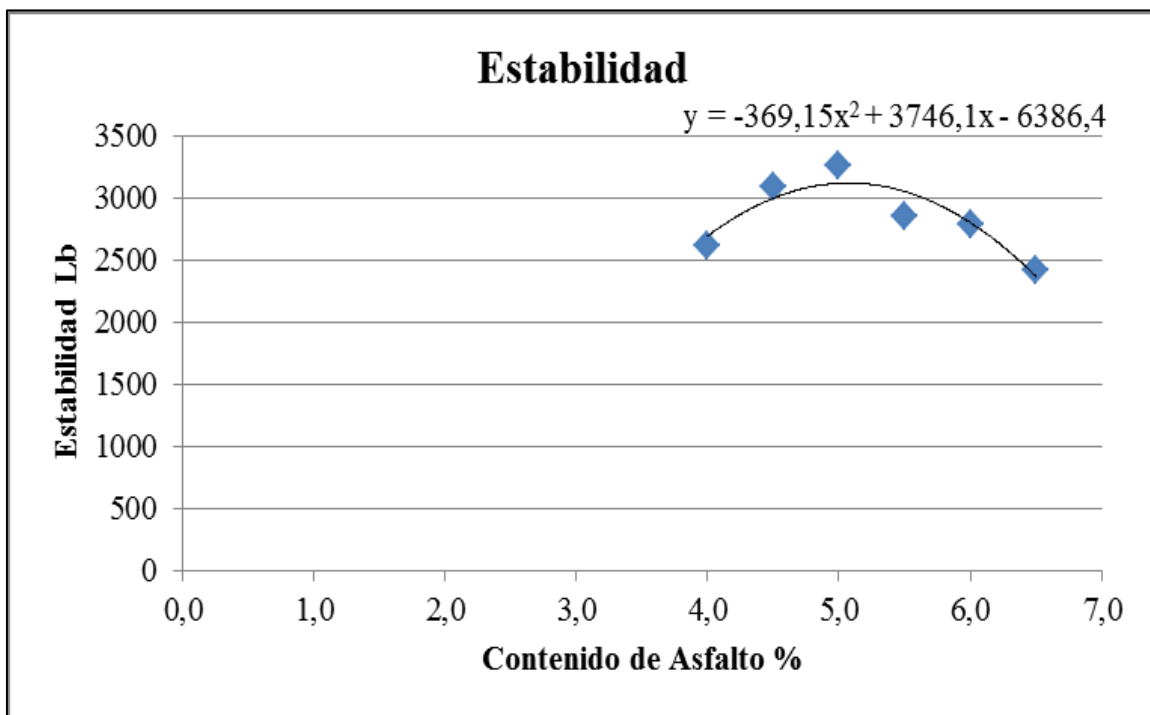
Fluencia Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.18



Estabilidad Vs. %Asf – Espumado

Figura 3.19



3.4.6 ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

3.4.6.1 DEL CEMENTO ASFALTICO Y AGREGADOS

El cemento asfáltico cumple con las especificaciones requeridas para la elaboración de una mezcla asfáltica tradicional. Estas se verificaron realizando los ensayos de:

- Penetración (90.2 mm/10)
- Viscosidad Saybolt Furol (139 seg)
- Punto de inflamación (238.5°C)

En los que se determinó las características básicas exigidas en las especificaciones del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos y las normas AASHTO, adoptadas en nuestro medio por ausencia de especificaciones propias.

Los agregados, por ser utilizados por una institución pública como materia prima en la pavimentación de calles y avenidas, cumple con todas las características exigidas para este fin, en características requeridas para el diseño, como granulometría y peso específico.

3.4.6.2 RELACIÓN DE EXPASION Y VIDA MEDIA DEL ASFALTO ESPUMADO

Se realizaron en total 15 ensayos, separados en tres grupos de temperaturas, cada uno con cinco porcentajes de agua de inyección en la mezcla, para determinar, en función de la relación de expansión y vida media, la temperatura y la cantidad de agua necesarias para generar un espumado óptimo que cumpla con las sugerencias de diseño (RE entre 12 – 20 y VM > 15s).

- **1^{er} Ensayo.-** En el primer ensayo, se definió una temperatura de 140°C, y posteriormente un rango de agua de inyección entre 2 y 4 %.

Todos los resultados obtenidos para la Vida Media se encuentran ampliamente dentro de los parámetros sugeridos; esto notablemente a costa de la Relación de Expansión, debido a que con ningún porcentaje de agua de inyección se alcanza el parámetro mínimo sugerido.

- **2^{do} Ensayo.-** En el segundo ensayo, se definió una temperatura de 150°C, y un rango de agua de inyección igual al del anterior ensayo.

Nuevamente, todos los resultados de Vida Media están dentro de los rangos y sugerencias mínimas para el diseño; a diferencia de esta característica, sólo se obtuvieron resultados satisfactorios, que están dentro de las sugerencias bibliográficas, para los porcentajes de 3.5% y 4%.

- **3^{er} Ensayo.-** En el segundo ensayo se definió una temperatura de 160°C, y un rango de inyección de agua igual al anterior.

Para este ensayo se obtuvieron resultados satisfactorios para la Vida Media, salvo para el 4% de agua de inyección que generó una Vida Media de 12.1 seg. La relación de expiación se vio considerablemente afectada para porcentajes de agua por encima de 2.5% de agua de inyección.

