

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TEMPLADAS CON ADICIÓN DE UNA EMULSIÓN SÚPER-ESTABILIZADA

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La producción de mezclas asfálticas para pavimentos, se realiza a través de un proceso que involucra elevadas temperaturas de trabajo (160°C - 180°C) tanto para los agregados como el asfalto (Mezclas Asfálticas en Caliente: MAC). Las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) generan elevados costos de fabricación y contaminación ambiental debido al gran consumo de combustibles. En las últimas décadas la industria del asfalto ha estado experimentando con nuevos tipos de tecnologías que permitan disminuir el consumo energético sin afectar significativamente las propiedades mecánicas y el desempeño de las mezclas asfálticas. Las exigencias de reducir las emisiones de los procesos de producción de alto consumo energético han presentado un desafío de ingeniería mayor, en donde la industria asociada a los procesos de construcción y mantenimiento de caminos de asfalto se ha planteado varios desafíos específicos. Entre los desafíos se encuentra aquel de utilizar técnicas de producción de mezclas asfálticas que empleen menores temperaturas: Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) o Warm Mix Asphalt (WMA). Las Mezclas Asfálticas Templadas han demostrado que pueden lograr desempeños equivalentes a las Mezclas Asfálticas en Caliente.

Se considera una Mezcla Asfáltica Templada cuando las temperaturas de mezclado se reducen entre 10°C a 75°C respecto a las temperaturas empleadas en Mezclas Asfálticas en Caliente. Estas mezclas asfálticas se pueden lograr a través del empleo de aditivos o modificaciones en el proceso de mezclado permitiendo una mezcla homogénea sin necesidad de alcanzar rangos de temperatura de 160°C a 180°C. En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas para la fabricación de mezclas MAT que incluyen desde modificaciones a las plantas de mezclado para espumar asfalto o agregar diversos tipos de aditivos. A este grupo de técnicas se le ha agregado una más en los últimos

años la cual utiliza “Emulsión Súper-Estabilizada”, emulsiones asfálticas capaces de ser estables al transporte y al almacenamiento durante largos periodos de tiempo. Este tipo de emulsiones se producen con una formulación especial otorgándole mayor estabilidad lo cual en definitiva permite producir mezclas asfálticas a temperatura promedio entre 120°C a 140°C. La patente de esta emulsión pertenece a la empresa Repsol de España. La fabricación de mezclas asfálticas templadas con esta emulsión se lleva a cabo precalentando los áridos a una temperatura de 120°C, mientras la emulsión se mantiene a 60°C, paso seguido se mezclan áridos y emulsión obteniendo una temperatura de mezclado entre los 115°C a 120°C. A diferencia de las mezclas en caliente, los mecanismos que controlan el mezclado, colocación y compactación a este tipo de mezclas no se basan en la viscosidad del asfalto, si no en la estabilidad de la emulsión.

En este trabajo de investigación se pretende realizar un estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con Emulsión Súper-Estabilizada (MAT-ESE). El estudio se centra en las propiedades mecánicas especialmente: Peso Volumétrico, Estabilidad y Fluencia. Se busca probar a nivel de laboratorio que una mezcla tipo MAT-ESE es posible utilizarla en la estructura de un pavimento asfáltico no solo como capa estructural intermedia sino que además como capa estructural superior o capa de rodado.

Se considera que este tipo de mezclas MAT pueden utilizarse de la misma forma que una mezcla MAC. En estos momentos la posibilidad de encarar Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) es algo más apropiado para nuestra región por las temperaturas que tiene para varios tipos de provincias que tenemos en el departamento. El uso de mezclas MAT trae una serie de ventajas en comparación con la producción de mezclas MAC, siendo las principales: reducción de emisiones, reducción del gasto energético, posibilidad de transportar la mezcla por mayores distancias, reducción en la exposición de los trabajadores a vapores generados en el proceso de fabricación de mezclas MAC.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En nuestro país, debido a que no se conocen las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT), y en la construcción de calles y carreteras, generalmente se utilizan Mezclas en Caliente y Mezclas en Frío; es importante tener conocimiento sobre las Mezclas Asfálticas Templadas con Emulsión Súper-Estabilizada (MAT-ESE) ya que esta alternativa de diseño tiene ventajas de ahorro en su costo de producción en comparación con las Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), además de que los resultados de durabilidad de la capa de rodadura construida con mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica han presentado buenos resultados según la información encontrada sobre proyectos construidos en países como Estados Unidos, España y Argentina entre otros.

La alternativa Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) busca mejorar los procesos de producción al disminuir la temperatura teniendo como resultado una mayor trabajabilidad, facilitándoles a los trabajadores el colocar y compactar la mezcla en obra; permitiendo así, que los mismos tengan un menor riesgo de sufrir daños severos por las altas temperaturas con las que se manipulan las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC).

Actualmente, en el campo de los pavimentos flexibles, la incesante búsqueda por ser amigables con el medio ambiente y la creciente necesidad de cuidar nuestros recursos naturales; ha promovido la aceptación a nivel mundial, de las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) con todo tipo de aditivo. La Mezcla Asfáltica Templada (MAT) cumple con lo establecido por el Protocolo de Kioto que pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmósfera, haciendo que la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), quede obsoleta en diversos países.

La Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada (MAT-ESE) ofrece la viabilidad de ser más económico en muchos aspectos a nivel técnico, como el menor costo en manufactura y transporte, el tiempo de compactación y colocación de la mezcla con Emulsión Súper-Estabilizada es sensiblemente menor; permitiendo innovar

y tener un crecimiento económico sustentable en los tiempos de crisis económicas, como se vive actualmente, por tanto su conocimiento y difusión se vuelve de importancia.

Estas mezclas representan una opción nueva de capa de rodadura para pavimentos, estudiarlas y aprender de su comportamiento desde el momento de la selección de su granulometría para establecer el diseño de la mezcla es necesario, la información que ello brinde facilitará la investigación a las empresas o instituciones cuyas actividades involucren las mezclas asfálticas ya sea en construcción, diseño o simplemente gestión.

Finalmente, los estudiantes y profesionales podrán tener una herramienta más que les permitirá realizar proyectos similares con mucha mejor capacidad de obtención de los resultados y planteamiento de soluciones que le permitan tomar decisiones que sean más funcionales y económicas para la solución del problema.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA

En nuestro país, las mezclas asfálticas que se producen para su uso en carreteras son las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas en frío. Sin embargo existe un tipo de mezcla asfáltica denominada Templada, la cual ha surgido hace poco tiempo y está siendo implementada en algunos países de Europa y América.

Actualmente en nuestro país, no han sido utilizadas en la construcción de carreteras, debido a esto, es de mucha importancia realizar un estudio que nos permita conocer el diseño y las características que este nuevo tipo de mezcla asfáltica presenta.

Se pretende utilizar emulsión súper-estabilizada, porque logran mayores reducciones de temperatura en la fabricación de mezclas, permiten mayor carga, mejor tipo de mezcla, son emulsiones asfálticas capaces de ser estables al transporte y al

almacenamiento durante largos periodos de tiempo, por lo que resulta conveniente contar con emulsión súper-estabilizada aplicado a las condiciones de nuestro país.

La opción de las mezclas asfálticas templadas con emulsión súper-estabilizada para la construcción de pavimentos asfálticos, se vuelve una alternativa muy atractiva por las ventajas económicas que presenta en su producción y la colocación en obra, en contraposición con el uso de las mezclas asfálticas en caliente y frías. Debido a la creciente necesidad de encontrar soluciones que representen una economía en las inversiones y que al mismo tiempo permitan un desarrollo sostenible.

La producción de mezclas asfálticas templadas con emulsión súper-estabilizada, en comparación con los métodos tradicionales de mezclado asfáltico en caliente, implica un ahorro en el consumo de energía, además que permanece trabajable por mayores períodos de tiempo. En la actualidad la mezcla asfáltica en caliente emite mucho dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, ayudando de alguna manera a que se originen diversos daños ambientales, por tanto la mezcla asfáltica templada con emulsión súper-estabilizada se vuelve una tecnología verde y sustentable, que reduce la emisión de gases efecto invernadero.

Es posible que mediante un estudio de las propiedades mecánicas con emulsión súper-estabilizada, podría mejorar las condiciones de trabajo garantizando la resistencia de diseño sin reducir, ni afectar dichas propiedades y más al contrario verificar si en todo caso llega a incrementar.

1.3.2. PROBLEMA

¿La elaboración de Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada (MAT-ESE) podrá mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica que será utilizada en pavimentos de nuestra región y nos permitirá conocer el comportamiento de la misma?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- ✚ Realizar una investigación sobre las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas templadas conformadas con emulsión súper-estabilizada, lo cual permita evaluar la incidencia de este tipo de emulsión en las propiedades de la mezcla asfáltica templada conformada con agregados de nuestra región.

1.4.2. Objetivos Específicos

- ✚ Analizar el marco teórico referente a características y propiedades de mezclas asfálticas, su composición y la utilización de emulsión para su conformación.
- ✚ Definir los aspectos que tienen que ver con las Mezclas Asfálticas Templadas, además de la utilización de Emulsión Súper-Estabilizada.
- ✚ Realizar la caracterización de los agregados que se utilicen en la elaboración de la Mezcla Asfáltica Templada, mediante los ensayos correspondientes.
- ✚ Identificar aquellos rasgos peculiares o propios de la Emulsión Súper-Estabilizada mediante su caracterización.
- ✚ Diseñar la Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada mediante el método Marshall.
- ✚ Determinar los resultados de las propiedades de la Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada.

- ✚ Evaluar el efecto de la incorporación de Emulsión Súper-Estabilizada en Mezclas Asfálticas Templadas.

- ✚ Establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio de Mezclas Asfálticas Templadas con Emulsión Súper-Estabilizada.

1.5. HIPÓTESIS

Si ejecutamos Mezclas Asfálticas Templadas con la adición de Emulsión Súper-Estabilizada, entonces obtendremos propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas diferentes, cuyos resultados permitirán tomar las decisiones técnicas más adecuadas.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Identificación de variables

Variable Independiente: Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión.

Variables Dependientes: Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas especialmente:

- Estabilidad
- Fluencia
- Peso Volumétrico

1.6.2. Conceptualización y operacionalización de las variables

❖ **VARIABLE INDEPENDIENTE:**

Tabla 1. Variable independiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión	Estas mezclas se basan en el empleo de un nuevo tipo de emulsiones asfálticas desarrolladas, las cuales permiten un proceso de mezclado a temperaturas entre 115°C a 120°C.	Tipo de evaluación	Experimental dentro de laboratorio	Se realizaran ensayos.

Fuente: Elaboración propia

❖ **VARIABLES DEPENDIENTES:**

Tabla 2. Variables dependientes

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas	Son las propiedades de resistencia	Tipo de Propiedades	Estabilidad	Determinado por el equipo Marshall.
			Fluencia	Determinado por el equipo Marshall.
			Peso Volumétrico	Determinado por una ecuación.

Fuente: Elaboración propia

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidad de estudio

La presente investigación comprende el estudio de las Mezclas Asfálticas para pavimentos, que se realiza a través de un proceso que involucra elevadas temperaturas de trabajo, tanto para los agregados como el asfalto.

1.7.1.2. Población

Mezclas asfálticas que empleen menores temperaturas, como las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) las cuales han demostrado que pueden lograr desempeños equivalentes a las mezclas asfálticas en caliente, lo que no significa necesariamente que otro tipo de mezclas sean inviables para la construcción de buenos pavimentos asfálticos.

1.7.1.3. Muestra

El comportamiento de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada y con Emulsión Convencional, que será determinado mediante los ensayos de laboratorio correspondientes.

Para la obtención de la Emulsión Súper-Estabilizada y de la Emulsión Convencional, de un turril donde están las muestras de 200 litros se tomara una muestra lo suficientemente representativa para realizar la caracterización del mismo y los ensayos de laboratorio necesarios para el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada. Los agregados que se utilizaran para el estudio serán de la región, provenientes de la Chancadora Garzón, en cantidades lo suficientemente necesario para su caracterización y hacer el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada.

1.7.1.4. Muestreo

Lo que se va a muestrear van a ser los agregados, la Emulsión Súper-Estabilizada y la Emulsión Convencional, el muestro se realizara con la caracterización de los agregados, de la Emulsión Súper-Estabilizada y de la Emulsión Convencional, que son ensayos de laboratorios para determinar o identificar aquellos rasgos peculiares o propios de los materiales a utilizar en la mezcla, la muestra de Emulsión Súper-Estabilizada y de Emulsión Convencional estarán en un recipiente en este caso en una botella, la muestra de los agregados que se utilizaran para la Mezcla Asfáltica Templada estarán en bolsas en las cantidades necesarias.

1.7.2. Métodos y técnicas empleadas

1.7.2.1. Definición, selección y/o elaboración de los métodos y técnicas en función del objeto y los objetivos.

El método inductivo, sin dudas, es uno de los métodos más populares a la hora de la investigación científica y del pensamiento, en tanto, su característica más saliente y distintiva es que llega a la obtención de conclusiones o teorías sobre diversos aspectos a través del análisis de casos particulares. Por esta manera que presenta es que popularmente se dice que el método inductivo consiste en ir de lo particular a lo general.

El trabajo de investigación consiste en realizar la caracterización de los agregados, de la Emulsión Súper-Estabilizada y de la Emulsión Convencional, además de llevar a cabo los ensayos de laboratorio necesarios para saber la resistencia y el comportamiento de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada y de una Emulsión Convencional, los métodos y las fórmulas para determinar los aspectos recién mencionados tiene que ver con parámetros y metodologías ya establecidas, ya elaboradas y realizadas en otros tipos de mezclas asfálticas, donde los resultados nos ayudaran a saber el

comportamiento que presentan las propiedades mecánicas especialmente peso volumétrico, estabilidad y fluencia, con materiales diferentes a utilizar pero con métodos ya conocidos, de esta forma se llegara a la obtención de las conclusiones del trabajo de investigación.

Se califica de **experimental** a una situación, objeto o fenómeno siempre que se lo entienda como el resultado de una prueba que busca variar los parámetros normales para tal elemento o experiencia y que todavía no ha sido establecido oficialmente como nuevo elemento. Un experimento siempre supone la práctica de prueba y contraprueba con el fin de obtener nuevas soluciones, posibilidades y elementos que puedan aplicarse a determinadas situaciones. De tal modo, experimental será todo aquello que se cree a modo de búsqueda.

Para la realización de mi trabajo de investigación iré al laboratorio y hare los ensayos de granulometría, equivalente de la arena, peso unitario del agregado grueso y fino, desgaste por medio de la máquina de los ángeles, peso específico y absorción del agregado grueso y del agregado fino, determinación de partículas laminares, chatas y alargadas, ensayo de viscosidad saybolt-furol, ensayo de penetración, ensayo punto de inflamación y ensayo de residuo por destilación, que son técnicas conocidas.

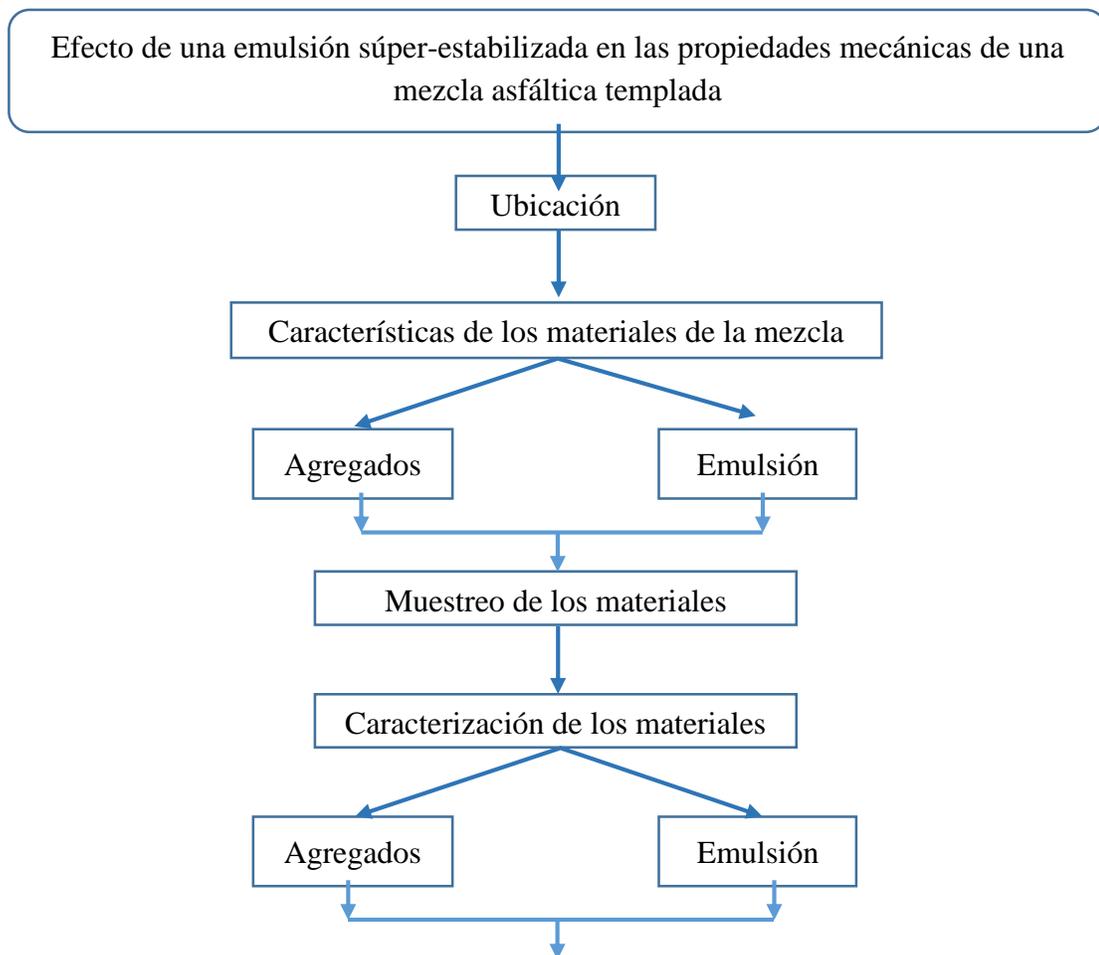
1.7.2.2. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos.

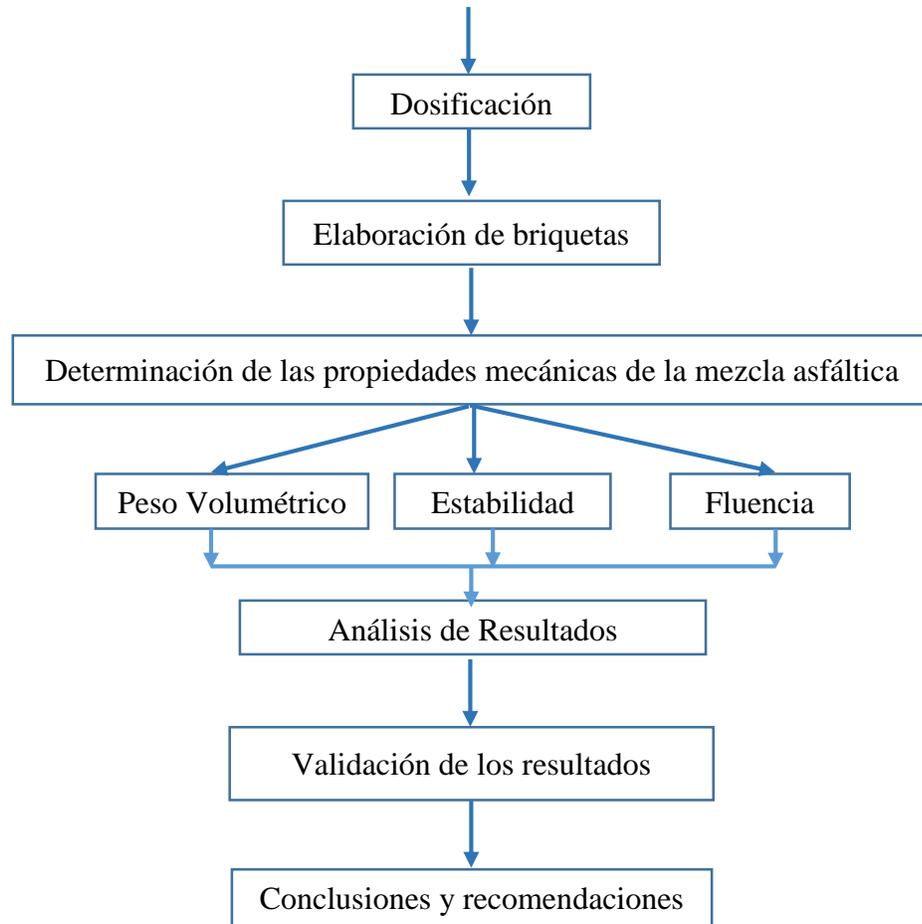
Para la obtención de datos de mi trabajo de investigación voy a utilizar el laboratorio de suelos y asfalto, donde para la caracterización de los agregados utilizare juego de tamices, horno eléctrico, balanza, equipo y materiales para el ensayo equivalente de arena, moldes, varilla y bandejas para el peso unitario del agregado grueso y fino, equipo y materiales para el peso específico y absorción como el canastillo y el matraz, máquina de los ángeles.