En base al criterio que se sugiere favorecer la Vida Media en desmedro de la Razón de Expansión, y considerando que los 160°C están muy próximos a la temperatura máxima sugerida por el fabricante del cemento asfáltico, es que se escogió un porcentaje de 3.5% de agua de inyección y una temperatura de 150°C, como punto de partida para la elaboración de mezclas asfálticas con asfalto espumado.

Posteriormente, como consecuencia de los resultados obtenidos durante la elaboración de la mezcla, se optó por incrementar la temperatura a 155°C con la que se obtuvieron mejores resultados y una mayor facilidad a la hora de mezclar el cemento asfáltico con el agregado húmedo y frío.

3.4.6.3 DOSIFICACION POR EL MÉTODO DE TANTEOS

Para la dosificación por método de tanteos, se obtuvo una curva granulométrica que se ajustó adecuadamente a la faja de trabajo para *GRADACIONES DENSAS TIPO IV*, sub tipo c. El agregado utilizado en el diseño de la mezcla fue provisto por el Gobierno Municipal de la Provincia Cercado, con autorización de la Oficialía Mayor Técnica. El agregado es proveniente del río Santa Ana y el proveedor es el señor Henry Vargas, actualmente utilizado para las obras de pavimentación de dicha institución, razón por la que se afirma que cumple con los requisitos técnicos necesarios para la finalidad propuesta.

Posteriormente, se definió un rango de control en obra, equivalente a un 2,5% menor que el límite superior, y 2,5% mayor al límite menor de la faja de trabajo. Como un rango de control en obra, requerido por el Instituto de Asfalto (EEUU).

La curva granulométrica que mejor se adaptó, fue la correspondiente a una dosificación de 20% de Grava de 3/4", 40% de Gravilla de 3/8" y 40% de Material Fino o Arena.

Para determinar los porcentajes de material que pasa los tamices que no fueron utilizados para generar la curva granulométrica inicial, (#16, #50 y # 80) de cada material, se proyectó una línea de tendencia de la curva granulométrica final, y por medio de esta una ecuación que relacione la apertura de tamiz en mm con la cantidad de material pasante a través de éste. Sustituyendo el valor de la apertura de tamiz en la ecuación se obtuvo la cantidad de material pasante y se verificó que estas cantidades estén dentro de las especificaciones dadas para cada tamiz en la faja de trabajo.

Establecidos los porcentajes de material pasante de material, se procedió a realizar las dosificaciones para cada una de las briquetas. Con este objetivo, se calculó nuevamente el porcentaje de material retenido para cada uno de los 11 tamices que conforman un juego completo, utilizado en la dosificación de briquetas para mezclas asfálticas.

- **Método tradicional.**

Para calcular el peso de agregado por briketa, se descontó el peso de asfalto, sobre la base de 1200 gr. para cada uno de los 6 puntos escogidos en el diseño Marshall. Valga aclarar que el punto con un contenido de asfalto más bajo contenía una cantidad de 4% y el más alto un 6.5%, con incrementos parciales de 0.5%, en base a las experiencias de la institución donde se realizaron los ensayos (SEDECA).

Se calcularon los pesos retenidos de material obteniendo resultados razonables para cada tamiz y se prepararon 3 muestras de agregado para cada punto.

- **Método con asfalto espumado.**

Se realizó el mismo procedimiento que para una muestra tradicional, pero una vez obtenidos los pesos de material necesarios por tamiz, se les descontó el peso del agua necesaria para la compactación de la mezcla, un equivalente a un 8.6 % en peso de la muestra final. Esto con la finalidad de llevar el conjunto de materiales a un peso final de 1200 gr. exigido por el método Marshall.

Posteriormente se verifico que la cantidad de agua adicionada a la mezcla, tiene un efecto netamente constructivo, debido a que el agua extra adicionada al sistema agregado – cemento asfáltico, se evapora, por consecuencia del método de curado de las briquetas elaboradas con asfalto espumado. Razón por la cual se puede apreciar una diferencia de 1.134 cm^3 menos en la media de volúmenes de briquetas con asfalto espumado con respecto a las de mezcla asfáltica tradicional.

3.4.6.4 CARACTERISTICAS MARSHALL DE UNA MEZCLA TRADICIONAL VS. CARACTERISTICAS DE UNA MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Con la finalidad de hacer un análisis comparativo entre las propiedades de ambas mezclas, a continuación se desglosa cada una en orden secuencial:

- Densidad real.

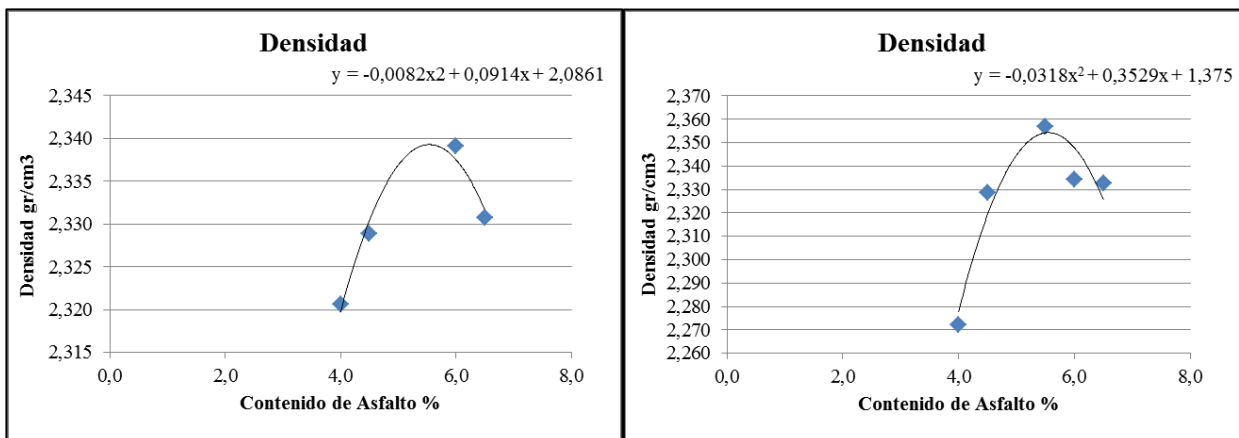
Comparativa de densidad real

Tabla 3.37

Asfalto Espumado			Asfalto Tradicional																																										
%Asf	Densidad Real	Densidad Promedio	%Asf	Densidad Real	Densidad Promedio																																								
%	Grs./cm3	Grs./cm3	%	Grs./cm3	Grs./cm3																																								
4	2,329	2,321	4	2,280	2,272																																								
	2,322			2,311		4,5	2,308	2,329	4,5	2,318	2,328	2,330	2,348	5	2,341	2,351	5	2,311	2,327	2,352	2,360	5,5	2,335	2,339	5,5	2,368	2,357	2,340	2,342	6	2,358	2,358	6	2,324	2,334	2,359	2,358	6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333	2,332	2,319
	2,311																																												
4,5	2,308	2,329	4,5	2,318	2,328																																								
	2,330			2,348		5	2,341	2,351	5	2,311	2,327	2,352	2,360	5,5	2,335	2,339	5,5	2,368	2,357	2,340	2,342	6	2,358	2,358	6	2,324	2,334	2,359	2,358	6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333	2,332	2,319								
	2,348																																												
5	2,341	2,351	5	2,311	2,327																																								
	2,352			2,360		5,5	2,335	2,339	5,5	2,368	2,357	2,340	2,342	6	2,358	2,358	6	2,324	2,334	2,359	2,358	6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333	2,332	2,319																
	2,360																																												
5,5	2,335	2,339	5,5	2,368	2,357																																								
	2,340			2,342		6	2,358	2,358	6	2,324	2,334	2,359	2,358	6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333	2,332	2,319																								
	2,342																																												
6	2,358	2,358	6	2,324	2,334																																								
	2,359			2,358		6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333	2,332	2,319																																
	2,358																																												
6,5	2,342	2,331	6,5	2,339	2,333																																								
	2,332			2,319																																									
	2,319																																												

Comparativa de Densidad Real

Figura 3.20



Observaciones.- Si se compara el promedio de densidades reales de cada método, se puede apreciar una variación mínima entre la mezcla elaborada con asfalto espumado, de la elaborada con un mezcla tradicional; sin embargo en 4 de 6 puntos, la densidad de las muestras elaboradas con asfalto espumado son mayores, esto es considerado un aporte del agua que no se evapora del todo, debido a un curado en horno por un periodo de 48 horas a 60°C.

Para la graficación de esta propiedad se hizo necesaria la depuración de datos que no eran representativos, considerando que la tendencia de esta es alcanzar un máximo a medida que el contenido de asfalto aumenta, y después bajar. Similar al ensayo de contenido de humedad óptimo para un suelo cualquiera.

De la ecuación resultante de las líneas de tendencia, se obtiene por tanteos, el contenido óptimo de asfalto que cumpla de mejor manera con todas las especificaciones.

- **Densidad Máxima Teórica.**

Observaciones.- La densidad máxima teórica es una característica que está en función del peso específico del asfalto y del peso específico total de la mezcla de agregados, que a su vez es función de los porcentajes de la dosificación.

Esta propiedad, representa, la densidad máxima que debería alcanzar la mezcla bajo condiciones ideales.

Considerando que todas estas variables son las mismas para ambos métodos, es que se tienen los mismos resultados por porcentaje de asfalto adicionado a la mezcla.

- **Porcentaje de Vacíos de la Mezcla Total.**

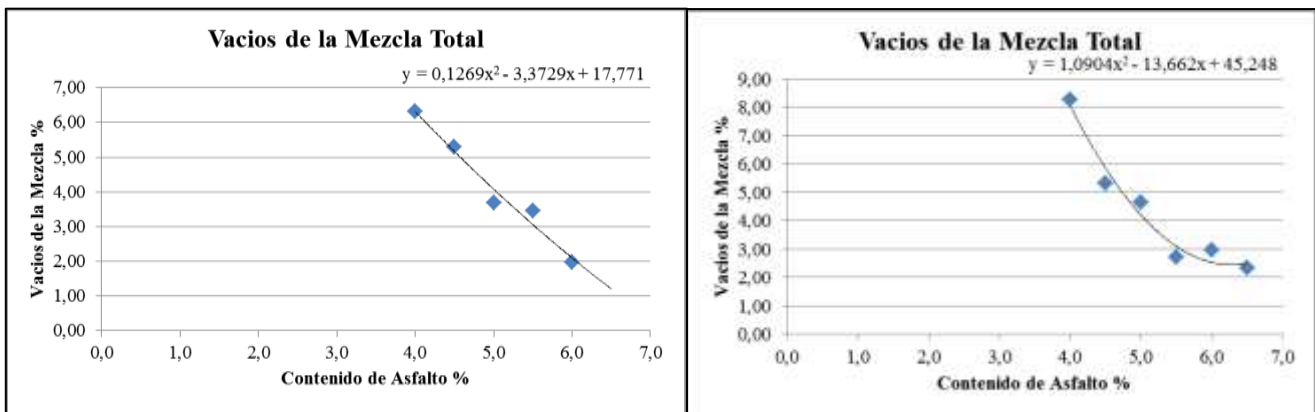
Comparativa de porcentaje de vacíos de la mezcla total