Para la caracterización de la emulsión utilizare el equipo y materiales para el ensayo de viscosidad saybolt-furol como frascos, termómetro y el viscosímetro Saybolt, equipo y materiales para la penetración como el penetrómetro, punto de inflamación como la copa abierta Cleveland, equipo y materiales para el residuo por destilación.

Para la dosificación y elaboración de briquetas utilizare moldes con sus respectivas bases y collarines, martillo de compactación y extractor de probetas, para la determinación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica templada utilizare un vernier, balanza y el equipo Marshall para la rotura de las briquetas.

1.7.2.3. Procedimientos de aplicación





A continuación se describirá el procedimiento del flujograma del estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada.

Primeramente ubicar los materiales con los que voy a trabajar, luego realizare las características de los materiales que voy a utilizar en la mezcla asfáltica templada, donde describiré el banco de materiales que utilizare y donde mostrare la hoja técnica de la emulsión, posteriormente hare el muestreo de los materiales, donde explicare como obtuve los agregados como la grava, gravilla y arena, además de como obtuve la emulsión.

Luego voy a caracterizar los materiales, esa caracterización implica que para los agregados voy a hacer los ensayos de granulometría, equivalente de la arena, peso unitario del agregado grueso y fino, desgaste por medio de la máquina de los ángeles, peso específico y absorción del agregado grueso y del agregado fino, determinación de partículas laminares, chatas y alargadas, y

Luego voy a caracterizar la emulsión, para ello voy hacer los ensayos de viscosidad saybolt-furol, ensayo de penetración, ensayo punto de inflamación y ensayo de residuo por destilación.

Posteriormente voy a realizar los cálculos para la dosificación de la Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada y con Emulsión Convencional, donde determinare las proporciones de agregados para que cumplan con las especificaciones de la banda TM-25 del Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras. Después determinare las proporciones de emulsión mediante el Manual Básico De Emulsiones Asfálticas, donde adoptare el contenido óptimo de emulsión asfáltica y realizare pruebas a briquetas que estén por arriba del contenido óptimo y por debajo, para conocer el comportamiento de sus propiedades mecánicas, especialmente Peso Volumétrico, Estabilidad y Fluencia.

De esta forma se tendrán los resultados de contenidos de agregados, de Emulsión Súper-Estabilizada y de Emulsión Convencional para una briqueta de 1200 gramos, hare tres grupos de briquetas por cada contenido de emulsión y haciendo 6 briquetas por punto de emulsión, al igual que hare 6 briquetas para la validación de resultados, a continuación se muestra una tabla con el total de cantidades de briquetas.

Tabla 3.Cantidad de briquetas

	Porcentaje de Emulsión (%)	Descripción	Número de briquetas(Unidad)	
Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión	P1	Peso Volumétrico	3	
		Marshall	3	
	P2	Peso Volumétrico	3	
		Marshall	3	
	P3	Peso Volumétrico	3	
		Marshall	3	
	Validación	Peso Volumétrico	3	
		Marshall	3	
			total	24

MAT con Emulsión Convencional	24
MAT con Emulsión Súper-Estabilizada	24
TOTAL cantidad de briquetas	48

Fuente: Elaboración propia

De esta forma comencare a realizar la mezcla asfáltica templada con emulsión, mediante la elaboración de las briquetas, para posteriormente realizar un procedimiento de preparación de las muestras de mezcla.

Luego determinare las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica especialmente peso volumétrico, estabilidad y fluencia, utilizare una ecuación y el equipo Marshall para determinar estas propiedades mecánicas, luego hare una evaluación del comportamiento de las propiedades mecánicas de la Mezcla Asfáltica Templada con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada, de esta forma poder hacer un análisis de los resultados de la mezcla, posteriormente hare la validación de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, para finalmente establecer las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

1.7.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

1.7.3.1. Tratamiento de los datos (empleo de la estadística)

La estadística descriptiva

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

La Media Aritmética

En la práctica la medida de posición de mayor uso y más conocida es la Media Aritmética, a la Media Aritmética se la conoce directamente como Media o Promedio, la Media Aritmética es una medida de tendencia central.

De un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , se denota \bar{X} a su Media aritmética y se define como la suma de todos los valores observados en la Muestra, dividida entre el número total de datos n .

$$\bar{X} = M_{(X)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

La Mediana

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por $Me_{(X)}$ o por \bar{A} se define como el valor central de un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene de un número impar de datos la Mediana será el valor del dato central $X_{(n+1)/2}$; Para un número par de datos se calcula la Media de los datos centrales: $X_{n/2}, X_{n/2+1}$

La Moda

Otra medida de posición de amplio uso es la Moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , la Moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por $Mo_{(X)}$. En algunos conjuntos de datos, la Moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

La Varianza

Es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de mayor uso, en especial su uso es más amplio en la Estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la Varianza poblacional o la Varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Varianza de una población o Varianza poblacional se designa por σ^2 (Sigma cuadrado), la Varianza de una muestra o Varianza muestral se designa por s^2 .

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ La Varianza se calcula como:

$$\text{Varianza Poblacional } \sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} = \overline{(X - \mu)^2}$$

$$\text{Varianza Muestral } s^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum X)^2}{n(n-1)}$$

Donde la Media Aritmética de una población y de una Muestra respectivamente son μ, \bar{X} (Su modo de cálculo es el mismo), se toma en cuenta que el total de datos se representa por N, n para una población o muestra respectivamente.

Desviación Estándar

Con base en la Varianza, otra medida de dispersión es la Desviación Estándar, o Desviación Típica. Según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la Desviación Estándar poblacional o la Desviación Estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Desviación Estándar de una población se designa por σ (Sigma). La Desviación Estándar de una muestra se designa por s . Son las raíces cuadradas de las Varianzas de una población o muestra respectivamente, por tanto:

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ La Desviación Estándar se calcula por:

$$\text{Desviación Estándar Poblacional } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{(X - \mu)^2} ; N = \sum_{j=1}^k f_j$$

$$\text{Desviación Estándar Muestral } s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{(X - \bar{X})^2} ; n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde μ, \bar{X} son la Media Aritmética de una población o de una muestra (Poseen el mismo valor).

Coefficiente de Variación

Se llama también Coeficiente de dispersión, es una medida de dispersión relativa, permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos que no necesariamente poseen la misma frecuencia total (Número total de datos).

Para un conjunto de datos, se llama Coeficiente de Variación al cociente de la Desviación Estándar muestral entre su Media Aritmética:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100$$

Este coeficiente se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que un Coeficiente de Variación menor a 50% significa baja dispersión, es decir que la Media Aritmética es una buena representación de un conjunto de datos. Si es mayor al 50% significa alta dispersión, la Media Aritmética en tal caso no es una buena representación.

1.8. ALCANCE

El proyecto de investigación considera realizar un estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con Emulsión Súper-Estabilizada (MAT-ESE). El estudio se centra en las propiedades mecánicas especialmente: Estabilidad, Fluencia y Peso Volumétrico

Se establecen los elementos fundamentales para la realización de este trabajo de investigación, por lo que en primera instancia se hará una introducción del tema central, el porqué de esta investigación se detallará en el siguiente punto a través de las justificaciones, luego se procederá a la situación problemática que será la base del desempeño del trabajo de investigación puesto que en él se plasmarán los puntos que a nuestro juicio son de vital importancia para el desarrollo de trabajos relacionados y que hasta el momento no tienen una solución completamente satisfactoria, luego se

mencionara el problema, posteriormente se establecerán cuáles son los objetivos, tanto de forma general como específica, luego se estipulará la hipótesis con la que se cuenta para la ejecución de esta investigación, se definirá las variables (Dependiente e Independiente), posteriormente se realizara el diseño metodológico en donde se presentan los componentes, métodos y técnicas empleadas, procedimiento para el análisis y la interpretación de la información y por último el alcance.

Se establecen los aspectos generales de las mezclas asfálticas, así que en primera instancia se hará una definición, se mencionara los componentes y las características del pavimento flexible, luego se hará una definición, clasificación, componentes, características y propiedades de la mezcla asfáltica, seguido se presenta la mezcla asfáltica con emulsión donde se hará las generalidades, la definición y los antecedentes de la mezcla asfáltica templada, posteriormente se establecerá la definición, tipos y el empleo de emulsiones asfálticas, así como también el empleo de emulsiones asfálticas tradicionales con aditivos químicos y el empleo de emulsiones asfálticas súper-estabilizadas, también las propiedades básicas de la emulsión, posteriormente el diseño de la mezcla con emulsión, donde se menciona los agregados, el agua, el emulsificante y el cemento asfáltico y por último el método Marshall.

Se establece la mezcla asfáltica templada con emulsión, por lo que en primera instancia se hará la ubicación de los materiales, el porqué de los materiales se detallará en el siguiente punto a través de las características de los materiales, donde se presentara la característica del banco de materiales y la característica de la emulsión, luego se hará el muestreo de los materiales, posteriormente se hará la caracterización de los materiales, que son ensayos de laboratorio que se harán a los agregados que se utilizaran en la mezcla, otro tipos de ensayos se harán a la emulsión asfáltica, luego se procederá a la dosificación de la mezcla en donde se presentan la determinación de proporciones de agregados y de la emulsión asfáltica, posteriormente se hará la preparación de las muestras de mezcla, después se determinara y evaluara el

comportamiento de las propiedades mecánicas, luego se presentaran los análisis de resultados de la mezcla y finalmente se hará la validación de resultados.

Se establecen las conclusiones y recomendaciones del proyecto, y por último la bibliografía, donde se utilizaron libros, tesis y manuales para la realización del proyecto.

CAPÍTULO II. ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

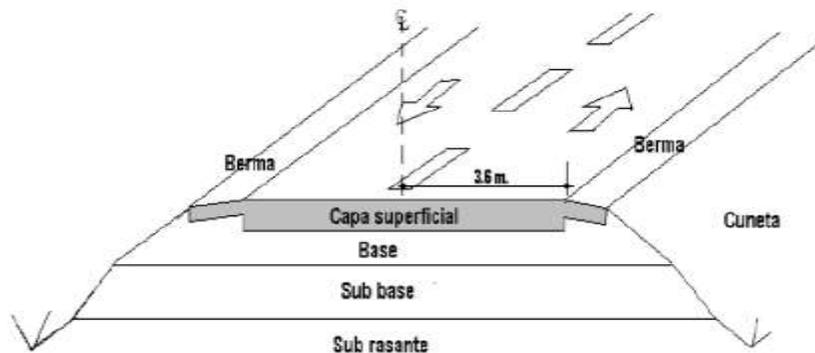
2.1. Pavimento Flexible

2.1.1. Definición

Se denomina Pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de Pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings. Los Pavimentos Asfálticos o Flexibles son aquéllos contruidos con materiales asfálticos y materiales granulares

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas dependencias de las necesidades particulares de cada obra. (Escobar, 2012)

Figura 1. Estructura típica de un pavimento asfáltico flexible



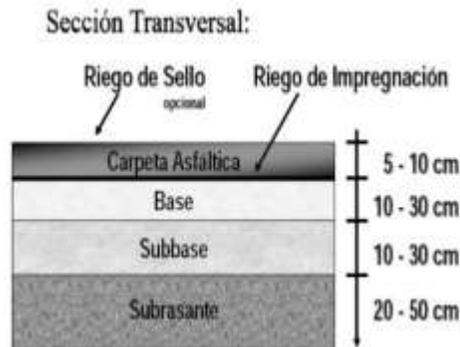
Fuente. (Escobar, 2012)

2.1.2. Componentes

El Firme flexible o asfaltico está formado por varias capas, como se observa en la Figura 2, dentro de las cuales se encuentra la sub-rasante, la sub-base, la base, estas dos últimas son elementos estructurales, que al estar ligados con la superficie, tienen por

objetivo distribuir las cargas del tránsito a las sub-rasante, y por último encontramos la carpeta asfáltica, aquí se presentan las mezclas asfálticas utilizadas en los pavimentos, que están constituidas por gravas, arena y ligante, se pueden encontrar cementos asfálticos, emulsiones o asfaltos cortados.

Figura 2. Sección donde se pueden apreciar las capas del pavimento flexible



Fuente. (Rafael, 2007)

Dentro de las principales funciones en conjunto de las capas del Firme flexible tenemos:

- Tener la impermeabilidad necesaria para que impida la filtración del agua, afectando principalmente la capacidad de soporte del suelo.
- Resistir de la mejor manera las cargas generadas por el tránsito, sin que estén produzcan deformaciones de ningún tipo en la estructura, considerando el espesor como factor fundamental.
- Soportar los diferentes agentes atmosféricos, esperando que no se generen problemas como la meteorización y alteración de los materiales que forman el pavimento, por lo que se debe poner atención en los materiales para que resistan lo agentes físicos y químicos.
- Debe contar con una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y confort durante el tránsito de vehículos, siendo esta de aspecto agradable y entregarles seguridad a los usuarios.
- Poseer flexibilidad para adaptarse a las posibles fallas que se pueden presentar durante su vida de servicio.

Así mismo el pavimento debe ofrecer una superficie buena y resistente, con una rugosidad mínima para poder garantizar la fricción con las llantas de los vehículos, como también debe contar con un color adecuado para evitar deslumbramientos y/o reflejos.

Sub base de un Firme Flexible

Esta capa juega un rol meramente económico en los pavimentos flexibles, buscando obtener el espesor necesario utilizando el material más barato posible, lo que trae un aumento en el espesor total del pavimento. La sub-base también aporta sirviendo de transición entre la base y la sub-rasante; siendo ocupada como un tipo de filtro para evitar que el material de la base se incruste en la sub-rasante, a su vez apoya en la absorción de las deformaciones que provienen de la sub-rasante. En general los espesores de las sub-base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suelen de 10 a 15 cm como dimensión mínima.

Base de Firme Flexible

La función principal de esta capa, es proporcionar un elemento resistente que pueda transmitir los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub-base y la sub-rasante, con una intensidad adecuada, sirviendo así a reducir el espesor de la carpeta de rodado, que es la más costosa. Un factor fundamental en la base, es el material que la constituye, éste debe ser friccional y provisto de vacíos, para poder garantizar la resistencia correcta y la permanencia de esta en el tiempo, bajo condiciones externas, como puede ser el contenido del agua.

Los espesores de las bases dependen del proyecto que se trate, pero suele considerarse que entre 10 a 15 cm, es el espesor mínimo para poder construir. Por ende de forma global en todo proyecto la base es la capa encargada de proporcionar una superficie de rodadura adecuada, con textura y color conveniente, además de resistir los efectos abrasivos del tránsito.

Superficie de rodadura de un Firme Flexible

Esta capa se coloca sobre la base. Siendo su objetivo principal proteger la estructura del pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar las filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores, evitando que afecte directamente a las otras capas del pavimento. Esta capa también contribuye en la capacidad de soporte del pavimento, absorbiendo cargas, esto considerando un espesor mayor a 4 centímetros. (Rafael, 2007)

2.1.3. Características

Los Pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y sub-base; sin embargo es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la sub-rasante y de las necesidades de cada obra. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior.

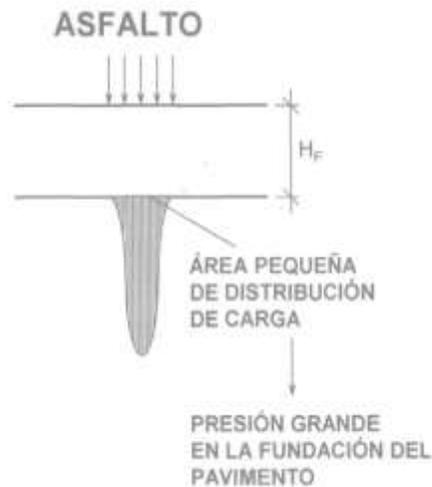
Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material (y la más cara) y la de más baja capacidad de carga de material (y más barata) ira en la parte inferior.

En este tipo de pavimentos la calidad de los materiales utilizados en cada una de las capas aumenta conforme nos acercamos a la superficie, de modo de lograr una estructura competente ante las cargas esperadas y que a la vez resulte lo más económica posible.

Su estabilidad depende del entrelazamiento de los agregados, de la fricción entre las partículas y de la cohesión de las mismas.

La superficie de rodadura de los pavimentos flexibles al tener una menor rigidez que las losas de concreto hidráulico, se deforma más y se producen mayores tensiones en la sub-rasante. En la figura 3 se presenta la distribución de esfuerzos que se genera en un pavimento flexible:

Figura 3. Distribución de Cargas en un Pavimento Asfáltico



Fuente. (Rafael, 2007)

2.2. Mezcla Asfáltica

2.2.1. Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Instituto Del Asfalto)

2.2.2. Clasificación

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

- a) Por la Temperatura de puesta en obra
- b) Por Fracciones de agregado pétreo empleado
- c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica
- d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo
- e) Por la Estructura del agregado pétreo
- f) Por la Granulometría

a) Por la Temperatura de puesta en obra.

La primera de estas clasificaciones se basa en los diferentes rangos de temperatura a la que se produce la mezcla. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que pueden producirse, la clasificación tendría la forma siguiente:

Mezclas Asfálticas en Frío (Cold Mixes): se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 60 °C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan bien emulsiones, o bien betún espumado.

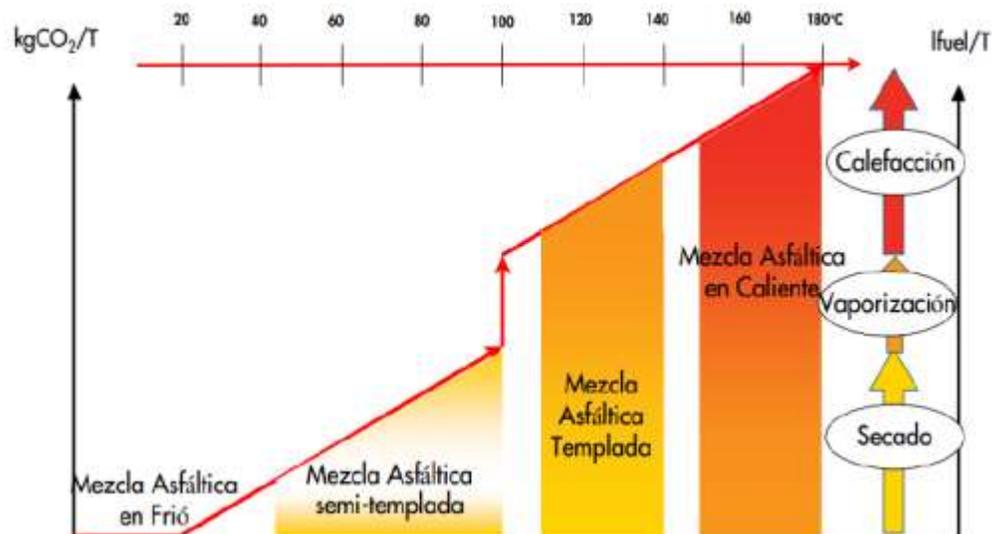
Mezclas Asfálticas Semi-Templadas (Half Warm Mix Asphalt): este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100 °C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.

Mezclas Asfálticas Templadas (Warm Mix Asphalt): se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los 100 °C, hasta cerca de los 140 °C. Será este tipo de mezclas en las que nos centremos, y las diferentes tecnologías que se utilizan para conseguir esta reducción serán comentadas posteriormente.