Tabla 3.38

Asfalto Espumado		Asfalto Tradicional	
%Asf	% de Vacíos Mezcla Total	%Asf	% de Vacíos Mezcla Total
%	%	%	%
4	6,31	4	8,28
4,5	5,28	4,5	5,30
5	3,68	5	4,64
5,5	3,46	5,5	2,72
6	1,96	6	2,96
6,5	2,40	6,5	2,32

Comparativa de Porcentaje de vacíos de la mezcla total

Figura 3.21



Observaciones.- Si se presta atención detallada a los valores de vacíos del agregado mineral, presentes en la mezcla con asfalto espumado, se observa un porcentaje menor con respecto a la mezcla tradicional, esto, es atribuible a la humedad contenida en el interior de las partículas del agregado, consecuencia del proceso de curado, en el que el agregado pierde humedad gradualmente, liberando los espacios del agregado.

Los vacíos de la mezcla total, es la representación relativa de la diferencia entre la densidad máxima teórica y la densidad real de la mezcla, esta condición hace que los vacíos sea una representación directa de lo que ocurre con la densidad de la mezcla, podemos afirmar al observar los resultados, que a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla.

También se puede observar las características parabólicas de la línea de tendencia de la mezcla tradicional; esta característica debería repetirse más claramente en la gráfica de la mezcla con asfalto espumado. Aclarar, sin embargo, que ambas ecuaciones pertenecen al mismo tipo de parábola. Este fenómeno es consecuencia de la deshidratación total del agregado en la mezcla tradicional.

También se puede observar la ausencia de un punto en el gráfico de la mezcla asfáltica con asfalto espumado, producto de una depuración de datos que no obedecen a la característica principal de esta propiedad, que es la disminución de los vacíos hasta un mínimo, con el incremento del porcentaje de asfalto adicionado a la mezcla.

- **Vacíos del Agregado Mineral.**

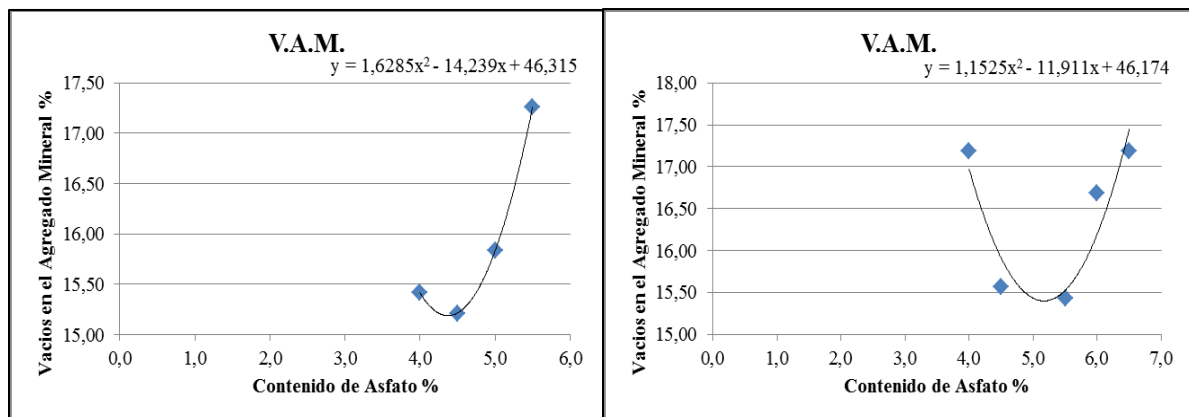
Comparativa de porcentaje de vacíos del agregado mineral

Tabla 3.39

Asfalto Espumado		Asfalto Tradicional	
%Asf	V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	%Asf	V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)
%	%	%	%
4	15,42	4	17,19
4,5	15,56	4,5	15,57
5	15,21	5	16,05
5,5	16,08	5,5	15,43
6	15,84	6	16,69
6,5	17,26	6,5	17,18

Comparativa de vacíos del agregado mineral

Figura 3.22



Observaciones.- Esta característica representa, como su nombre lo indica, los vacíos en el agregado mineral, como un porcentaje del total de la mezcla, en función de la

densidad máxima alcanzada. Siendo una constante en las características ya descritas, se puede observar comportamientos anómalos en la mezcla asfáltica con asfalto espumado, por la presencia de agua y la posible absorción de asfalto en las partículas del agregado, no obstante, la tendencia es la misma que sigue la mezcla tradicional, bastante similar a los vacíos de la mezcla total, donde el porcentaje baja, cuando la cantidad de asfalto aumenta, hasta llegar a un valor mínimo, a partir del cual los vacíos aumentan.

Al hacer una inspección detallada de los números que representan esta propiedad, es fácil apreciar, que en 4 de 6 puntos, con el mismo contenido de asfalto y mismos agregados, el porcentaje de vacíos del agregado mineral para la mezcla asfáltica con asfalto espumado es menor que el de la mezcla con asfalto tradicional.