Mezclas Asfálticas en Calientes (Hot Mix Asphalt): las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 140 °C. Como se ha comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta de los áridos.

En la figura 4 que se incorpora a continuación es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción.

Figura 4. Clasificación de las Mezclas Asfálticas por su Temperatura de Fabricación



Fuente. (Porot, 2008)

b) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

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

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20%.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: Son mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

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

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Se presenta una granulometría con una distribución adecuada de cada uno de los tamaños de los agregados pétreos.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en la banda granulométrica. (Porot, 2008)

2.2.3. Componentes

Son los siguientes:

- Asfalto
- Agregados

2.2.3.1. Asfalto

El asfalto es un material negro, cementante que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido, a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla caliente.

El asfalto, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), es un material cementante color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son los bitumen los cuales existen en la naturaleza o son obtenidos por el procesamiento del petróleo.

2.2.3.2. Agregados

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en las capas de las carreteras, con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento.

2.2.4. Características

La mezcla asfáltica preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

- a) Densidad.
- b) Vacíos de aire.
- c) Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).
- d) Contenido de asfalto.
- e) Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).

a) Densidad.

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

b) Vacíos de aire.

Están presente entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%.

La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

c) Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla.

Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

d) Contenido de asfalto.

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

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: Es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva 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 una mezcla.

e) Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).

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

2.2.5. Propiedades

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes:

- a) Estabilidad
- b) Durabilidad
- c) Flexibilidad
- d) Resistencia a la Fatiga
- e) Resistencia al Deslizamiento
- f) Impermeabilidad
- g) Trabajabilidad.

a) Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otros efectos que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

b) Durabilidad

Es la habilidad de una carpeta de asfalto, para resistir factores como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y la separación de las películas de asfalto. Esta propiedad se mejora de tres formas: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una gradación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

c) Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura.

d) Resistencia a la Fatiga

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se conoce por medio de los estudios realizados a diferentes carpetas asfálticas, que los vacíos y la viscosidad del asfalto, tienen un efecto considerable en la resistencia a la fatiga.

e) Resistencia al Deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada.

f) Impermeabilidad

Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento o a través de él. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos. Cierta

grado de permeabilidad es aceptable, siempre y cuando, este dentro de los límites especificados.

g) Trabajabilidad.

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. (Porot, 2008)

2.3. Mezcla Asfáltica con Emulsión

2.3.1. Mezcla Asfáltica Templada

2.3.1.1. Generalidades

Para cumplir con el Protocolo de Kioto, a partir del año 1997, la industria del asfalto comenzó una línea de investigación orientada al desarrollo de una mezcla asfáltica que lograra ahorros energéticos significativos pero que tuvieran un desempeño similar a las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC). Uno de los productos de esta estrategia de ahorro se denominó Warm Mix Asphalt (WMA) o Mezclas Asfálticas Tibias o Templadas. (Federal Highway Administration, 2008)

Las Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) son mezclas asfálticas que a través de aditivos o modificaciones en el proceso de mezclado permiten reducir la temperatura de mezclado entre 10°C a 75°C respecto a las temperaturas empleadas en Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) dependiendo de la tecnología que se utilice. Básicamente, lo que se busca con esta tecnología en particular, es lograr obtener una mezcla asfáltica de

comportamiento similar a una mezcla MAC, reduciendo las temperaturas del árido y la temperatura del ligante asfáltico simultáneamente. (Goh, S. W., 2012)

2.3.1.2. Definición

Las mezclas asfálticas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 140°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El concepto de desarrollo sostenible abarca la reducción del consumo de materias primas (combustibles), la reducción de emisiones, y la posibilidad de un mayor reciclaje sin dejar de cumplir las necesidades de desarrollo. La Comisión de las Naciones Unidas Brundtland definió el desarrollo sostenible como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". El desarrollo sostenible no se centra exclusivamente en el medio ambiente, sino que abarca tres áreas interdependientes; el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, como se ilustra en la figura 5. La mezcla asfáltica tibia es consistente con los ideales descritos por el desarrollo sostenible y al mismo tiempo tiene el mismo desempeño que las mezclas asfálticas en caliente. (International Technology Scanning Program, , 2008)

Figura 5. Desarrollo sostenible



Fuente. (International Technology Scanning Program, , 2008)

2.3.1.3. Antecedentes

Constantemente salen al mercado nuevos productos y procesos que buscan mejorar el impacto ambiental que produce la construcción de carreteras, en aras de generar mecanismos de construcción de vías, con mínimos impactos ambientales, y que consoliden una industria verde.

Recientemente la industria de la construcción, se ha enfocado en la reducción de las temperaturas en la producción y aplicación de las mezclas asfálticas. Típicamente la producción y aplicación de mezclas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 140°C y 180°C.

La temperatura viene dictada por parte de la viscosidad del ligante asfáltico, siendo necesario aplicar calefacción para garantizar un revestimiento homogéneo y completo de los agregados por parte del asfalto. Dichas limitaciones, deberán tomarse en cuenta a la hora de considerar las posibilidades de reducir las temperaturas de producción y aplicación; junto con la necesidad de garantizar las propiedades mecánicas del nuevo pavimento inmediatamente después de la terminación de la obra, para reducir a su mínima expresión, los riesgos y la interrupción del tránsito. La clave está en la difusión del ligante por el esqueleto mineral de los agregados. Ante este panorama, se han introducido varias opciones para lograr dichos objetivos de reducción, aplicando temperaturas significativamente reducidas, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 4. Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
ADITIVO S- CERAS					
Sasobit (Fischer-Tropsch cera)	Sasol	Si, en Alemania añadieron un promedio 2.5	Variados, 120°C–130°C	Alemania y Otros países Por todo el mundo	>10 millones de toneladas por todo el mundo
Asfalto -B (Montan cera)	Romonta	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2.5% a peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	Desconocido
Licomont BS 100 (aditivo) o Sübit (ácido adiposo amidas)	Clariant	Si, alrededor de 3% del peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	>322.500 metros cuadrados desde 1994
3E LT or Ecoflex(propietario)	Colas	Si 2% del peso	Variados, 115°C – 135°C	Francia	Desconocidos
PROCESO ESPUMADO					
Aspha-min (zeolite)	Eurovia y MHI	Si, alrededor de 0.3% en peso total de la mezcla	Entre 110°C y 135°C	Alemania, Francia y Estados Unidos	Alrededor de 300,000 toneladas
ECOMAC (mezcla fría antes de echarla)	Screg	Si (tipo y calidad desconocida)	Situado alrededor de 45°C (113°F)	Francia	Algunas pruebas
LEA, también EBE y EBT (espumoso De una porción de fracción agregada)	LEACO, Fairco, y EIFFAGE Travaux Publics	Si, 0.2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión	<100°C	Francia, España, Italia y estados Unidos	>100,000 toneladas
LEAB® (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Si, añadieron un 0.1% en peso	90°C (194°F)	Países Bajos	Siete proyectos comerciales
Proceso de espuma					

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
LT Asfalto (asfalto espumoso con adición de Higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nynas	Si, añadieron 0.5-1.0% de una pasta de relleno de Higroscopia	90°C	Países bajos e Italia	Desconocido
Mezclas tibias de asfalto espumoso	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (Derechos patentes por todo el mundo excepto U.S.), y BP (derechos patentes U.S.)	Inyección de agua alta presión	110-120°	Francia, noruega, también Canadá, Italia, Luxemburgo, países bajos, Suecia, Suiza y reino unido	>60,000 toneladas
Aparición de tecnologías de Estados Unidos					
Evotherm™ (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead-Westvaco	Si	85-115 C	Francia, también Canadá y , China, Suráfrica y Estados Unidos	> 17,000 toneladas
Doble-Barrel Green	Astec	Inyección de agua a presión vaporizada	116-135 °C	Estados Unidos	>4,000 toneladas
Advera (zeolite)	PQ Corporación	Si, alrededor de 0.25% de peso total de la mezcla	Variados, 120 °C –130°C	Estados Unidos	>10,000 toneladas

Fuente: (Federal Highway Administration, 2008)

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kioto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales.

2.3.1.3.1 Antecedentes cronológicos en el trabajo con Mezclas Tibias (WMA)

Los antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Antecedentes cronológicos de la producción de mezclas tibias WMA

AÑO	ANTECEDENTE
1995	En 1995, Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
1999-2001	Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Eurasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.
2002	Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Asphamin, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
AÑO	ANTECEDENTE
2003	Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.

2003	El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de FsherTropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).
2004	Meadwestva company, introduce Evothem DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.
2004	La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.
2004	Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte
2005	Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
2005	Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.
2005	Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.
2005	La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
2006	Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias
2006	Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.
2006	Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.
2006	El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.
2006	Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
2006	Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.
2006	NCAT publica un reporte sobre el Evothem.
2006	Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones
2007	AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.
2007	La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA
2007	Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.
2007	Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evothem.
2007	Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.
AÑO	ANTECEDENTE

2007	Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.
2007	<p>30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.</p> <p>En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.</p> <p>Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: —La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajanl, ante lo cual, —Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de controll.</p>
2007	Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.

Fuente: Revista HMAT, 2008.

2.3.1.4. Beneficios de la mezcla tibia

2.3.1.4.1 Consumo de energía.

La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta. Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación. Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste de la planta de asfalto.

2.3.1.4.2 Emisiones.

Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones debido a la reducida temperatura de producción. De acuerdo a la literatura, la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

Figura 6. Reducciones registradas en las emisiones de planta en la producción de mezcla



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

Según se puede apreciar en la figura las mezclas asfálticas tibias (WMA) presentan unas reducciones importantes con respecto a las mezclas asfálticas en caliente (HMA) en cuanto a las emisiones, así por ejemplo, con las mezclas WMA se pueden lograr reducciones entre el 25 y 55% en las partículas de polvo, entre 30% y 40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre.

2.3.1.4.3 Exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y extensión de la mezcla

Otra ventaja de las mezclas tibias es que los trabajadores, tanto los que están involucrados en la producción en planta, como los que colocan la mezcla en el pavimento, se exponen a temperaturas inferiores, generando condiciones de trabajo más seguras.

Figura 7. Colocación de mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia



Fuente: BARROS, CATHRINA, Office of Roadway Material testing. *Warm Mix Asphalt State of the Practice*. p. 49.

2.3.1.4.4 Mejoras en la colocación y compactación de la mezcla

Las mezclas asfálticas tibias presentan mejoras en su capacidad de compactación y requieren menor esfuerzo de la maquinaria para lograr la misma densidad que una mezcla en caliente, obteniendo valores muy cercanos a la densidad de diseño.

Figura 8. Compactación de mezcla asfáltica tibia



Fuente: LINCOLN, NOEL. Payne & Dolan, Inc. Warm Mix Asphalt, A contractors Perspective. p.

2.3.1.4.5 Incremento en las distancias de acarreo

Las mezclas asfálticas tibias pueden ser transportadas a distancias mayores a las mezclas en caliente, debido a que la velocidad de enfriamiento es menor en las mezclas tibias en comparación a las mezclas en caliente. Se puede lograr también una apertura al tránsito en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

2.3.1.4.6 Viscosidad.

La funcionalidad de las tecnologías de WMA se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto. La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente. Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden

funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

2.3.1.4.7 Técnicos.

Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz. Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

Se puede incorporar además un mayor porcentaje de RAP (reciclaje de pavimentos asfálticos) debido a las bajas temperaturas.

Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

2.3.1.5. Estudios comparativos sobre las ventajas de las mezclas tibias

2.3.1.5.1 Emisiones y exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y extensión de mezclas asfálticas. Es bien sabido que la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas presenta ventajas ambientales importantes sobre las emisiones, exposiciones laborales y consumo de energía. La industria de las mezclas asfálticas en caliente conoce esto desde hace muchos años. El mayor reto, sin embargo, ha sido siempre conseguir una calidad adecuada de las mismas a temperaturas de operación inferiores o a temperatura ambiente.

En los últimos años, nuevos procesos de producción a temperaturas comprendidas entre 80 y 135°C han atraído gran interés debido a la posibilidad de aproximarse o incluso

alcanzar la calidad de la mezcla en caliente y lograr reducciones en el consumo de energía, las emisiones y la exposición laboral.

En tal sentido, fue llevado a cabo un estudio por funcionarios de Shell Bitumen el cual se realizó los días 25 y 27 de octubre de 2006 en Florencia en una planta mezcladora que se había modificado para producir asfalto de acuerdo con el proceso WAM Foam. El betún duro utilizado para WAM era un grado de penetración 20/30 (EN12591) y el betún flexible era un grado V10000 (EN12591).

Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

- _ Determinar las exposiciones personales para aplicaciones para el contratista de carreteras Conglobit. Utiliza el proceso WAM Foam para producir y extender mezclas asfálticas bajo el nombre "Greenfalt".
- _ Comparar, en condiciones de exposición en campo, el tipo de emisiones utilizando Greenfalt con las producidas utilizando HMA (mezcla en caliente convencional).
- _ Recoger y comparar los valores de emisión de las operaciones de mezcla en la planta de asfalto durante la producción de WAM y HMA.

Las exposiciones a material constituido por partículas se determinaron y compararon con los Límites de Exposición Laboral (OEL) italianos para humos de betún (betún de petróleo número CAS 8052-42-4). Algunos países, tales como Italia en 2003, han adoptado las recomendaciones de la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales del Gobierno (ACGIH) en la legislación nacional. En enero de 2000, ACGIH modificó sus límites de exposición recomendados (REL) para humos de betún. El límite era 5 mg/m³ medido como aerosoles totales (minerales y orgánicos). El último valor REL es 0,5 mg/m³, medido como aerosol soluble en benceno de la fracción inhalable, es decir la fracción orgánica de los aerosoles totales. Los aerosoles totales se miden utilizando una casete de 37 mm de caras cerradas equipada con un filtro de PTFE, que es una toma muestras de "aerosol total" (fracción respirable). Los aerosoles orgánicos totales se extraen y se cuantifican luego (Fracción Soluble en Benceno o BSF).

Obsérvese que la fracción inhalable se considera como similar a BSF para este trabajo. Las duraciones de toma de muestras para HMA y WAM estaban comprendidas entre 3 y 4 horas, lo que se adoptó a fin de obtener una cantidad mayor que la mínima (BSF > 0,1 mg/m³) requerida por NIOSH 5042. Las posiciones en las cuales fueron ubicadas las tomas muestras fueron las siguientes:

- _ Dos toma muestras próximas a la amasadora; debido a la saturación observada de los filtros en el caso de la producción de mezcla en caliente, se añadió un tercer filtro con un tiempo de toma de muestras de 60 minutos. No se observó saturación alguna en el caso de WAM Foam.
- _ Dos toma muestras situados en el extremo superior de las tolvas de descarga.
- _ Uno o más toma muestras en el punto de descarga.
- _ Toma muestras estático, aproximadamente a 50 m de distancia de la planta mezcladora.

El 26 de octubre, el trabajo de pavimentación implicaba la construcción de una capa estructural utilizando Greenfalt. Se extendió en el lugar una cantidad de 870 toneladas de Greenfalt con una longitud de 1.300 m, 3,5 m de anchura y con espesores de 90, 50 y 90 mm para las tres secciones de esta capa.

Las temperaturas del aire registradas eran 19°C por la mañana y 30°C a las 3 de la tarde. El estado del tiempo era nublado, sin viento. La duración de la toma de muestras por el personal de pavimentación fue aproximadamente 400 minutos. La toma de muestras para las medidas de exposición se realizó para los puestos de trabajo Sigüientes:

- _ Un conductor de la terminadora.
- _ Dos operarios de la plantilla maestra.
- _ Un obrero/rastrillador experto.
- _ Un conductor de la Compactadora.

Se utilizaron bombas personales para la toma de muestras de humos con un caudal de 2 l/min. El material se recogió sobre filtros (2 µm) dispuestos en el casete estándar de 37 mm.

- _ Aerosoles totales, lo que representa los aerosoles minerales y orgánicos.
- _ BSF extraído del filtro con benceno, lo que representa los aerosoles orgánicos totales (la parte restante se considera como la fracción mineral o MF).

Se tomaron también dos muestras estáticas a fin de abarcar el área total del lugar de trabajo en la carretera y comprobar si existían fuentes de aerosoles distintas del tren de extensión.

Durante todo el día de la toma de muestras, debió observarse la ausencia de humos (visual y olfativa) durante la extensión de la mezcla de asfalto en caliente Únicamente se apreció algo de vapor de agua procedente del agua utilizada para la compactadora.

Las casetes de filtro estándar de 37 mm se utilizaron en serie con tubos adsorbentes a fin de recoger la fracción de vapores (gases). El adsorbente adecuado utilizado para atrapar los compuestos volátiles es XAD-2 con secciones adsorbentes anterior y posterior. Las secciones anterior y posterior se extrajeron por separado utilizando dicloro metano para comprobar la ruptura. El análisis y las cuantificaciones fueron realizados por medio de cromatografía de gases con detección por ionización de llama (GCFID).

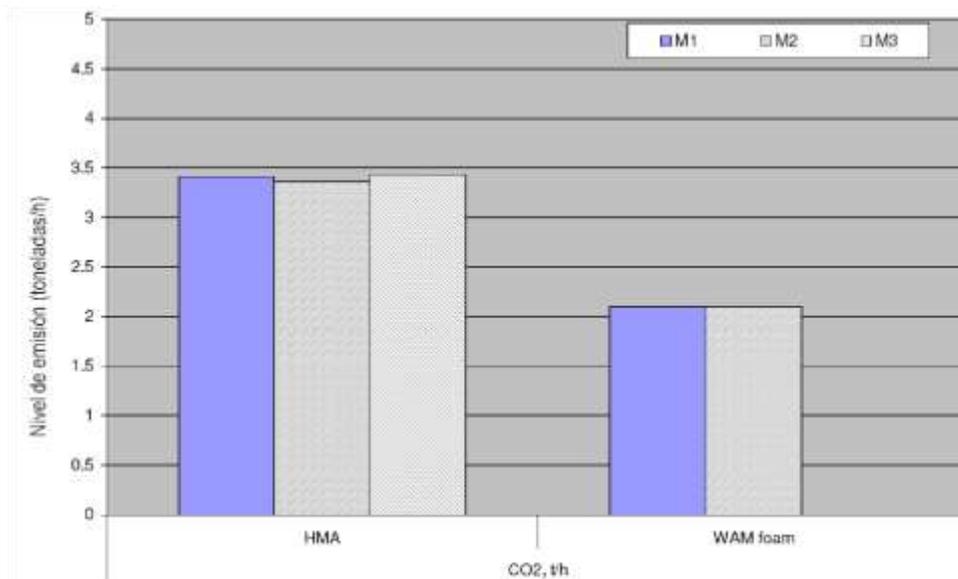
La determinación y cuantificación de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) en las fracciones solubles en benceno se realizaron sobre los toma muestras de HMA. Esto no se ha hecho en el caso de WAM, dado que la cantidad de materia orgánica recogida era demasiado pequeña para dicho análisis. La identificación de los compuestos está Filtro Adsorbente Bomba La ausencia de humos durante la extensión de WAM 5/10 basada en los 16 compuestos de prioridad mencionados en la lista de

EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). El análisis de PAH se realizó de acuerdo con el método Shell AMS 1057-1 elaborado por la propia empresa (basado en el método 610-EPA para aguas residuales). Los PAH se extrajeron con THF a partir de la parte orgánica de las materias particuladas recogidas (BSF) y se analizaron por HPLC-UV.

- Resultados del consumo de combustible en la planta de asfalto. El consumo de combustible (gas) se midió a diferentes niveles de capacidad de producción de la planta en el intervalo de 60-100%. Los resultados mostraron una reducción en el consumo de combustible de un 35%.

Los resultados de emisiones de gas y polvo por la chimenea durante la producción de mezcla asfáltica para el trabajo de pavimentación en la autopista Florencia Pisa-Livorno en Italia, fueron medidos por Det Norske Veritas AS varios contaminantes del aire (CO₂, CO, NO_x, SO₂, TOC y polvo) emitidos por la chimenea de la planta mezcladora.

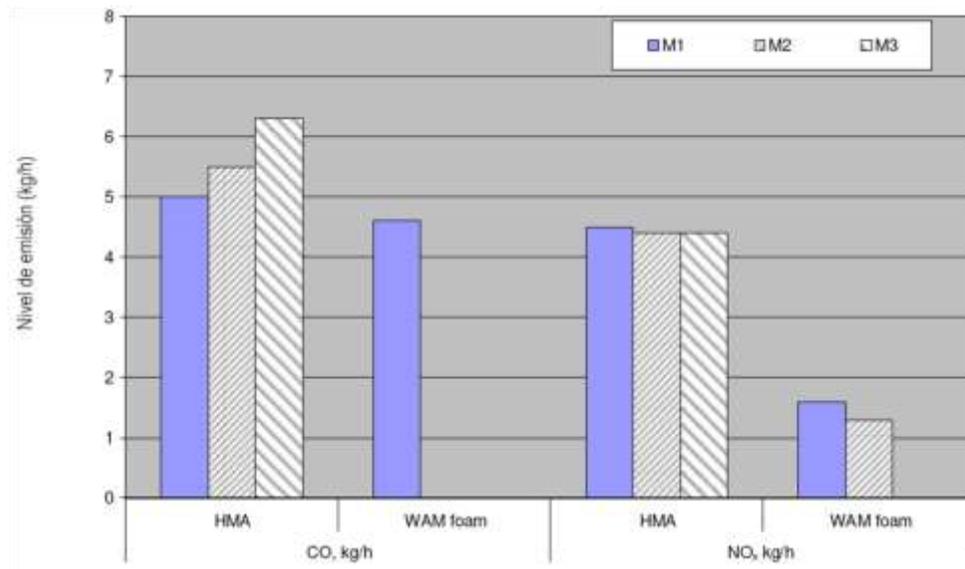
Figura 9. Niveles de emisión de CO₂ en tres momentos de medida en la planta de asfalto



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

Se muestra la emisión de CO₂ en toneladas por hora y la reducción de las emisiones alcanzada es aproximadamente de un 35%.

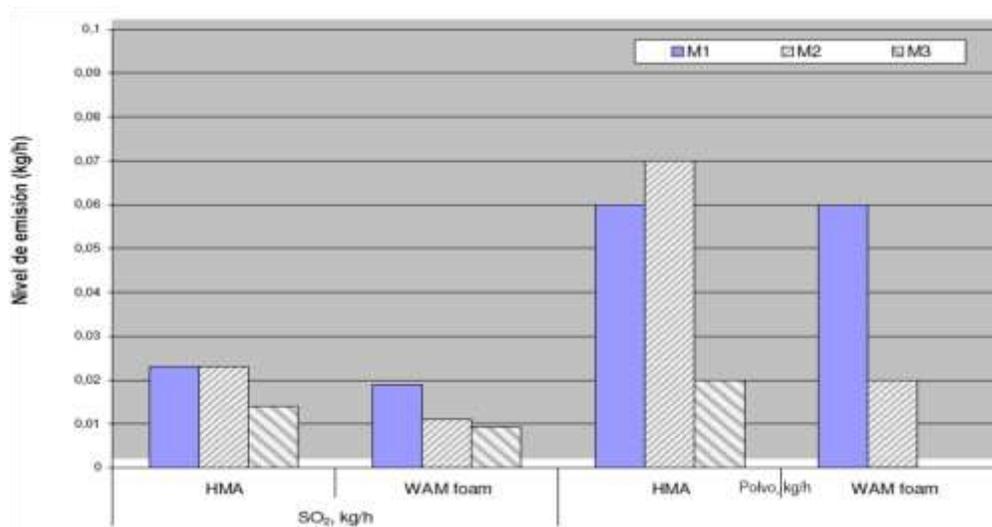
Figura 10. Niveles de emisión de CO y NO_x en tres momentos de medida en la planta de asfalto



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

Las reducciones de CO alcanzadas fueron aproximadamente de un 8% y la reducción de NO_x fue aproximadamente de un 60%.

Figura 11. Niveles de emisión de SO₂ y polvo en tres momentos de medida en la



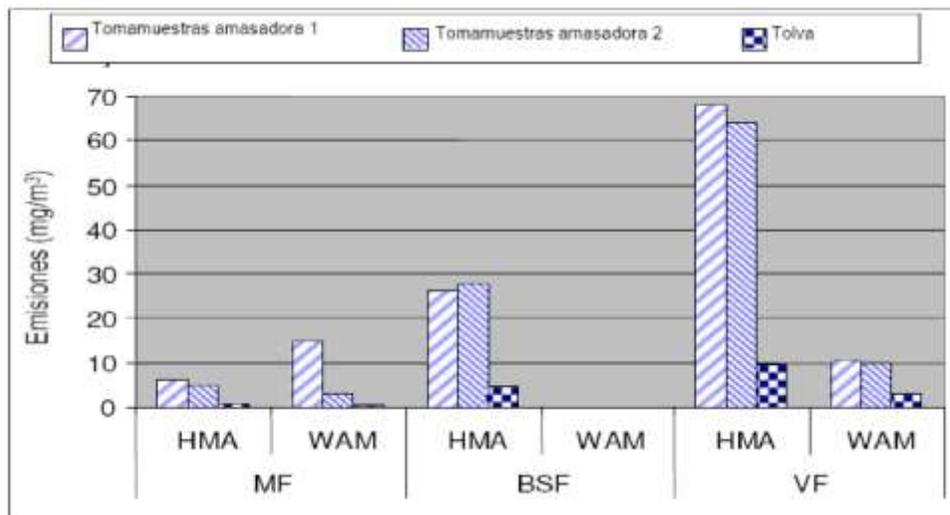
Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

Los niveles de emisión de SO₂ y polvo son bajos, pero pueden obtenerse todavía reducciones del orden del 25 al 30%.

En las figuras 9, 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos para un ritmo de producción de 140 toneladas de mezcla por hora. La disminución de las temperaturas de operación desde 180°C en la producción de mezcla caliente a aproximadamente 125-130°C en la producción de mezcla de asfalto templada produjo una reducción considerable en la cantidad de emisiones de gas y polvo.

• **Resultados acerca de las emisiones en la planta de asfalto.** Se llevó a cabo un primer estudio de emisiones en una planta mezcladora en el año 2000, este estudio es el más extenso en una planta de este tipo. Los resultados (en mg/m³) se presentan en la Figura 12, en la cual MF indica la fracción mineral, BSF la fracción soluble en benceno y VF la fracción volátil.

Figura 12. Emisiones en la planta asfaltadora



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

Se aprecia que la descarga de la amasadora es el punto en el que se emiten más humos.
 _ La fracción mineral (MF) se encontró similar.

_ La fracción orgánica (BSF) se encontró notablemente mayor para HMA (hasta 200 veces mayor). Los aerosoles orgánicos representan una pequeña parte de las emisiones totales para WAM al contrario que HMA (hasta el 4% y el 90% respectivamente).

_ La fracción volátil (VF) se encontró mayor para HMA (hasta 6 veces mayor). Debido al nivel muy bajo de BSF emitida con WAM, las fracciones volátiles pueden representar casi la totalidad de las emisiones orgánicas (hasta el 99%).

• **Resultados en cuanto a las medidas de exposición en el lugar de pavimentación.**

Los valores de exposición (corregidos por ensayo en blanco de campo) se dan en la Tabla 6. Se trata de valores Medios Ponderados por Tiempo (TWA) de 8 horas. Los valores TWA de 8 horas corresponden a la exposición media a lo largo de un turno de trabajo de 8 horas. Este valor es preferido en muchos casos dado que es más representativo de un día de trabajo total.

Tabla 6. Valores de exposición

TWA de 8 h en mg/m ³	Extensión WAM (día 2)		
	MF	BSF	SV
Conductor de la asfaltadora	0,22	0,05	3,45
Obrero de la maestra 1	0,19	0,08	2,40
Obrero de la maestra 2	0,19	0,07	1,18
Rastrillador	0,16	0,14	2,93
Conductor de la apisonadora	0,13	0,03	0,79
Estático 1	0,97	0,02	0,32
Estático 2	0,14	0,01	0,23

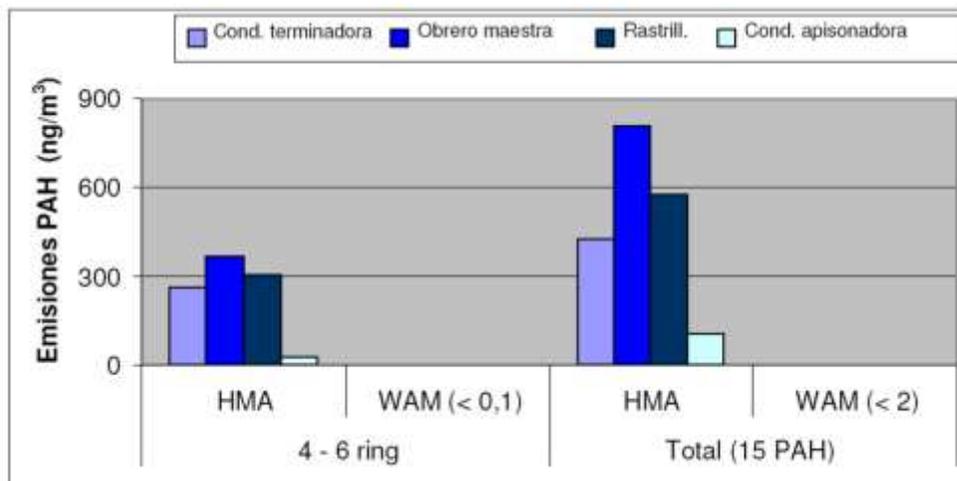
Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

La parte principal de los aerosoles es inorgánica (polvo mineral). Los datos de exposición relevantes (BSF) han sido comparados con los valores OEL italianos. Sobre una base de Media Ponderada por Tiempo de 8 h, ninguno de los valores medidos excedía de estos OEL. Debe entenderse que en todos los casos (producción en caliente y templada) los valores determinados son muy inferiores a cualquier exposición laboral o límite ambiental. Esto demuestra claramente que tanto la producción de mezcla en caliente como la WAM-Foam son plenamente aceptables desde un punto de vista laboral y ambiental. Cuando se comparan con las medidas de exposición previas de

Shell conducidas sobre la pavimentación HMA, estas emisiones se encuentran en el rango inferior (comúnmente 0,05-0,60 mg/m³ en BSF). El mismo nivel de magnitud (< 0,05) se registró anteriormente cuando se utilizaron ligantes de grado de penetración usuales (v.g. 35/50) a aproximadamente 150°C. Los datos de BSF son también consistentes con los datos de exposición de los estudios anteriores de la Compañía (hasta 0,05 mg/m³). Los valores estáticos se encontraron más bien elevados, especialmente en términos de polvo mineral. Esto se explica probablemente por el tráfico al otro lado de la autopista.

• **PAH en BSF.** Las concentraciones de PAH son los valores sumados para los BSF y los VF. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 13 y los valores se expresan en ng/m³. Se presenta la suma de los compuestos de 4-6 anillos y la suma de 15 PAH detectados. Los resultados son consistentes con los valores BSF: cuanto mayor es la fracción orgánica, tanto más alto es el contenido de PAH. Los valores para la mezcla caliente presentados en la Figura 13 son valores típicos derivados de medidas de exposición previas realizadas por Shell.

Figura 13. Emisiones PAH según resultados del estudio



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

El estudio llevado a cabo por Shell Bitumen muestra que en la producción de mezclas asfálticas, la tecnología WAM Foam es significativamente más respetuosa con el medio ambiente en términos de emisiones de CO₂, NO_x, polvo y aerosol orgánico.

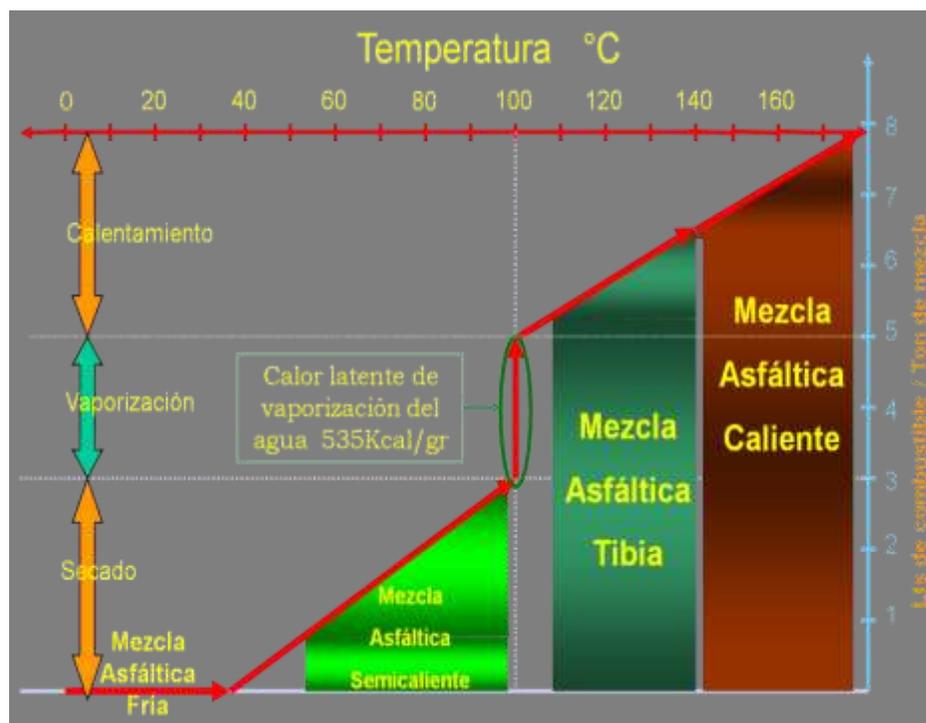
Los aerosoles orgánicos, expresados en fracción soluble en benceno, emitidos con WAM a aproximadamente 125°C están comprendidas en el rango inferior encontrado comúnmente para la extensión de mezclas en caliente cuando se utiliza una administración satisfactoria del producto (v.g. el uso de la temperatura mínima recomendada).

Los resultados obtenidos en este estudio están de acuerdo con un estudio previo de Shell Bitumen, que demuestra que en el intervalo de temperatura relevante para aplicaciones de pavimentación (aproximadamente 140 a 190°C), la tasa de emisión de humos aumenta por un factor de 2 por cada 12°C aproximadamente de aumento en la temperatura.

2.3.1.6. Métodos para producir mezclas tibias

Las tecnologías para producir mezclas asfálticas se pueden clasificar de varias maneras. En este caso nos centraremos en la producción por temperatura. La Figura 14 muestra una clasificación de producción de mezclas asfálticas por gradiente calorífico y van desde frío hasta caliente. La gama de temperaturas es amplia y van desde 0°C hasta lograr los 180°C en producción.

Figura 14. Rangos de temperatura para producción de Mezclas asfálticas



Fuente: Comisión permanente del asfalto. 2008

Tabla 7. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en Frío	de 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en Frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.
Mezclas Semi-templadas	60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así, a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye.

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas Tibias WMA			Y se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009)
	100°C a 140°	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso. (Transportation Research Board of the National Academies, 2009)
Mezclas en caliente	140°C a 180°	Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente: Comisión permanente del asfalto. 2008

2.3.1.6.1 Sistemas mediante el uso de aditivos.

• Principio

- Adicionar al ligante un modificador de la viscosidad, frecuentemente se utilizan ceras.
- Se debe agregar en la planta de mezcla o directamente al ligante (esta es la mejor solución), debido a la homogeneidad que se requiere de mezclado entre el asfalto y el aditivo.

• Resultados

- Fácil de utilizar, no es necesario inversiones ni modificación de la planta
- Temperatura de mezcla de 130-140°C,
- Reducción de la temperatura limitada.
- Se mejora la trabajabilidad en la mezcla.
- Puede mejorar la resistencia al ahuellamiento.

- Sistemas utilizados
 - Shell S-Grades
 - Sasobit ®, Licomont, Asphaltan

Figura 15. Apariencia del aditivo granulado. Sasobit



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

2.3.1.6.2 Sistemas a base de espuma (1/3) - Zeolita

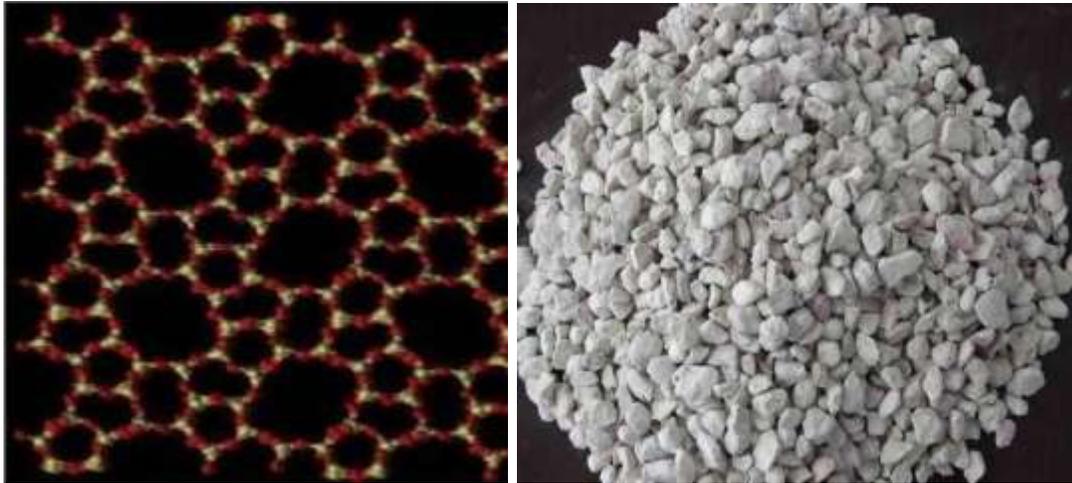
- Principio
 - Añadido a los agregados a 130°C,
 - El agua se agrega en forma de vapor
 - El betún se espuma incrementando su volumen

- Aluminosilicatos sintéticos húmedos
 - Red de silicatos con grandes espacios vacíos
 - Agua encapsulada, alrededor del 20% de agua cristalizada.