- **Relación Betumen – Vacíos**

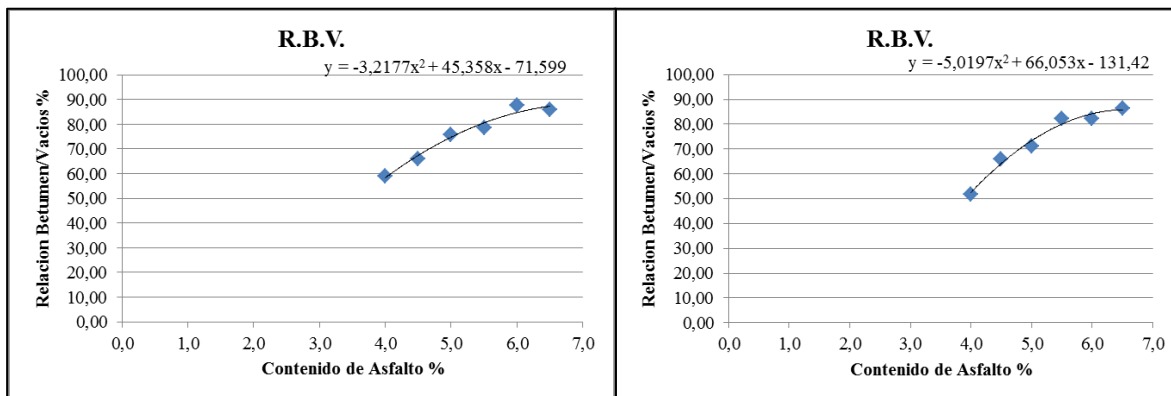
Comparativa de relación betumen - vacíos

Tabla 3.40

Asfalto Espumado		Asfalto Tradicional	
%Asf	R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)	%Asf	R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)
%	%	%	%
4	59,04	4	51,85
4,5	66,04	4,5	65,96
5	75,77	5	71,08
5,5	78,46	5,5	82,36
6	87,59	6	82,29
6,5	86,07	6,5	86,51

Comparativa de relación betumen – vacíos

Figura 3.23



Observaciones.- Esta propiedad refleja el porcentaje de vacíos del agregado mineral que contienen asfaltos. Como se puede observar en las gráficas, el contenido de betumen en los agregados aumenta en forma proporcional al porcentaje de asfalto; esta tendencia permanece así hasta llegar a un estado constante, en el que el agregado ha llegado a su estado de absorción máximo, o a su saturación total.

A simple vista, se puede apreciar que la relación Betumen – Vacíos es mayor en la mezcla con asfalto espumado, lo que llevaría a una conclusión prematura en la que se afirmaría que este tipo de mezcla absorbería una cantidad mayor de asfalto, conclusión que sería ilógica si recordamos que el agregado usado en esta mezcla no fue secado, y más aún fue llevado a un contenido de humedad mayor para su compactación. Esta es razón puntual por la que la mezcla con asfalto espumado aparenta una absorción mayor, pero una vez más, es importante señalar que es bastante probable que el agregado, además de contener asfalto, tenga un cierto porcentaje de agua contenida en su interior.

- Estabilidad Marshall

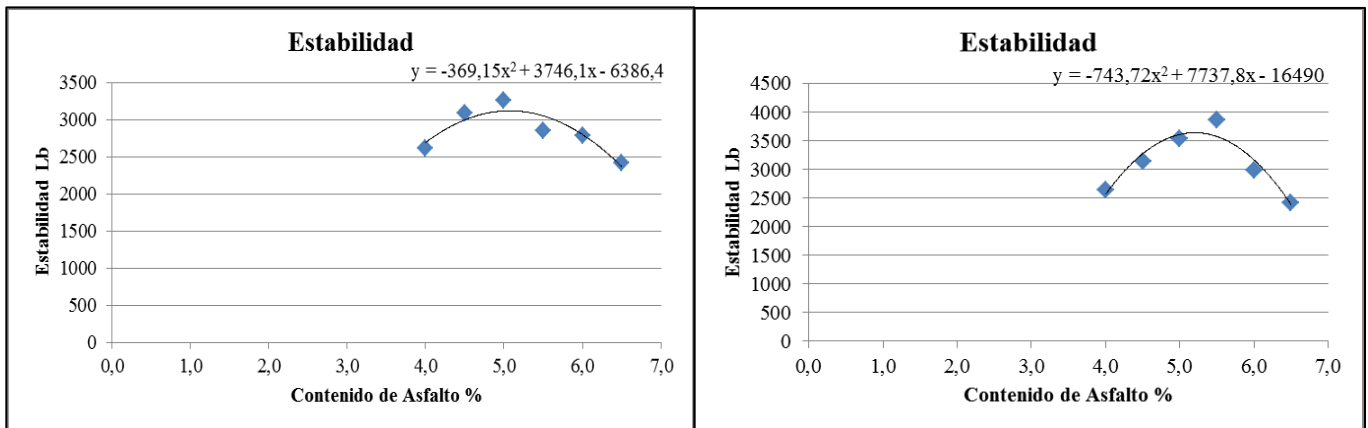
Comparativa de estabilidad Marshall

Tabla 3.41

Asfalto Espumado		Asfalto Tradicional	
%Asf	Carga Promedio	%Asf	Carga Promedio
%	Libras	%	Libras
4	2610	4	2641
4,5	3094	4,5	3131
5	3259	5	3524
5,5	2853	5,5	3863
6	2783	6	2986
6,5	2422	6,5	2410