- Resultados
 - Uso de un alimentador adicional en la planta de mezcla
 - Temperatura de mezcla alrededor de 130°C

- Sistemas. Aspha-Min ® de Eurovia

Figura 16. Estructura de la zeolita, bajo microscopio



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

2.3.1.6.3 Sistemas a base de espuma (2/3) – LEA

- Principio

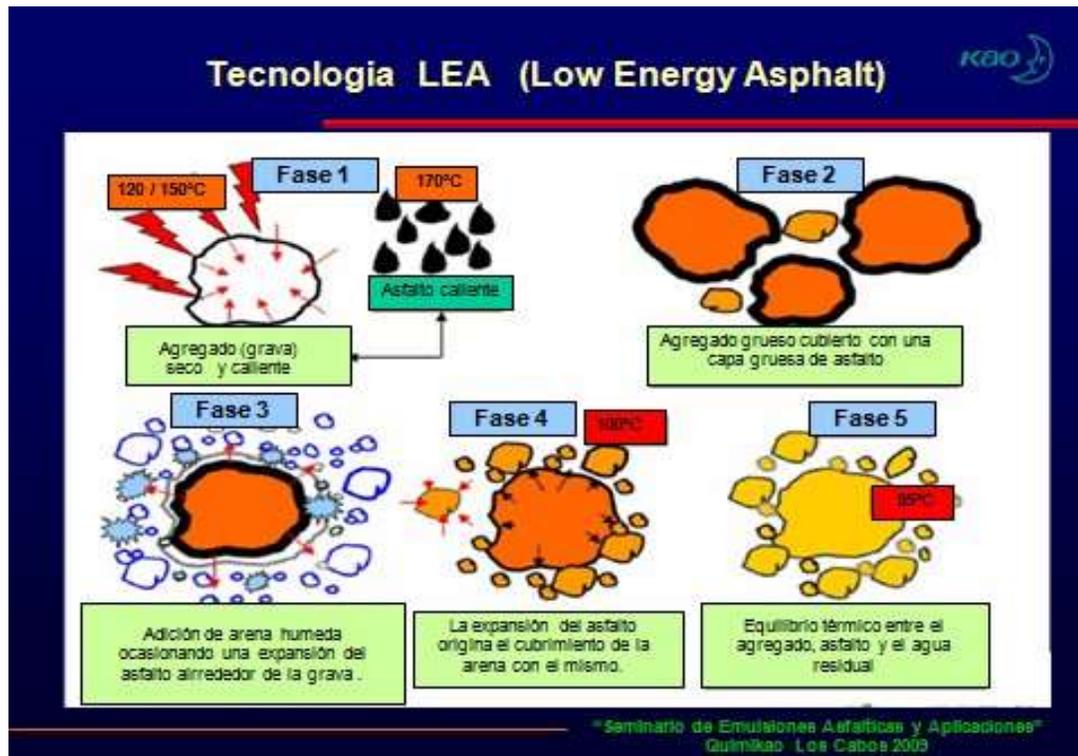
- Uso de arena húmeda a temperatura ambiente,
- Un aditivo en el ligante,
- Agua lanzada como espuma de betón

- Resultados

- Necesidad de un control preciso del contenido de agua
- Introducción de los agregados en 2 etapas
- Temperatura de mezcla sobre 100°C

- Sistemas. LEA ® de Fairco & Eiffage para —Low Energy Asphaltl

Figura 17. Fases para producir mezcla tibia tecnología LEA



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

2.3.1.6.4 Sistemas a base de espuma (3/3). Planta de Doble Tambor

- Principio

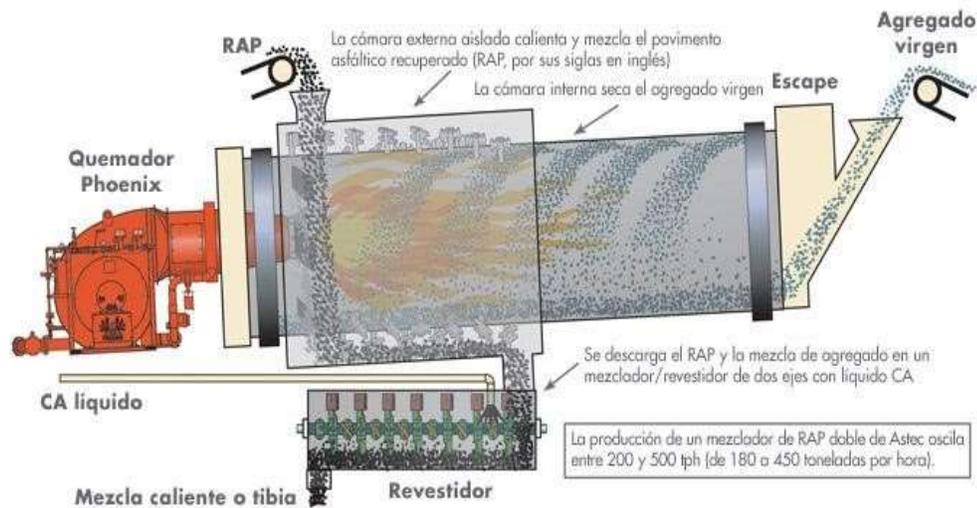
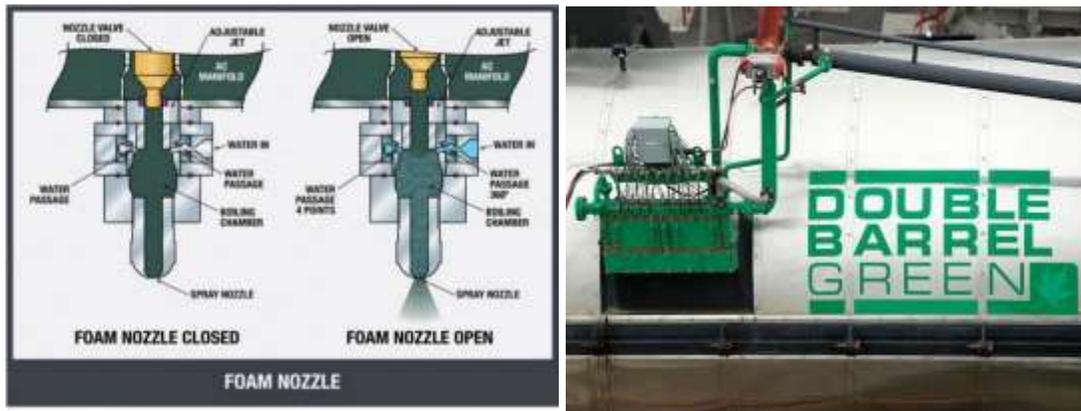
- El betún es introducido directamente como espuma en el tambor de Mezcla
- El incremento del volumen del betún asegura la envuelta de los agregados

- Resultados

- Planta de mezcla especial con doble barril y unidad de espuma
- Reducción de la temperatura de 10°C a 30°C.

- Sistemas. Double-Barrel ® green from Astec

Figura 18. Sistema de inyección del asfalto en forma de espuma



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

2.3.1.6.5 Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam. Fue desarrollado en 1997

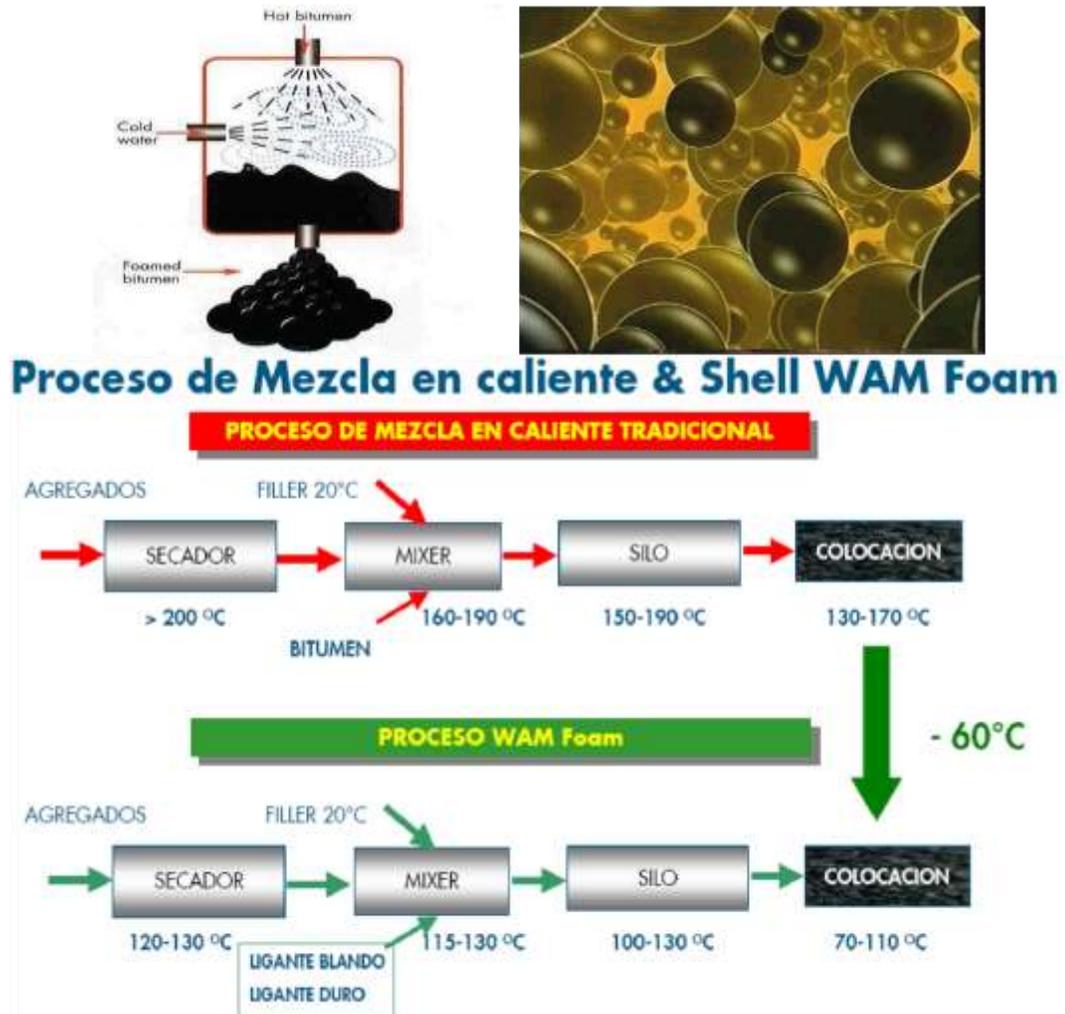
• Principio

- Un betún blando con una viscosidad baja para en primer lugar, envolver los agregados,
- Y un betún duro en forma de espuma para recubrir la parte superficial

• Resultados

- Reducción de temperatura de hasta de 60°C
- Similar desempeño que una mezcla asfáltica en caliente.

Figura 19. Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam



Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

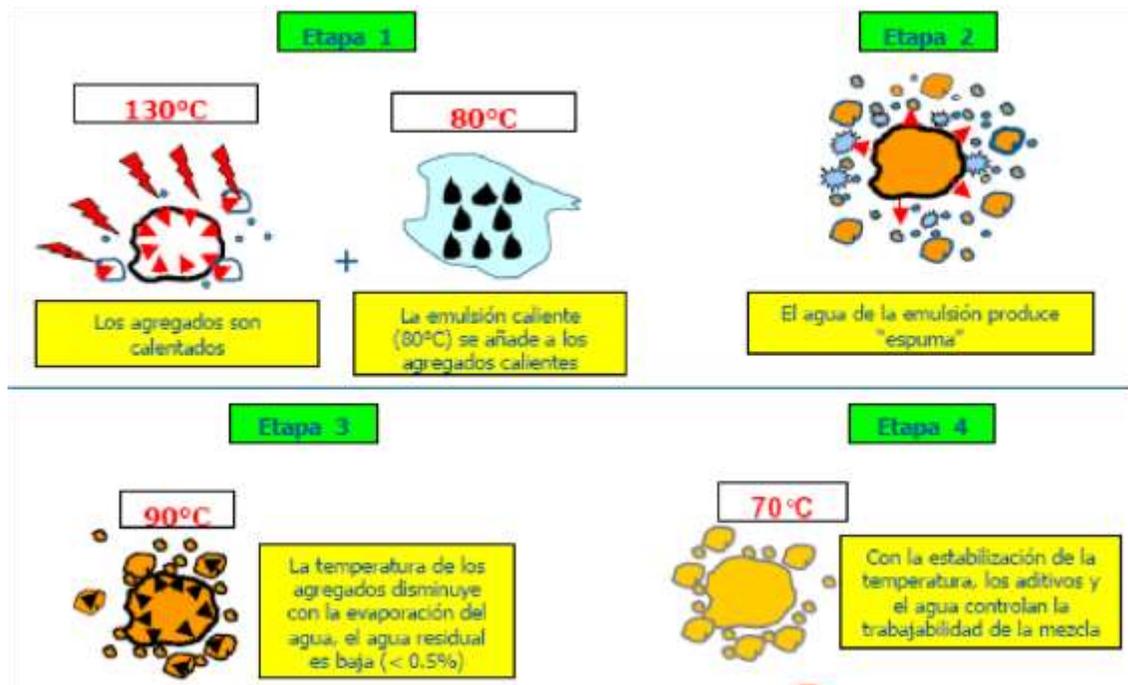
2.3.1.6.6 Sistema basado en emulsión.

- Principio.
 - Emulsión con un emulsificante especial

- Resultados
 - Reducción de la Temperatura de 50 a 75°C

- Sistemas. Evotherm ® de Meadwestvaco

Figura 20. Etapas para producir mezcla tibia basada en emulsión



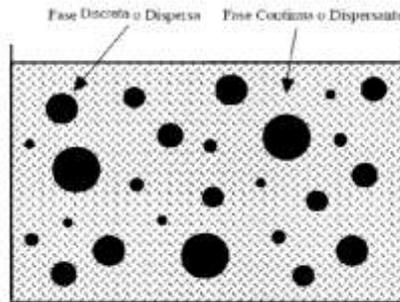
Fuente: (Lopera Palacios, 2011)

2.3.2. Emulsión

2.3.2.1. Definición

Una emulsión es una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre si y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la figura 21, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

Figura 21. Diagrama esquemático de una emulsión



Fuente. (Rodríguez, 2001)

Generalmente el tamaño de la fase discreta tiene alguna dimensión lineal entre 1 nanómetro y 1 micra. Son estos tamaños tan pequeños los que les dan a las emulsiones sus importantes e interesantes propiedades, hace incrementar la superficie específica del cemento asfáltico, favoreciendo el mojado, distribución y cohesión con las partículas de agregado. En la emulsión que se utiliza en la tecnología en frío se pueden distinguir dos fases: una discontinua formada por las gotitas esféricas de cemento asfáltico y una continua formada por el medio en el cual se dispersan. El cemento asfáltico es por naturaleza hidrófobo, lo cual provoca la unión entre glóbulos dando lugar a otros de tamaño mayor, provocando la separación del cemento asfáltico y del agua. Para evitar la coalescencia de los glóbulos de cemento asfáltico se adiciona un agente estabilizador denominado emulgente o emulsificante.

2.3.2.2. Tipos de Emulsión

Dentro de las emulsiones asfálticas podemos distinguir dos grandes grupos que se determinan de acuerdo a la carga eléctrica que poseen, esto principalmente depende del tipo de emulsificador:

- Emulsiones Aniónicas que son las de carga negativa.
- Emulsiones Catiónicas que son las de carga positiva.

2.3.2.2.1 Emulsiones aniónicas

Como ya se mencionó este tipo de emulsión está cargado negativamente por ende trata de unirse con elementos que estén cargados positivamente.

Figura 22. Emulsión Aniónica



Fuente. (Rodriguez, 2001)

Los emulgentes empleados en la fabricación de las emulsiones aniónicas son normalmente oleatos de sodio o potasio (jabones de sodio) del tipo $R-COO-Na^+$ (ácidos grasos). El radical R queda sumergido en glóbulos de cemento asfáltico y el grupo COO^- unido a él queda en la fase acuosa donde se disocian los cationes Na^+ . Las moléculas del agente emulsionante cubren completamente el glóbulo de cemento asfáltico como se muestra en la figura 23, quedando tapizado de radicales negativos y actúan como si estuvieran cargados negativamente.

Figura 23. Glóbulo de Cemento Asfáltico Cubierto De Moléculas Del Agente Emulsionante

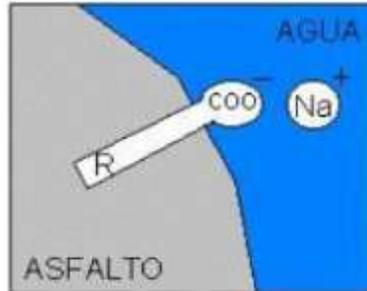


Fuente. (Rodriguez, 2001)

Esta carga negativa impide el contacto directo de los distintos glóbulos de asfalto, por lo que tienden a mantenerse separados y mantienen estable la emulsión. En la práctica, para lograr una protección eficaz del glóbulo de asfalto se emplea la cantidad de

emulgente necesaria para lograr que sus moléculas tapicen totalmente su superficie y la situación del glóbulo de asfalto en la emulsión terminada es la indicada en la siguiente figura 24:

Figura 24. Situación Del Glóbulo De Asfalto En La Emulsión Aniónica Terminada



Fuente. (Rodríguez, 2001)

A causa de su carga negativa, los glóbulos de cemento asfáltico de una emulsión aniónica tienen especial afinidad por las superficies iónicamente positivas como son los áridos tipos calizas (CaCO_3), dolomitas y basaltos. La representación que se emplea en las figuras de ejemplo de las moléculas de las emulsiones (una cabeza grande o voluminosa seguida por una cola larga) es muy parecida a la realidad. Los jabones de metales bivalentes suelen producir emulsiones de agua en asfaltos, lo que puede explicarse por análogas considerables geométricas.

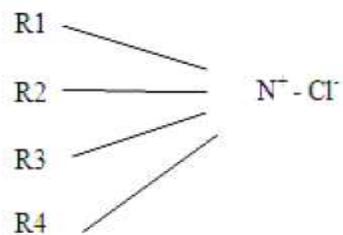
Cuando el asfalto empleado contiene una elevada proporción de ácidos nafténicos pueden fabricarse emulsiones aniónicas utilizando como emulsificante los jabones formados por los ácidos nafténicos de los asfaltos con un álcali. Dentro de las emulsiones aniónicas se puede encontrar las emulsiones:

- Emulsiones de quiebre lento (RS – 1, RS – 2)
- Emulsiones de quiebre medio (MS – 1, MS – 2, MS – 2h)
- Emulsiones de quiebre rápido (SS – 1, SS – 1h)

Dependiendo de la rapidez de quiebre se clasifican y esto va dependiendo según la proporción y tipos de emulsificantes empleados, se obtienen según estos las emulsiones de mayor o menor rapidez de quiebre, o sea la velocidad con que las partículas de asfalto recubren el agregado pétreo separándose del agua.

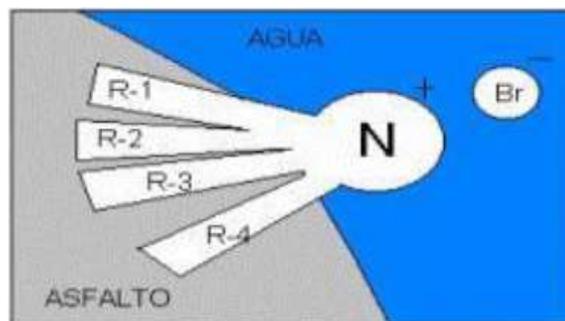
2.3.2.2.2. Emulsiones catiónicas

Estas son aquellas en que las partículas de asfalto están cargadas positivamente, por lo que representan afinidad por los grupos cargados negativamente y por ende contrariamente a las emulsiones aniónicas que tratamos anteriormente. Los emulgentes ocupados para la obtención de estas emulsiones Catiónicas son normalmente sales de amonio cuaternario de tipo:



O amina grasa (diamina, amido-amina, imidazolina). Los radicales R1, R2, R3, R4 se sumergen en los glóbulos de asfaltos y el nitrógeno queda en la fase acuosa donde se disocian los aniones Cl^- que es uno de los muchos que se pueden emplear en la práctica para la elaboración de los diversos tipos de emulsiones.

Figura 25. Esquema Sumersión De Los Radicales En El Glóbulo De Asfalto



Fuente. (Rodriguez, 2001)

En las emulsiones catiónicas se clasifican al igual que las emulsiones aniónicas de acuerdo a su velocidad de quiebre o sea a una clasificación de emulsiones de quiebre rápido, medio y lento. Las siglas o comúnmente llamadas son:

- Catiónicas de quiebre rápido (Cationic rapid setting): CRS – 1, CRS – 2
- Catiónicas de quiebre medio (Cationic médium setting): CMS – 1, CMS – 2, CMS – 2h
- Catiónicas de quiebre lento (Cationic slow setting): CSS – 1, CSS – 1h.

En general las emulsiones producen en las mezclas asfálticas un recubrimiento más delgado en material pétreo. Su uso se ha estado ampliando por las mismas razones que los asfaltos cortados han ido disminuyendo, debido a que no se produce tanta contaminación debido a que el vehículo solvente para la elaboración de los asfaltos con estas emulsiones es agua por lo que se evapora no produciendo polución.

Por ejemplo:

CSS – 3K – Emulsión Catiónica (K) de quiebre lento (S) y 3 que tiene viscosidad entre 250 y 500 S.S.F. Además se puede incluir otra característica adicional según sea la dureza del residuo asfáltico que si está entre 40 y 90 de penetración la emulsión se denominará con la letra h al final de su nombre.