Comparativa de estabilidad Marshall

Figura 3.24



Observaciones.- La estabilidad de una mezcla asfáltica es la medida de su resistencia a sufrir una deformación, como se mencionó anteriormente, una elevada estabilidad no es un sinónimo de calidad y durabilidad de la mezcla. Analizando los resultados obtenidos, se puede verificar que la mezcla asfáltica con asfalto tradicional alcanzó valores más elevados para 5 de 6 puntos en la curva de estabilidad Marshall, reflejando una mayor estabilidad que la mezcla asfáltica con asfalto espumado. Sin embargo, es importante mencionar, que todos los valores de este tipo de mezcla entran dentro de las especificaciones sugeridas por el Instituto de Asfalto para una mezcla asfáltica de pavimentación para vías con tráfico pesado (1800 lb). Característica que momentáneamente, hace aplicable el método.

- **Fluencia Marshall**

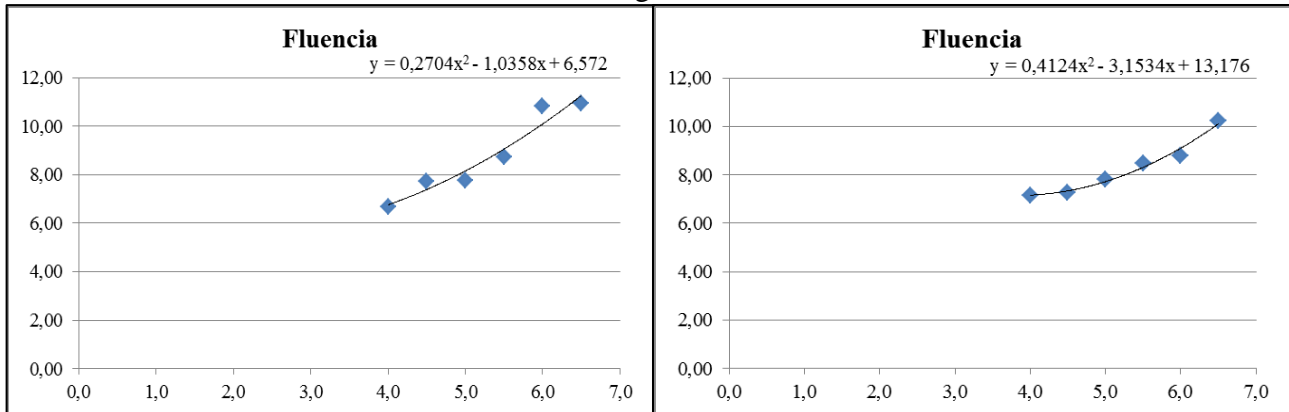
Comparativa de fluencia Marshall

Tabla 3.42

Asfalto Espumado		Asfalto Tradicional	
%Asf	Fluencia Promedio	%Asf	Fluencia Promedio
%	1/100"	%	1/100"
4	6,70	4	7,15
4,5	7,74	4,5	7,28
5	7,75	5	7,81
5,5	8,73	5,5	8,46
6	10,83	6	8,79
6,5	10,96	6,5	10,24

Comparativa de fluencia Marshall

Figura 3.25



Observaciones.- La fluencia de una mezcla asfáltica es la medida de la deformación, hasta el punto de ruptura o falla. Detallando las características observadas en ambas mezclas, es llamativo que ambas alcanzan una fluencia permitida por las especificaciones, para un mismo contenido porcentual de asfalto.

Es evidente también, que la tendencia de esta característica es a aumentar en proporción al incremento en el contenido de asfalto de la mezcla. Siendo el límite superior de las especificaciones 14 plg/100 y el inferior 8 plg/100, se confirma que ambas mezclas con los porcentajes máximos de asfalto aún permanecen dentro de estos límites.

Es apreciable también, que los valores de flujo más elevados corresponden a la mezcla con asfalto espumado; es razonable pensar, que esta condición está presente por el mismo motivo que se estuvo señalando a lo largo del análisis de resultados, cual es la presencia de agua en la mezcla, que puede actuar como un agente lubricante, permitiendo el desplazamiento entre las partículas de agregado con mayor facilidad que con una mezcla tradicional

- **Contenido óptimo de asfalto**

Como se puede observar en los gráficos de las características analizadas, todas las líneas de tendencia tienen una ecuación que define la trayectoria de los puntos correspondientes a la característica “y”, para un rango “x” de alternativas. Habiendo

definido las ecuaciones, y siendo conscientes de las especificaciones para la mezcla en diseño, se juega con el porcentaje de asfalto hasta encontrar un valor que satisfaga todos los parámetros de diseño.

El contenido óptimo de asfalto será el que satisfaga los parámetros principales del menor contenido de vacíos posible, y la menor relación Betunen Vacíos posible en un rango establecido por las especificaciones propias para la mezcla en diseño, lógicamente, cuidando que los demás parámetros se encuentren dentro del rango admisible.

De preferencia, se ajustará el contenido óptimo de asfalto al menor valor que cumpla con todas las especificaciones, por fines económicos.

Comparativa de contenido óptimo de asfalto

Tabla 3.43

M.A. Con Asfalto Espumado			M.A. Tradicional		
C.O.	Densidad	2,340	C.O.	Densidad	2,352
5,2 %	Estabilidad	3108,380	5,3%	Estabilidad	3629,245
	Fluencia	8,551		Fluencia	8,047
	Vacíos	3,602		Vacíos	3,469
	R.B.V	77,610		R.B.V	77,658
	V.A.M.	16,384		V.A.M.	15,419

Es apreciable en el cuadro resumen, que para la mezcla asfáltica con asfalto espumado, con un contenido óptimo de asfalto, menor al de la mezcla tradicional, se cumple con todas las especificaciones; sin embargo, el valor de estabilidad es más bajo.