Por ejemplo:

RS - 3 kh

RS = Quiebre rápido (Rapid Setting)

3 = Viscosidad 250 a 500 segundos saybolt Furol.

k = Catiónica (se usa con áridos de carga negativa).

h = residuo duro (de penetración entre 40 y 90)

Según el contenido de asfalto en la emulsión, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se muestra en la tabla 8:

Tabla 8. Clasificación de emulsiones asfálticas

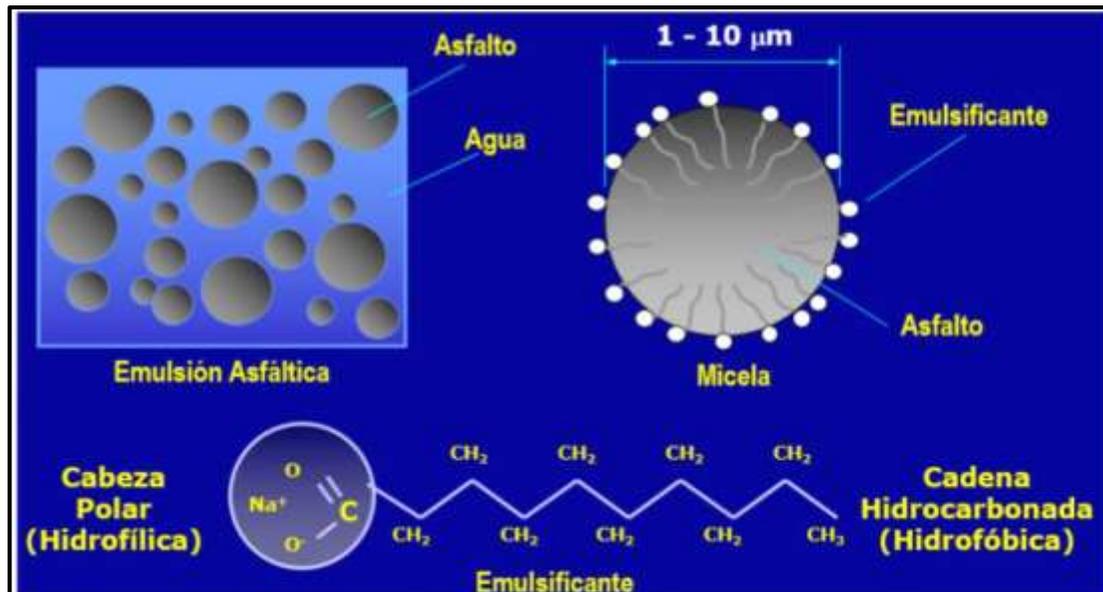
Clasificación	Contenido de Asfalto (% en masa)	Tipo de Rompimiento	Polaridad
EAR-55	55	Rápido	Aniónica
EAR-60	60	Rápido	Aniónica
EAM-60	60	Medio	Aniónica
EAM-65	65	Medio	Aniónica
EAL-55	55	Lento	Aniónica
EAL-60	60	Lento	Aniónica
EAI-60	60	Para Impregnación	Aniónica
ECR-60	60	Rápido	Catiónica
ECR-65	65	Rápido	Catiónica
ECR-70	70	Rápido	Catiónica
ECM-65	65	Medio	Catiónica
ECL-65	65	Lento	Catiónica
ECI-60	60	Para Impregnación	Catiónica
ECS-60	60	Sobre-Estabilizada	Catiónica

Fuente. (Rodríguez, 2001)

2.3.2.3. Empleo de Emulsiones

Las emulsiones asfálticas son sistemas formados por dos fases total o parcialmente inmiscibles, en donde el agua actúa como la fase dispersante o continua, y el asfalto como la fase dispersa. Para lograr el equilibrio y estabilización de estas fases se utilizan aditivos químicos denominados emulsificantes, los cuales están compuestos por una cadena hidrocarbonada la cual tiene un extremo hidrofóbico y otro extremo hidrofílico (Figura 26). El emulsificante se encuentra saponificado, y al hacer contacto con el agua se disocia y dispersan las moléculas en el medio continuo. (Rodríguez, 2001)

Figura 26. Estructura molecular del emulsificante



Fuente. (Thenoux, 2014)

El empleo de las emulsiones asfálticas en reemplazo del ligante asfáltico en plantas de mezclado en caliente se considera una de las técnicas más nuevas utilizadas en la producción de Mezclas Asfálticas Tibias. (Capitao, 2012). En la actualidad se conocen dos procedimientos:

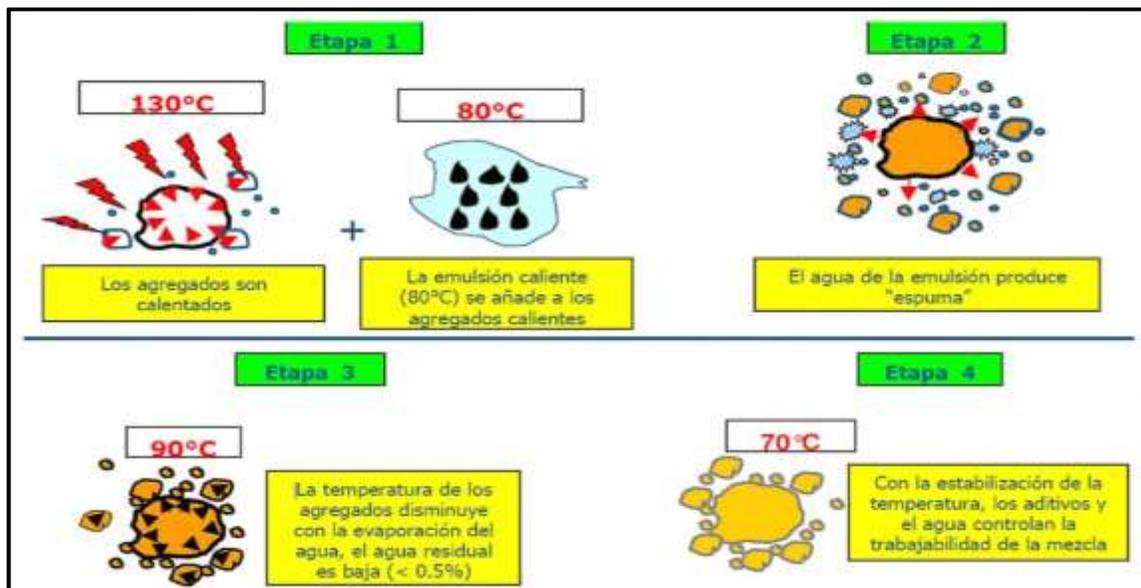
- Empleo de Emulsiones Asfálticas Tradicionales con Aditivos Químicos.
- Empleo de Emulsión Asfáltica Súper-Estabilizada (ESE).

2.3.2.3.1. Empleo de Emulsiones Asfálticas Tradicionales con Aditivos Químicos

Evotherm ET es una marca comercial de aditivo químico el cual se dosifica junto una emulsión asfáltica de elevado residuo asfáltico (70% aprox.) durante el proceso de mezclado en las plantas asfálticas. Consiste en un agente emulsificante que introduce mejoras en el proceso de mezclado, recubrimiento de agregados, trabajabilidad, compactabilidad y adherencia del material. (Tarefder, 2014)

En una primera etapa durante el proceso de fabricación de este tipo de mezclas, se dosifican los agregados a una temperatura de 130°C y la emulsión asfáltica en conjunto con el aditivo químico a una temperatura de 80°C dependiendo del fabricante, como muestra la Figura 27. En una segunda etapa, al entrar en contacto el agua de la emulsión con el agregado caliente se produce un efecto de espumado que cubre completamente los áridos obteniéndose una mezcla a una temperatura entre 100°C a 110°C que puede ser compactada hasta con una temperatura de 80°C, reduciendo en un rango de 50°C a 60°C la temperatura de mezclado y compactación respecto a una Mezcla Asfáltica en Caliente. (Hurley, 2006)

Figura 27. Proceso de mezclado de una Emulsión Asfáltica con aditivos químicos



Fuente. (Shell., 2008)

Los aditivos químicos utilizados en la emulsión asfáltica luego del proceso de mezclado forman micelas invertidas que reducen la fricción entre agregado, permitiendo la compactación a bajas temperaturas respecto a las mezclas MAC.

2.3.2.3.2. Empleo de Emulsiones Asfálticas Súper-Estabilizadas

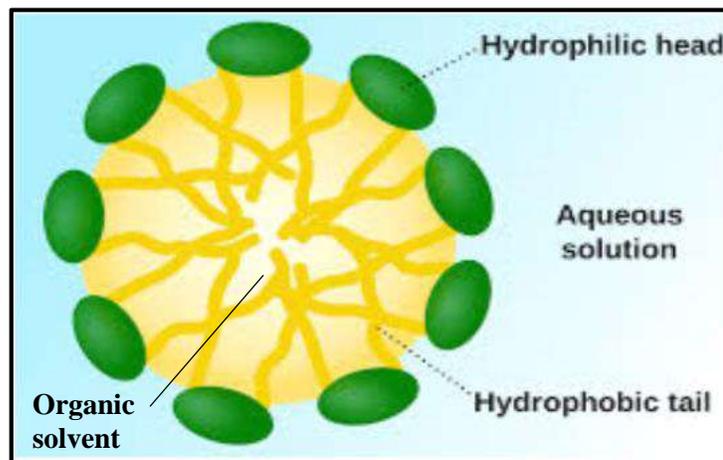
La emulsión Súper-Estabilizada es un producto nuevo que tiene las propiedades de aumentar las condiciones de estabilidad de las mezclas y sus propiedades mecánicas.

Las Emulsiones Asfálticas Súper-Estabilizadas son emulsiones asfálticas que permiten su transporte a largas distancias sin presentar problemas de sedimentación o separación de fases, incluso durante el traspaso entre reservorios reiteradas veces. La formulación de los agentes emulsificantes y aditivos que componen la fase acuosa de la emulsiones, elaborada por el fabricante, impide que a temperaturas superiores a 100°C se evapore completamente la fase acuosa de la emulsión.

Para poder explicar el comportamiento de este nuevo tipo de emulsiones, las cuales corresponden a las emulsiones utilizadas en la presente investigación, se presenta una breve revisión de la literatura acerca de las emulsiones asfálticas.

Como se ha presentado anteriormente, las emulsiones asfálticas son sistemas formados por dos fases (agua y asfalto) estabilizados a través de aditivos químicos denominados emulsificantes, los cuales están compuestos por una cadena hidrocarbonada la cual tiene un extremo hidrofóbico y otro extremo hidrofílico. Cuando las moléculas del emulsificante se encuentran en un medio completamente acuoso, el extremo hidrofóbico tiende a reducir la superficie de contacto con el agua adoptando la disposición indicada en la Figura 28, dando origen a las micelas. (Rodríguez, 2001)

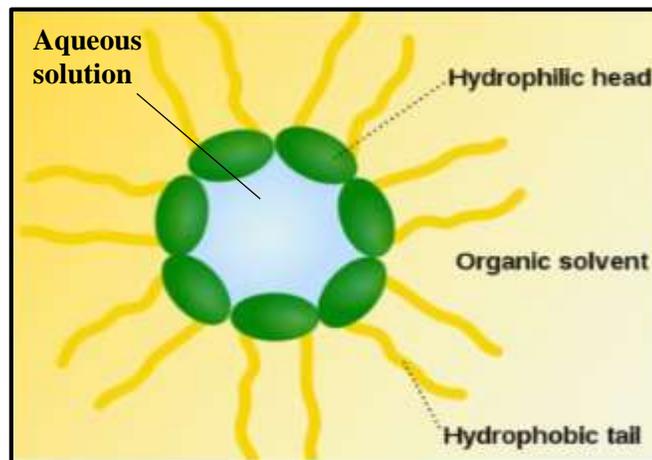
Figura 28. Estructura molecular de las micelas en un medio acuoso



Fuente. (Rodríguez, 2001)

Cuando se invierten las fases, es decir, el medio acuoso va desapareciendo paulatinamente, las micelas adoptan una forma inversa a la original como se presenta en la Figura 29, donde los extremos hidrofóbicos prefieren estar en contacto con los compuestos orgánicos y los extremos hidrofílicos experimentan una repulsión orientándose hacia el interior de las micelas. El medio acuoso residual experimentará el mismo fenómeno de repulsión, agrupando las moléculas de agua en el interior de las micelas donde encuentra afinidad con los extremos hidrofílicos.

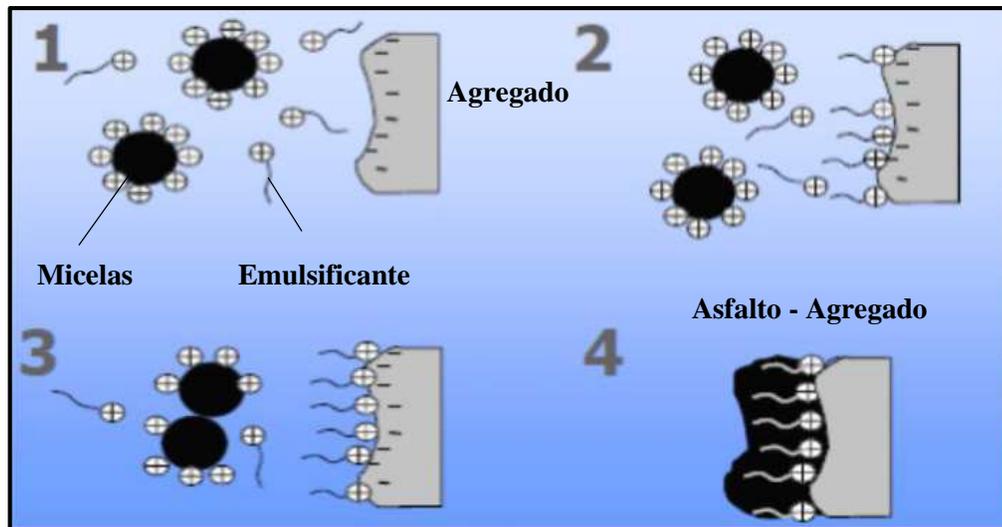
Figura 29. Estructura molecular invertida de las micelas en un medio orgánico



Fuente. (Rodríguez, 2001)

Durante el proceso de fabricación de mezclas con emulsiones asfálticas tradicionales, al entrar en contacto con el material granular se producen reacciones físico-químicas entre ellas, que permiten cubrir completamente el agregado con el ligante asfáltico, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Comportamiento físico-químico del emulsificante convencional durante el proceso de mezclado



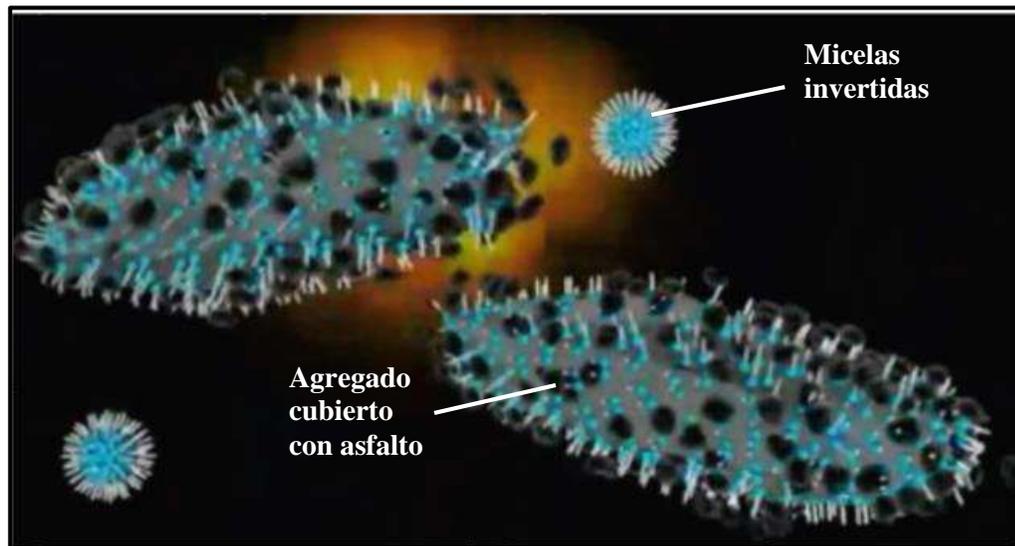
Fuente. (Thenoux, 2014)

Debido a que los agentes emulsificantes tienen una carga eléctrica opuesta a la de los agregados, se genera una atracción hacia el material granular, produciéndose un contacto con los extremos hidrofílicos. A medida que avanza este efecto, las micelas van perdiendo su disposición original dejando el ligante asfáltico libre en el medio acuoso, el cual entra en contacto con los agregados y se adhiere a este. Dada esta nueva disposición, los extremos hidrofóbicos ejercen una fuerza de atracción por el ligante asfáltico hacia ellas, efecto que permite cubrir completamente el agregado con el ligante asfalto.

Al utilizar temperaturas superiores a los 100°C en el proceso de fabricación de mezclas con emulsiones asfálticas tradicionales, la emulsión asfáltica pierde completamente su medio acuoso junto al emulsificante dificultando su posterior compactación. En cambio, las Emulsiones Asfálticas Súper-Estabilizadas, durante el proceso de mezclado evitan la total evaporación del medio acuoso, permaneciendo un porcentaje de agua residual junto al emulsificante formando micelas invertidas que permiten la compactación de la mezcla. La Figura 31 muestra la presencia de micelas invertidas

durante el proceso de mezclado con Emulsiones Asfálticas Súper-Estabilizadas a temperaturas superiores a 100°C.

Figura 31. Presencia de micelas invertidas durante el proceso de mezclado con Emulsiones Asfálticas Súper-Estabilizadas



Fuente. (Hanz, 2012)

Las micelas invertidas se encuentran distribuidas en el ligante asfáltico generando planos de deslizamiento que permite la densificación de la mezcla a bajas temperaturas respecto a una Mezcla Asfáltica en Caliente. Efectos similares han sido estudiados referentes a mecanismos de lubricación a nivel microscópico y nanoscópico. Se ha demostrado que la utilización de las micelas invertidas reduce significativamente el coeficiente de fricción entre materiales. (Hanz, 2012)

2.3.2.4. Propiedades Básicas de Emulsión

Entre las propiedades más importantes de las emulsiones asfálticas se tienen:

- La estabilidad al almacenamiento
- La estabilidad ante los agregados pétreos
- El grado de adhesividad la viscosidad
- Características reológicas del residuo

2.3.2.4.1. Estabilidad en el almacenamiento

Todas las emulsiones asfálticas modifican en mayor o menor grado sus propiedades durante el manejo y almacenamiento. Los problemas más frecuentes que se pueden producir son los siguientes:

La formación de espuma.- Los emulsionantes, por su naturaleza química, forman espuma, por lo que se debe tener cuidado de no incluir aire en el momento de mezclado o agitación. Es recomendable transportarlas por medio de carro tanques provistos de sistemas rompeolas o tabiques que compartimenten el interior. El llenado de estos tanques debe hacerse prolongando la tubería con una manguera flexible hasta unos 10 o 20 cm del fondo.

Formación de natas y sedimentos.- Durante el almacenamiento en la obra, se pueden producir dos fenómenos que se acentúan con el tiempo. En la zona de contacto con el aire, se forma una película endurecida que protege al resto de la emulsión; para que se mantenga, es necesario su almacenamiento en depósitos cilíndricos de eje vertical alimentados desde el fondo. De igual manera, se produce una decantación, con el aumento de la viscosidad en las zonas inferiores del depósito, cuanto mayor sea la diferencia de densidades entre las fases dispersante y dispersa, y el tamaño de los glóbulos de asfalto. Para disminuir esta decantación, se pueden utilizar agentes estabilizantes, aumentar la concentración de la emulsión o lograr una mayor finura de la dispersión. Mientras no se produzca la rotura de la emulsión, este fenómeno es reversible, mediante la agitación y trasvase.

Mezclas.- Las emulsiones asfálticas son estables mientras están en su medio. Si una emulsión básica se mezcla con un medio ácido o se pone en contacto con cargas positivas, la emulsión romperá por reacción electroquímica. Por lo tanto, no se deben mezclar una emulsión catiónica con una aniónica. De igual manera, al diluir la emulsión, se debe tener en cuenta que el agua de dilución sea de la misma característica y que no tenga carga opuesta a la de la emulsión.

Los aditivos.- Muchas veces en obra se adicionan un determinado aditivo con el fin de mejorar la adhesividad de una emulsión con el agregado. La gran mayoría de las veces puede llevar a la rotura de la emulsión, pues no se realiza un estudio de la afinidad entre el activante y el emulsificante.

La temperatura.- Las emulsiones asfálticas son estables y conservan sus propiedades a temperaturas comprendidas entre 5°C y 80°C. Por debajo de la temperatura mínima, los glóbulos de asfalto se rigidizan, aumentando la viscosidad de la emulsión y disminuyendo su adhesividad. De igual manera, se acelera el proceso de sedimentación por el aumento de densidad debido al incremento del volumen de los glóbulos. Cuando se aumenta la temperatura, por una parte hay un incremento de la energía cinética de las moléculas del emulsificante, por lo que abandonan a los glóbulos de asfalto, disminuyendo la estabilidad de la emulsión. Por otra parte, el agua puede iniciar su proceso de evaporación con la formación de natas de asfalto en la superficie del líquido, obstruyendo las bombas y difusores de riego.

2.3.2.4.2. Estabilidad de la emulsión ante los agregados pétreos

Representa un problema bastante complejo, que tiene que ver con la forma de rotura de la emulsión al entrar en contacto con el agregado. Cuanto más fino sea el agregado, más rápida será la rotura de la emulsión, al aumentar la superficie específica y, por tanto, la absorción de agua por parte de las partículas de agregado. La velocidad de la rotura dependerá también de la humedad del agregado, el clima en el lugar de la obra, el tipo de emulgente, naturaleza química del cemento asfáltico y de la granulometría de la emulsión.

2.3.2.4.3. El grado de adhesividad y la viscosidad

Adhesividad.- Es una propiedad difícil de evaluar y en donde es necesario involucrar de manera directa al agregado. La adhesividad depende del tipo y cantidad de emulgente, de la naturaleza del ligante bituminoso (cemento asfáltico o asfalto líquido),

de los aditivos incorporados al cemento asfáltico, el pH de la emulsión (valores cercanos a 7 proveen una buena adherencia, pero menores estabilidades), de la mineralogía del agregado y de manera directa de la granulometría de la emulsión y de su velocidad de rotura.

Viscosidad.- Esta propiedad depende directamente de la concentración de la emulsión: contenido de asfalto residual. Valores por encima del 65% de asfalto residual hacen crecer rápidamente este parámetro. Varía también con el tipo y cantidad del emulgente y de la granulometría de la emulsión. Emulsiones asfálticas con glóbulos de tamaño uniforme son más viscosas que con tamaños bien graduados. La granulometría depende del tipo de ligante (cemento asfáltico o cut-back) y de los fluidificantes del mismo.

2.3.2.4.4. Características del residuo

La consistencia del cemento asfáltico residual influye en las propiedades de la emulsión asfáltica. En tiempo frío, cuando se utilizan fluidificantes, se facilita la envuelta de las partículas de agregado, pero puede generar problemas ante la acción directa del tránsito por causa de un mal curado (evaporación de solventes), produciéndose ahuellamientos y deformaciones prematuras. Los fluidificantes pueden llegar a perjudicar la adherencia, dependiendo de su naturaleza, por una disminución de la viscosidad del ligante residual. La viscosidad del cemento residual debe ser función del tipo de aplicación, del clima de la zona del proyecto y del tránsito. (Rodríguez, 2001)

2.3.3. Diseño de Mezclas con Emulsión

Para el diseño se necesitan los siguientes componentes:

- Agregados
- Agua
- El emulsificante
- Cemento Asfáltico

2.3.3.1. Agregados

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

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

Algunas de estas propiedades se pueden determinar mediante ensayos de laboratorio, otras por simple inspección como se muestran en la siguiente Tabla.

Gradación y tamaño máximo de partícula

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones (huso granulométrico). Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de

partículas y la graduación para determinar si la granulometría del agregado cumple o no con las especificaciones.

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

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

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

Tabla 9. Ensayos para evaluar las propiedades de los agregados

Propiedad	Ensayo
Graduación y Tamaño máximo	Análisis granulométrico Por tamizado
Limpieza	Equivalente De arena
Dureza	Abrasión por la Máquina de Los Angeles
Capacidad de absorción y Peso específico	Gravedad específica y Absorción
Afinidad con el Asfalto	Ensayo de adherencia Agregado grueso
Afinidad con el Asfalto	Riedel Weber (Agregado fino)

Fuente. (Instituto Del Asfalto)

Granulometría del agregado.- La granulometría de partículas es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis de tamices consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra. Los concretos asfálticos son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen. Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

- Agregado grueso, material retenido por el tamiz de 2.36mm (No.8).
- Agregado fino, material que pasa el tamiz de 2.36mm (No.8).
- Relleno mineral, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm (No.30).
- Polvo mineral, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075mm (No.200).

El relleno mineral y el polvo mineral están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o de menos, de relleno o polvo mineral, puede causar que la mezcla aparezca excesivamente seca o excesivamente rica (o sea, la mezcla de pavimentación aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto). Dichos cambios en la mezcla pueden ocurrir

con pequeños cambios en la cantidad o en el tipo de relleno o polvo mineral utilizado. Por consiguiente, el tipo y la cantidad de relleno y polvo mineral usados en cualquier mezcla asfáltica de pavimentación deberán ser cuidadosamente controlados.

Limpieza

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

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075mm (No.200). El ensayo de equivalente arena (ASTM D-2419) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75mm (No.4).

Dureza

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

Forma de partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil. Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente se da con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

Textura superficial

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

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula. No existe un método directo para evaluar la textura

superficial. Es tan sólo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad. La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requieren un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos. Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

Peso específico

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

adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es que este ayuda en el cálculo del porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire, como será explicado más adelante. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado. La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla y luego restando de su valor, los pesos específicos del agregado y asfalto que conforman la mezcla. El resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra.

Todos los agregados son, hasta cierto punto, porosos. Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente, y
- Peso específico efectivo

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra. El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. El peso específico total asume que los poros que absorben agua no absorben asfalto. El peso específico aparente asume que todos los poros que son permeables al agua absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera. Por lo tanto, el peso específico efectivo, el cual discrimina

entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas trapecanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies. Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos (e.g. cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con precaución.

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar, es sumergida en agua y las partículas cubiertas son observadas visualmente. En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezclas son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento. (Instituto Del Asfalto)

2.3.3.2. Agua

El segundo componente en una emulsión asfáltica es el agua. Su contribución a las propiedades deseadas en el producto no puede ser minimizada. El agua puede contener minerales u otros elementos que afectan la producción de emulsiones asfálticas estables. Consecuentemente el agua potable puede no ser adecuada para las emulsiones

asfálticas. El agua encontrada en la naturaleza puede ser inadecuada debido a las impurezas, sea en solución o en suspensión coloidal. Preocupa particularmente la presencia de iones de calcio y de magnesio. Estos iones favorecen la formación de una emulsión catiónica estable. De hecho, frecuentemente se adiciona fluoruro de calcio a las emulsiones catiónicas, con el objeto de aumentar la estabilidad durante el almacenamiento.

Estos mismos iones, sin embargo pueden ser perjudiciales para emulsiones aniónicas. Y esto se debe a que las sales de calcio y de magnesio, insolubles en agua, se forman en la reacción con sales de sodio y potasio, solubles en agua normalmente utilizadas como emulsivos. De igual forma aniones de carbonatos y bicarbonatos pueden facilitar, gracias a su efecto “Amortiguador” la estabilización de emulsiones, pero pueden desestabilizar emulsiones catiónicas al reaccionar con emulsivos compuestos de hidrocloratos de aminas solubles en agua.

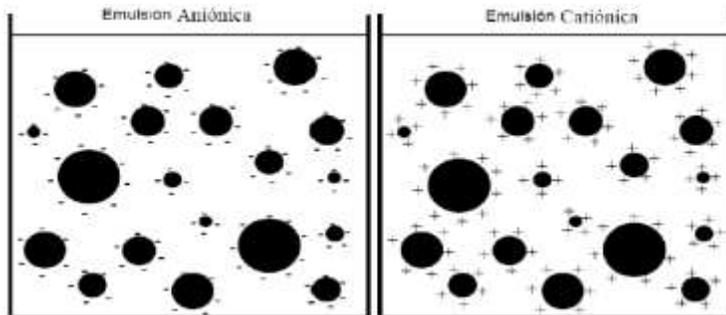
Aguas que contienen partículas no deberían utilizarse en la elaboración de emulsiones. Dichas aguas pueden ser particularmente perjudiciales para las emulsiones catiónicas. Comúnmente tales partículas están cargadas negativamente, y absorben rápidamente los agentes emulsivos, desestabilizando la emulsión. El uso de aguas impuras puede resultar un desequilibrio en los componentes de la emulsión, lo que puede afectar en forma adversa la performance o causar una rotura prematura.

2.3.3.3. El emulsificante

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte hidrofílica (generalmente es un grupo polar de tipo orgánico o inorgánico), soluble en el medio acuoso.

Los emulsificantes están compuestos generalmente por un radical alquilo R el cual es hidrofóbico y un componente hidrofílico, que se encuentran saponificados y con el contacto con el agua se disocian, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. En la figura se muestra una representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica.

Figura 32. Representación Esquemática De Las Emulsiones Aniónica Y Catiónica



Fuente. (Rodriguez, 2001)

Las propiedades de las emulsiones asfálticas dependen en gran medida en los agentes químicos utilizados como emulsivos. Aunque cuantitativamente es menor que el cemento asfáltico, se considera como el elemento esencial para su producción. Tienen como su función principal estabilizar y evitar la coalescencia de la emulsión (unión de los glóbulos de cemento asfáltico). El emulsificante permite rompimiento oportuno o cambia la tensión superficial en el área de contacto con el agregado. Pueden ser del tipo aniónico, catiónico según su carga eléctrica se desplace al ánodo o al cátodo. Su molécula consta de una parte muy afín con el cemento asfáltico que queda firmemente anclada en él, y de otra parte cargada iónicamente, dando lugar a la formación de la micela de asfalto con sus cargas eléctricas alrededor, generando fuerzas repulsivas, responsables de la estabilidad de la emulsión. Para la formulación de la emulsión es necesario tener un amplio conocimiento sobre las características físico-químicas del emulgente. Pequeñas variaciones en su constitución pueden influir de manera negativa en la calidad final de la emulsión. Teniendo en cuenta la definición de los emulsificantes, se pueden clasificar y hacer referencia según su carácter iónico en:

— Emulsionantes aniónicos

- Emulsionantes catiónicos
- Emulsionantes anfólitos
- Emulsionantes no iónicos

2.3.3.4. Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico es elemento básico de la emulsión asfáltica y en la mayoría de los casos, constituye entre un 50 y un 70% de la emulsión. La química del asfalto es una materia compleja y no es necesario para el caso, examinar todas las propiedades del cemento asfáltico si afectan significativamente la emulsión final. Sin embargo no hay una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad con que el asfalto puede ser emulsionado. Si bien la dureza de la base de cemento asfáltico puede variar, la mayoría de las emulsiones es hecha con asfaltos con un rango de penetraciones 60-250. En ocasiones. Las condiciones climáticas pueden requerir una base asfáltica más dura o más blanda. En cualquier caso la compatibilidad química entre el agente emulsivo y el cemento asfáltico es esencial para la producción de una emulsión estable. El asfalto proviene principalmente de la refinación del crudo de petróleo. El asfalto está compuesto básicamente de grandes moléculas de hidrocarburos y su composición química es variada. La estructura coloidal del asfalto depende de la naturaleza química y del porcentaje de moléculas de hidrocarburos y de la relación entre estas. Las variadas propiedades químicas y físicas del asfalto, entonces se deben esencialmente a las variaciones en la fuente del crudo y en los métodos de refinación. Naturalmente las propiedades del cemento asfáltico afectaran el comportamiento del residuo asfáltico en el camino.

La compleja interacción de las complejas moléculas hace casi imposible predecir con precisión el comportamiento de un asfalto que será emulsificador. Por esta razón, sobre la producción de emulsiones asfálticas se realizan constantemente controles de calidad. Cada comerciante de emulsiones tiene sus propias formulaciones y técnicas de producción. Ellas han sido desarrolladas para alcanzar óptimos resultados con el cemento asfáltico y los químicos emulsivos empleados. (Rodríguez, 2001)

En la práctica se recomienda que el ligante presente las siguientes características:

- Estado coloidal: tipo sol y sol-gel
- Contenido de asfáltenos: 18% - 26%
- Contenido de resinas: 30% - 42%
- Contenido de aceites: 44% - 50%
- Contenido de resinas cálcicas cíclicas aromáticas: 15% del contenido de resinas.
- Contenido de parafinas: bajo.
- Contenido de ácidos naftenicos: alto (índice de acides mayor que 1).
- Índice de penetración: entre -1 y +1.
- Bajo contenido de sal.

2.3.4. Método Marshall

2.3.4.1. Consideraciones preliminares

El Método de dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla. El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos. Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C (140 °F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras

se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado. Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del Flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.

El contenido óptimo de asfalto se determina, de acuerdo a recomendación del Instituto del Asfalto (Manual MS - 2), a través de la media aritmética de los porcentajes que llevan a:

- La máxima estabilidad,
- La máxima densidad de la mezcla y
- Al volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la Fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto (V_b) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire (V_v) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

2.3.4.2. Descripción del Método Marshall

- El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y $\frac{1}{2}$ " de espesor por 4" de diámetro (64 x 102 mm).

- Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado. En la práctica se observa que el contenido óptimo de asfalto se encuentra alrededor del 6 %, con referencia al peso de los agregados pétreos. Mayores porcentajes deben conducir a una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla. Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Adicionalmente se deben incluir 6 briquetas para determinar los efectos del agua en la estabilidad y el flujo. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb). Además se requerirá aproximadamente un galón de asfalto.

2.3.4.2.1. Equipo

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- a) Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- b) Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50 °F (10 °C) y 450 °F (232 °C).
- c) Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- d) Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).

- e) Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- f) Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- g) Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- h) Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- i) Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

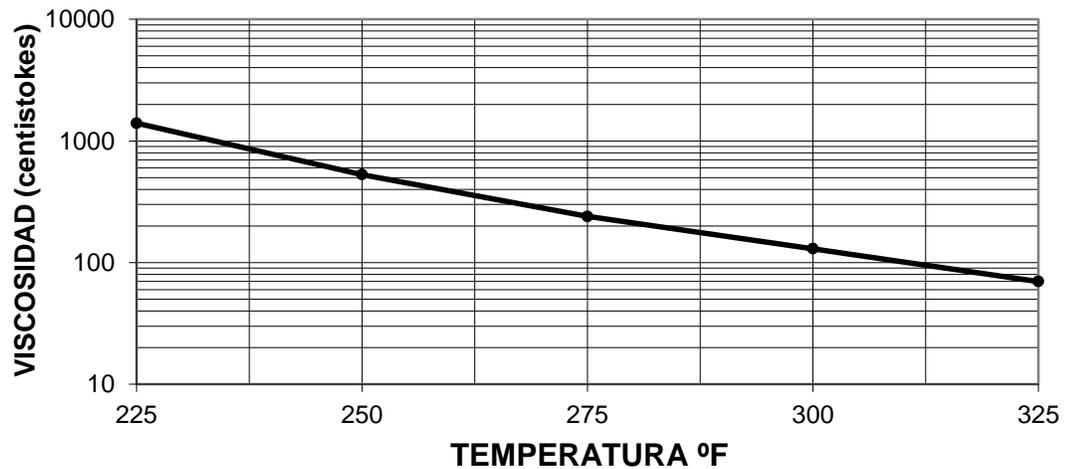
2.3.4.2.2. Preparación de las muestras para ensayo

Número de muestras: Por lo menos 3 para cada contenido de asfalto. Chequeo y preparación de agregados:

- Determinar la gradación de los agregados propuestos, de acuerdo a los métodos de ensayo C-117 y C-136 de la ASTM.
- Determinar el peso específico Bulk y el aparente de los agregados, de acuerdo a los métodos de ensayo C-127 y C-128 de la ASTM.
- Seleccionar la dosificación de agregados que cumpla con la curva de densidad máxima para el tamaño máximo de partículas, además que cumpla el requisito del porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.
- Calcular los pesos específicos Bulk y aparente de la combinación de agregados elegida.
- Determinación de la temperatura de mezclado y de compactación: Sobre la base de la curva Viscosidad-Temperatura, se elige la temperatura a la cual el asfalto alcanzará una viscosidad cinemática de 170 ± 20 Centistokes para la

temperatura de mezclado y 280 ± 30 Centistokes para la temperatura de compactación.

Figura 33. Curva Viscosidad – Temperatura para Cementos Asfálticos



Fuente. (Instituto Del Asfalto)

2.3.4.2.3. Preparación de las mezclas

Pesar por separado en bandejas, para cada muestra de ensayo, la cantidad adecuada de cada fracción que produzca una bachada que de cómo resultado una muestra compactada de $2,5 \pm 0,1$ " de espesor ($63,5 \pm 1,3$ mm). Colocar las bandejas para el mezclado en el horno y calentarlas a una temperatura aproximada de 25 °F ($13,9$ °C), por encima de la de mezclado. Calentar el asfalto a una temperatura lo suficientemente alta para que fluya fácilmente, pero sin que ésta sea mayor que la de mezclado. Colocar la bandeja de mezclado y su contenido en la balanza y pesar agregando el asfalto necesario. Luego se coloca el palustre en la bandeja y se determina el peso total de los componentes de la mezcla más el equipo de mezclado con aproximación a $0,2$ g. Se mezclan los agregados y el asfalto con el palustre hasta obtener una mezcla homogénea.

2.3.4.2.4. Compactación de los núcleos de prueba

Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central. Se quita el collar y se alisa suavemente la superficie, hasta obtener una forma ligeramente redondeada. Inmediatamente antes del proceso de compactación la temperatura de la mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida. Colocar nuevamente el collar de extensión, y ubicarlo en el pedestal de compactación. Se aplican 75 (35 o 50) golpes con el martillo, según lo especificado para la categoría de tráfico. Se quitan la base y el collar se le da vuelta y se vuelva a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra. Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Se saca la muestra del molde por medio de un extractor.

2.3.4.3. Ensayo Marshall

El ensayo debe efectuarse después de transcurridas 16 horas de la compactación.

2.3.4.3.1. Procedimiento de ensayo

Para complementar el diseño de la mezcla, se deben efectuar los siguientes ensayos y análisis:

- a. En la mezcla sin compactar:
 - Peso Específico efectivo.
 - Peso Específico máximo.
- b. En la muestra compactada:
 - Peso Específico Bulk.
 - Estabilidad y flujo a 60 °C.
 - Análisis de densidad y Vacíos.

2.3.4.3.2. Equipo requerido

Máquina de ensayo Marshall, con dispositivo eléctrico, diseñada para aplicar las cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para el ensayo de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo. Baño de agua con una profundidad mínima de 15 cm (6”), provisto de un termostato para mantener una temperatura de $60\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

2.3.4.3.3. Pruebas de estabilidad y fluencia

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

- a. Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4” debajo del pivote.
- b. Sumergir la briqueta en baño de agua a 60 °C (140 °F), durante 30 a 40 minutos.
- c. Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a $37,8\text{ °C}$ (70 a 100 °F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.
- d. Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guidor superior de la mordaza.
- e. Aplicar la carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newtons (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia).

- f. Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guiador, y retírese en el instante mismo que la carga empieza a decrecer, se anota el valor de flujo en unidades de 0,25 mm (0,01”). Por ejemplo si la muestra se deforma 3,8 mm (0,15”), su fluencia será 15.
- g. Se promedian los valores de estabilidad y flujo para todas las muestras con cada contenido de ligante.

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

2.3.4.4. Análisis de densidad y vacíos

Después de la conclusión de los ensayos de estabilidad y fluencia, se realiza el análisis de densidad y vacíos, para cada grupo de núcleos de prueba, de la siguiente manera:

- a. Promediar los valores de peso específico Bulk de todas las muestras de ensayo para cada contenido de ligante; los valores que por simple inspección presenten error, no se consideran.
- b. Determinar el peso unitario promedio para cada contenido de ligante, multiplicando el valor promedio del peso específico Bulk por 1000 para peso unitario en kg/m^3 , por 62,4 para peso unitario en lb/pe^3 .
- c. Dibujar un gráfico de relación de peso unitario vs. contenido de asfalto, uniendo los puntos mediante una curva intermedia, que proporcione el mejor ajuste para todos los valores.
- d. Leer directamente en la curva trazada, los valores de peso unitario para cada contenido de asfalto ensayado y obtener el peso específico Bulk equivalente, dividiendo entre 1000 Kg/m^3 (ó entre 62,4 lb/pe^3). Los valores de peso específico Bulk así obtenidos, serán usados en el cálculo posterior de vacíos.
- e. Utilizando el Peso Específico máximo teórico de la mezcla bituminosa (ASTM D-2041) y el Peso Específico Bulk de los agregados, se calcula el Peso Efectivo del agregado, el asfalto absorbido por los agregados secos (en kg o lb), el

porcentaje de vacíos de aire y el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM).

2.3.4.5. Presentación de resultados

Los valores de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos en la mezcla, se procesan como se indica a continuación:

- a. Promediar los valores de flujo y estabilidad para todas las muestras de un porcentaje de asfalto dado. Valores errados en comparación con los otros, no se incluirán en el promedio.