Las diferencias en las otras características, son mínimas y dentro de los parámetros exigidos por las normas se cumple satisfactoriamente.

Es de hacer notar, que el asfalto espumado, además de cumplir con las especificaciones, tiene un porcentaje menor en 0.1 % que el asfalto tradicional, número que aparentemente puede parecer insignificante, pero que traducido en volúmenes de mezcla total puede ser equivalente a una gran suma de dinero.

3.4.4.5 RESUMEN COMPARATIVO

RESUMEN GENERAL

Tabla 3.43

CUADRO COMPARATIVO GENERAL			
CARACTERISTICA	CARACTERISTICA	MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO ESPUMADO	MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL
COMPORTAMIENTO DE LA PROPIEDADES MARSHALL ESTUDIADAS	Densidad Real (gr/cm ³)	2.340	2.352
	Densidad Máxima Teórica (gr/cm ³)	2.424	2.424
	Vacios de la Mezcla (%)	3.602	3.469
	Vacios del Agregado Mineral (%)	16.384	15.419
	Relación Betumen-Vacios (%)	77.610	77.658
	Estabilidad (Lb)	3108.38	3629.245
	Fluencia (1/100")	8.551	8.047
	Contenido Optimo de C.A. (%)	5.2	5.3
	Complejidad y reproductibilidad	Complejo de reproducir, equipo especial necesario.	Tradicional, bastante familiar para técnicos locales y ampliamente estudiado.
	Economía del Equipo (Bs.)	4.026.400	11.000.000
CARACTERISTICAS RELEVANTES, PERO EXTERNAS A LA INVESTIGACION	Versatilidad de Aplicación	Amplio rango de aplicación con diferentes tipos de agregados. Puede emplearse en la estabilización de suelos.	Granulometrias dentro de fajas definidas para determinados agregados. Solo aplicable a la construcción de caminos y carreteras.
	Eficiencia de Pavimentación (Rendimiento)	Pavimentación en camino.	Mezcla en planta y transporte hasta el sitio de pavimentación.
	Impacto Ambiental (No Estudiado)	No hay necesidad de secado del agregado, ahorro de energía.	Quema grandes volúmenes de gas en el secado del agregado.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Como consecuencia de una correcta elección del cemento asfáltico, y gracias a una recopilación de amplia información sobre las características necesarias para la elaboración de una mezcla asfáltica tradicional como para una con asfalto espumado, se consiguió caracterizar el asfalto como útil para el desarrollo de la investigación y dentro de las especificaciones provistas por el fabricante.
- Se comprobó que los agregados empleados en la elaboración de mezcla asfáltica por el Municipio de la Provincia Cercado, cumplen con las características necesarias para este fin; por consecuencia de esto, se llevó adelante la investigación, sin complicaciones por deficiencias en el agregado.
- Se demostró con la ejecución del presente proyecto de investigación, la reproductibilidad de los métodos de diseño de mezclas asfálticas con asfalto espumado para su aplicación en la construcción de nuevas carpetas de rodadura.
- Con la realización de ensayos de Relación de Expansión y Vida media se pudo determinar un porcentaje de agua de inyección, y una temperatura de asfalto, datos necesarios que permitieron obtener las características óptimas en la espuma de asfalto para poder mezclar de mejor manera el asfalto con el agregado.

Las características definidas durante la realización de este ensayo, sirven como un parámetro del comportamiento del asfalto en contacto con el agua en mayores cantidades, siendo necesario acomodar los resultados a criterio del diseñador puesto que cuando se realizaron los ensayos sobre una muestra de 50 cm³ la temperatura en el asfalto y la distribución del agua se hacen de forma más homogénea, a diferencia de cuando se espuma una mayor cantidad de asfalto.

- Se pudo fabricar un equipo para espumar el asfalto, en base a una olla a presión modificada, para poder medir la temperatura del asfalto, poder inyectar agua con precisión en el núcleo del asfalto caliente, y con un dosificador que permita cortar el flujo del asfalto espumado cuando se haya vertido la cantidad suficiente de asfalto.

Es de remarcar que el equipo utilizado para la realización de las prácticas, no es el estandarizado y que comercializa en los laboratorios de asfaltos; sin embargo cumple la función para la que fue diseñado.

Todo con la ayuda de un técnico tornero quien realizó los trabajos de soldado y perforación.

- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica tradicional, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, y se realizó el mismo procedimiento con briquetas de asfalto espumado, para poder comparar detalladamente cada una.

Las conclusiones que se destacan de este análisis son:

- En la mezcla asfáltica con el asfalto espumado se obtuvo una estabilidad máxima de 3116,94 lb representando un 85.72% de la resistencia máxima alcanzada con una mezcla tradicional, este valor fue de 3636.33. Siendo un indicador que la mezcla con asfalto espumado es menos resistente, más aun cumple cómodamente con las especificaciones para el tipo de mezcla de diseño. La mezcla tradicional ofrece una mayor resistencia consecuencia de la cohesividad entre sus partículas.
- La densidad máxima obtenida con una mezcla con asfalto espumado fue de 2.34 gr/cm³, que representa el 99.54% de la máxima densidad obtenida por el método tradicional con un valor de 2.35 gr/cm³, consecuencia del agua presente en el agregado luego de 48 horas de secado.
- Para alcanzar el valor mínimo de vacíos de la mezcla (3%), usando asfalto espumado se necesitó de un porcentaje de 5.53% de asfalto en la mezcla, que representa el 99.64% del valor necesario en la mezcla tradicional, ligeramente menor como consecuencia del contenido de humedad presente en el agregado.
- En la mezcla con asfalto espumado, la relación de Betumen-Vacíos, que define el porcentaje de vacíos en el agregado que son llenados con asfalto fue conseguida con un porcentaje de 5.02% representando el 98.23% del valor de la mezcla tradicional, con la que se necesitó un 5.11% de asfalto, como consecuencia del agua que ocupa los poros en el agregado.

- El contenido óptimo de asfalto en mezclas con asfalto espumado fue de 5.2%, frente a un 5.3% del valor de la mezcla tradicional, como consecuencia de la humedad previa en el agregado, que disminuye la absorción de asfalto.
- El agua adicionada al agregado para alcanzar el “Contenido Optimo de Humedad de Compactación” no tiene que ser descontado del peso del agregado, sino más bien sumado a los 1200 gr de la mezcla final, puesto que el agua de compactación es adicionada a la mezcla con fines puramente constructivos, no siendo parte permanente del sistema “Agregado – Cemento Asfáltico” y desapareciendo por evaporación en el proceso de curado de la mezcla.
- Las propiedades de las mezclas asfálticas, siguen las tendencias establecidas en la bibliografía, obedeciendo a un comportamiento en función únicamente del contenido de asfalto adicionado a la mezcla.
- Las mezclas asfálticas con asfalto espumado, por su condición de mezclas en frío y húmedo, contienen una cierta cantidad de agua, ya sea proveniente de su estado natural, o remanente del agua de mezclado adicionada, que desaparece gradualmente, fortaleciendo la unión entre partículas de agregado. Se puede plantear una nueva hipótesis a raíz de los resultados encontrados, donde pueda verificarse que la tendencia de las características mecánicas de la mezcla son: “aumenta la estabilidad y se reduce la fluencia, con la evaporación del agua en el agregado”.
- El asfalto espumado es una tecnología en proceso de investigación; sin embargo, se han efectuado estudios alrededor del mundo en los que se ha demostrado su aplicabilidad como alternativa al método tradicional. Con la realización del presente proyecto de investigación, se consiguió demostrar técnicamente que un asfalto espumado reúne las características físicas y mecánicas requeridas por las entidades encargadas de la construcción de vías a nivel nacional e internacional.
- Finalmente, se ha demostrado que es posible investigar sobre tecnologías nuevas utilizando el ingenio, para transformar problemas complicados en soluciones simples, ecológicas y eficientes.

4.2 RECOMENDACIONES (no recomendar para usos no investigados como estabilización o bases y sub bases)

De seguridad

- Para realizar los ensayos de Relación de Expansión y Vida media, es necesario añadir directamente al asfalto caliente cantidades medidas de agua, que al entrar en contacto, generan una reacción explosiva; lastimosamente, para definir estas características se tiene que poder observar el volumen final que alcanza el asfalto y el tiempo que dura la espuma, lo que expone al observador a posibles quemaduras haciendo indispensable un equipo mínimo de seguridad como:
 - Guantes para manipular cosas calientes, o guantes de cuero.
 - Gafas de seguridad.
 - De preferencia ropa vieja, o si es posible un overol que cubra los brazos.
- En caso de una quemadura con asfalto, aplicar agua o hielo inmediatamente, no remover el asfalto de la piel y tampoco cubrir con una venda, recurrir inmediatamente a un médico.
- El sulfuro de hidrógeno es un producto de la reacción entre el hidrógeno y el azufre presentes naturalmente en el asfalto. Con concentraciones bajas no es peligroso; sin embargo en concentraciones altas o en tiempos de exposición prolongados y en ambientes cerrados como los que se pueden presentar en laboratorios o tanques de almacenamiento, puede llegar a ser letal. Por esta razón es recomendable mantener la cara lo más alejada posible de calderos de asfalto, o escotillas de depósitos de almacenamiento, mantener los ambientes de trabajo lo más ventilados posible, o trabajar con la cara en dirección del viento.

Técnicas

- La determinación de una temperatura y cantidad de agua de inyección, no definen exactamente las características que tendrá el asfalto espumado, siendo necesario, el uso del criterio a momento de producir las mezclas para incrementar el porcentaje de agua o la temperatura del asfalto para obtener los mejores resultados.

- Para la dosificación de las briquetas se recomienda no descontar del agregado el peso del agua de compactación, ya que posteriormente el agua se evapora y no es parte de la mezcla “Agregado – Asfalto”
- El tiempo de curado de las briquetas debe ser extendido de 48 horas a 72 dentro del horno a 60°C, con la finalidad de eliminar toda el agua adicional en la mezcla, que pueda distorsionar los valores de las características Marshall.
- Hacer un estudio más profundo, sobre las ventajas del asfalto espumado a nivel económico–ambiental, desde el punto de vista del ahorro económico en la ausencia de uso de gas u hornos de cualquier tipo en el secado del agregado, de la eficiencia de la construcción en camino del método y la diferencia de precios entre un equipo pavimentador de asfalto espumado y una planta asfáltica tradicional.