- b. Se elaboran gráficos, para presentar las relaciones entre los siguientes valores:
 - Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto (ver figura 34)
 - Peso Unitario vs. Porcentaje de Asfalto (ver figura 35)
 - Porcentaje de Vacíos en la Mezcla vs. Porcentaje de Asfalto (ver figura 36)
 - Flujo vs. Porcentaje de Asfalto (ver figura 37)
 - Porcentaje de Vacíos en el Agregado vs. Porcentaje de Asfalto (ver figura 38)

En cada gráfico se debe unir los puntos obtenidos mediante una curva promedio, procurando que todos los valores se ajusten a ella en forma adecuada.

2.3.4.6. Determinación del contenido óptimo de asfalto

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los datos obtenidos anteriormente, considerando los resultados de las curvas correspondientes a Estabilidad, Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos, en las cuales se determina el contenido de asfalto para conseguir:

- a. Estabilidad máxima.
- b. Peso unitario máximo.
- c. El valor medio del porcentaje de vacíos según tabla.

El contenido óptimo de asfalto será el promedio numérico de los contenidos de asfalto indicados anteriormente.

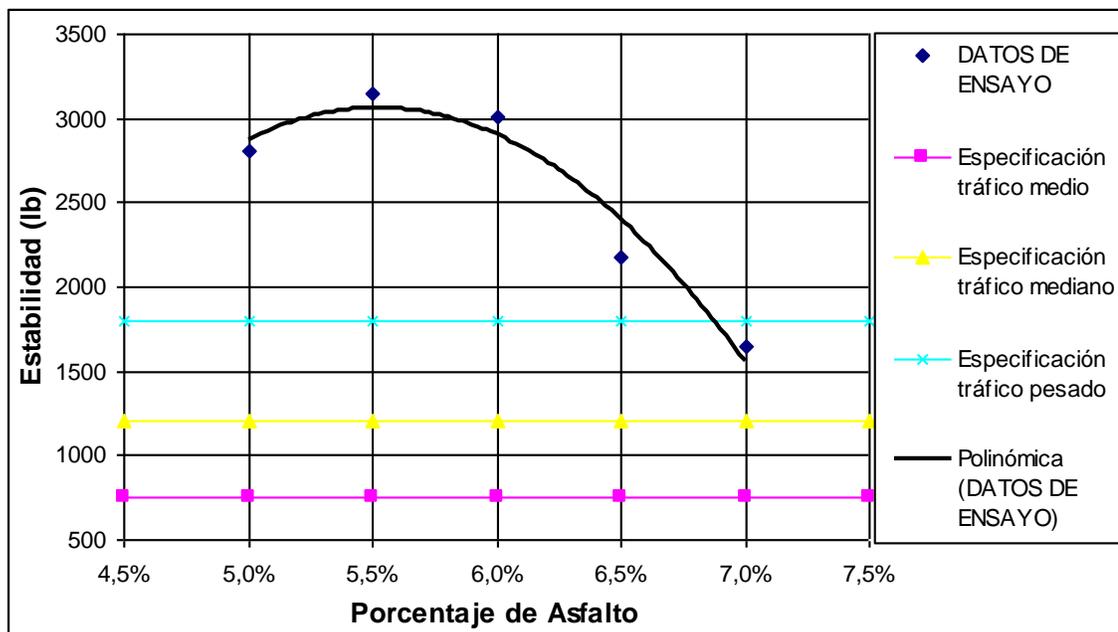
2.3.4.7. Tendencias y relaciones de los resultados de ensayo

Las curvas de ensayo trazadas como se describió anteriormente, constituyen una norma razonablemente consistente para diseño de mezclas asfálticas de gradación densa. Las tendencias que generalmente se observan se detallan a continuación:

- a) El valor de la estabilidad aumenta al aumentar el contenido de asfalto hasta un punto máximo, a partir del cual la estabilidad decrece.
- b) El valor del flujo aumenta al aumentar el contenido de asfalto. En muchos casos el valor mínimo corresponderá a un contenido de asfalto menor que el mínimo usado en las muestras de ensayo.
- c) La curva de peso unitario de la mezcla total, es similar a la curva de estabilidad, excepto que el máximo peso unitario se consigue normalmente (no siempre), con un contenido de asfalto un poco más alto que el correspondiente a la máxima estabilidad.
- d) El porcentaje de vacíos (de aire) se reduce al aumentar el contenido de asfalto, hasta llegar al final a un contenido mínimo de vacíos.
- e) El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, generalmente decrece hasta un valor mínimo, y luego aumenta al incrementarse el contenido de asfalto.

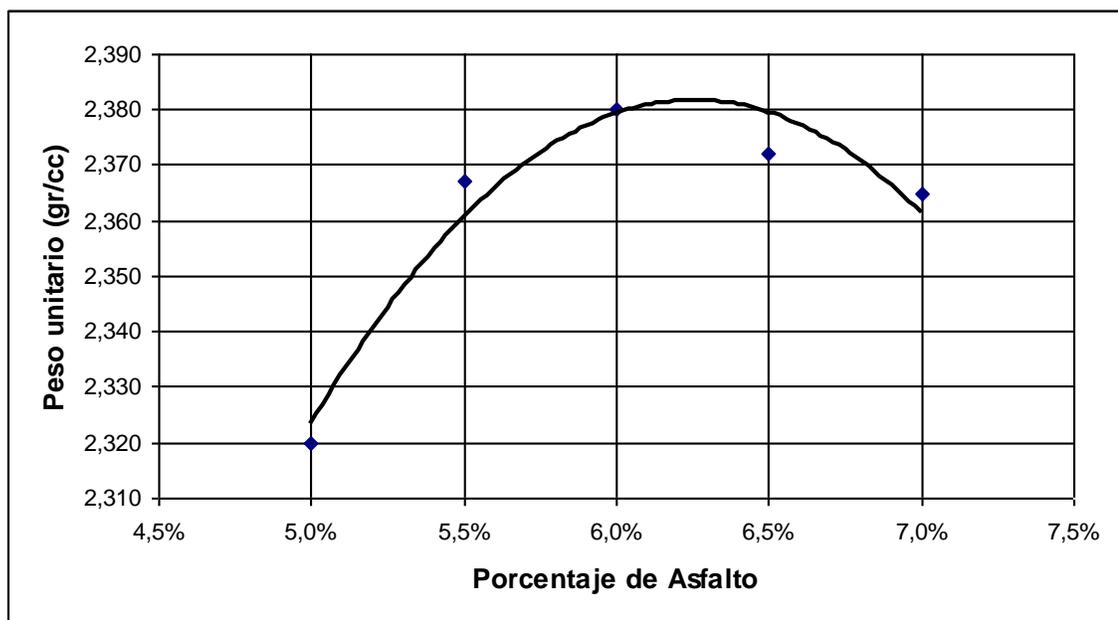
2.3.4.8. Curvas método Marshall

Figura 34. Curva Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto



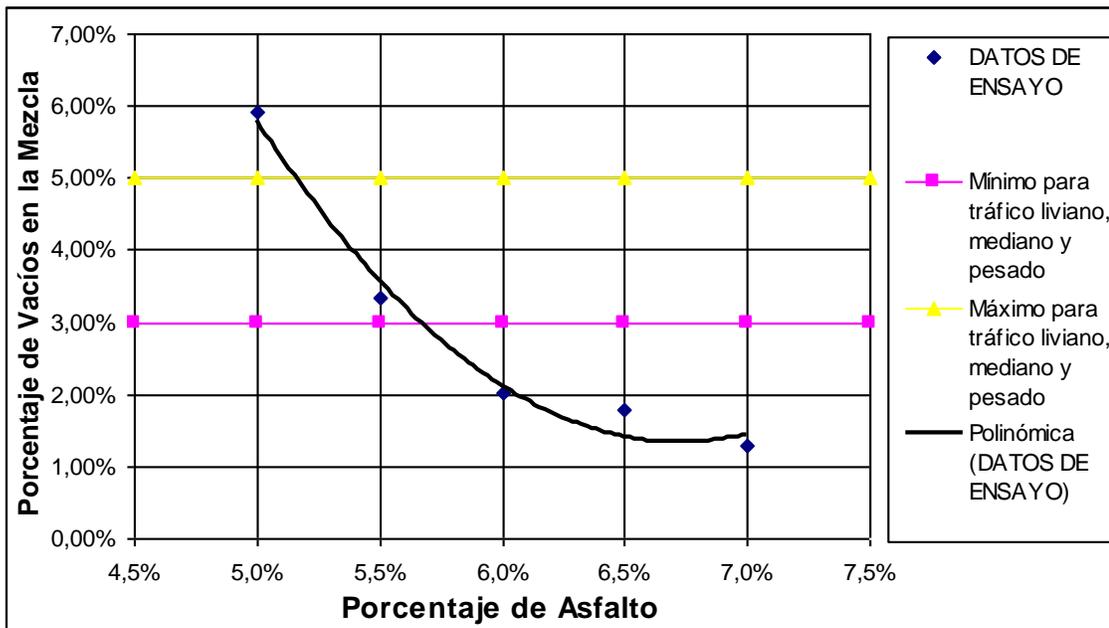
Fuente. (UMSS)

Figura 35. Curva de Peso Unitario vs. Porcentaje de Asfalto



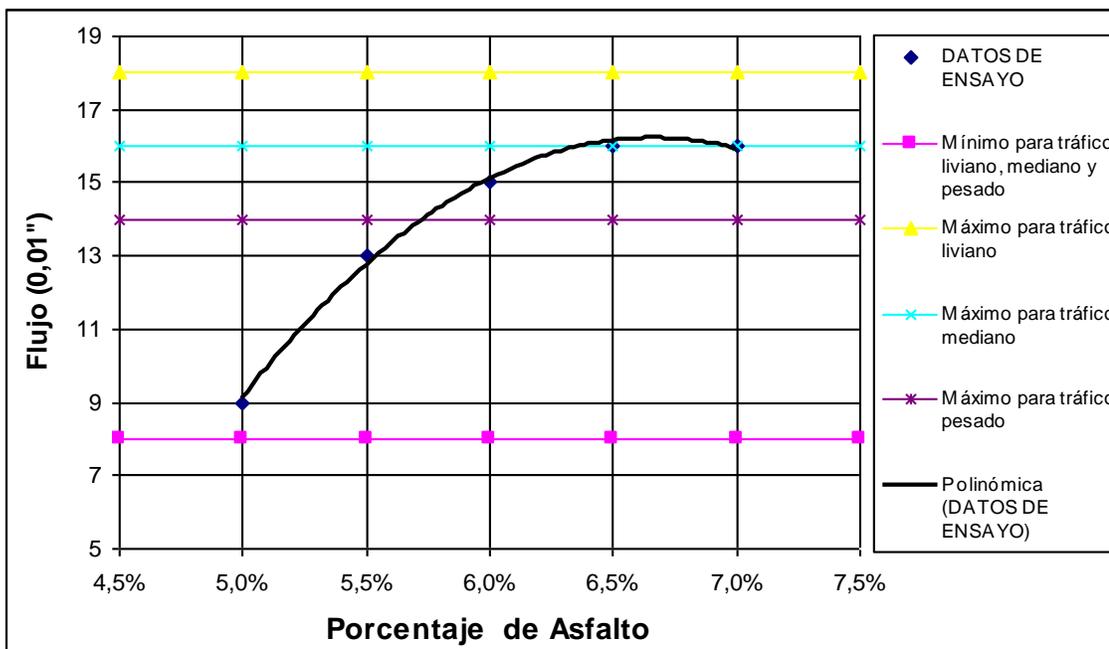
Fuente. (UMSS)

Figura 36. Curva Porcentaje de Vacíos en la Mezcla vs. Porcentaje de Asfalto



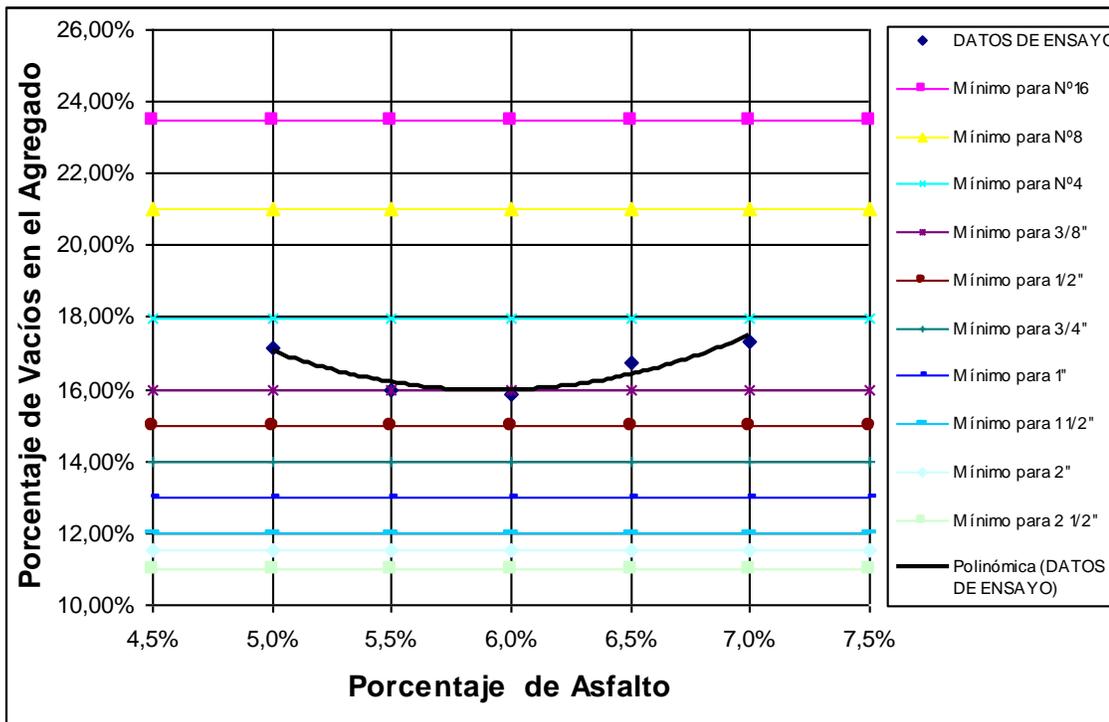
Fuente. (UMSS)

Figura 37. Curva Flujo vs. Porcentaje de Asfalto



Fuente. (UMSS)

Figura 38. Curva Porcentaje de Vacíos en el Agregado vs. Porcentaje de Asfalto



Fuente. (UMSS)

CAPÍTULO III. MEZCLA ASFÁLTICA TEMPLADA CON EMULSION CONVENCIONAL Y CON EMULSIÓN SÚPER-ESTABILIZADA

Este capítulo describe el proceso para realizar mezcla asfáltica templada con emulsión súper-estabilizada, queriendo demostrar que una alternativa más es hacer mezcla asfáltica templada con emulsión súper-estabilizada cuyas propiedades son iguales o mejores que una mezcla asfáltica templada con emulsión convencional. La mezcla asfáltica templada es una alternativa de hacer las mezclas con una diferente temperatura, porque la utilización de temperaturas altas ha generado en otras investigaciones que los asfaltos se oxidan, se envejecen y temperaturas bajas no se puede utilizar muy bajas porque se produce el fraguado y ya no logra su densificación, o seguimos haciendo calientes o buscamos una temperatura donde esas propiedades no se consideren críticas y ahí está la Templada. Además los tiempos van cambiando y cada vez la tecnología hace aparecer más materiales, más insumos para realizar las mezclas asfálticas, entonces ahora es importante estudiar y evaluar la presencia de nuevos materiales, como es este caso que tenemos una Emulsión Súper-Estabilizada. Las mezclas asfálticas templadas serán analizadas desde dos puntos de vista, la primera haciendo uso de la Emulsión Convencional y la segunda con la Emulsión Súper-Estabilizada, para poder analizar y comparar sus propiedades.

3.1. Ubicación

Ubicación en el contexto nacional

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

Figura 39. Mapa Político del Estado Plurinacional de Bolivia.



Fuente: <http://www.comercioexterior.ub.edu/>

Ubicación en el contexto departamental

La Provincia de Cercado, se sitúa al Noreste del Departamento de Tarija, entre los paralelos de $20^{\circ}56'$; $21^{\circ}36'$ de latitud sur y los $64^{\circ}05'$; $65^{\circ}13'$ de longitud oeste, tiene una extensión de 4861 Km².

Figura 40. Mapa Político del Departamento de Tarija



Fuente: <http://www.comercioexterior.ub.edu/>

Ubicación en el contexto regional

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

Figura 41. Mapa de la Provincia Cercado.



Fuente: <http://www.educa.com.bo/sites/default/files/tarija-provincia-cercado-0116.jpg>

Ubicación del banco de materiales

Figura 42. Ubicación de la comunidad de San Mateo



Fuente: <http://www.Google Earth.jpg>

Figura 43. Ubicación de la Chancadora Garzón



Fuente: <http://www.Google Earth.jpg>

Figura 44. Ubicación de acopio de materiales



Fuente: <http://www.Google Earth.jpg>

3.2. Características de los materiales de la mezcla

3.2.1. Características del banco de materiales

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales en los cuales nos proporciona una seguridad para el diseño que se realice, para el trabajo de investigación se utilizara los agregados de la Chancadora Garzón cuyo material es procedente de San Mateo, el cual tiene una gran cantidad de áridos que cumple con las especificaciones para el trabajo de investigación, la comunidad de San Mateo se encuentra a 5 kilómetros de la ciudad de Tarija, esta comunidad se dedica mayormente a la agricultura, a continuación se muestra imágenes de la Chancadora Garzón.

Figura 45. Chancadora Garzón



Fuente: Elaboración Propia

Figura 46. Equipo y maquinaria



Fuente: Elaboración Propia

Figura 47. Oficinas de la Chancadora Garzón



Fuente: Elaboración Propia

Figura 48. Equipo y maquinaria



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Características de la emulsión

En este trabajo de investigación para estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la Mezcla Asfáltica Templada utilizamos la siguiente Emulsión Convencional cuyas características son las siguientes:

Figura 49. Certificado de Calidad de Origen de Emulsión Convencional

Certificado N.º: 38-0147/17 A		Data de emissão: 27/01/17			
Cliente: SEGOVIA					
Produto: BETUMIX CRS-2H		Quantidade: 20.200 KG			
Ordem de carregamento N.º: 38-19764/17		Data de fabricação: 23/12/16			
FAT: 250 16 C			LOTE: 38-14872/16		
Características do produto					
ENSAIO	MÉTODO	UNID.	ESPECIF.	RESULTADO	
				STRAT.	CLIENTE
Viscosidade Saybolt-Furoi a 50°C	AASHTO T 59 ¹ Seção 08	Seg.	100 – 400	277	
Estabilidade, 24 hrs.	AASHTO T 59 ¹ Seção 17	% massa	1 máx.	0,3	
Desemulsibilidade	AASHTO T 59 ¹ Seção 09	% massa	40 mín.	55	
Carga da partícula	AASHTO T 59 ¹ Seção 07	---	Positiva	POS	
Peneiração, 0,84mm	AASHTO T 59 ¹ Seção 12	% massa	0,1 máx.	0,0	
Destilação					
Solvente destilado	AASHTO T 59 ¹ Seção 05	% volume	3 máx.	0,0	
Resíduo		% massa	65 mín.	68,3	
Ensaio sobre o resíduo seco					
Penetração (100g, 5s, 25°C)	AASHTO T 49	0,1mm	50 – 250	59	
Ductilidade, 25°C, 5 cm/min.	AASHTO T 51	Cm	100 mín.	>100	
Solubilidade em tricloroetileno	AASHTO T 44	%	97,5 mín.	98,5	
Ensaio da mancha	AASHTO T 102	---	Negativo	NEG	
95% heptano + 5% xileno					
90% heptano + 10% xileno					
85% heptano + 15% xileno					
80% heptano + 20% xileno					
AASHTO T 59 - Rev. 2009					

Fuente: Stratura Asfaltos

En este trabajo de investigación para estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la Mezcla Asfáltica Templada utilizamos la siguiente Emulsión Súper-Estabilizada cuyas características son las siguientes:

Figura 50. Certificado de Calidad de Origen de Emulsión Súper-Estabilizada

Característica		Unidad	NORMAS	
			NLT	ECM-m
			minimo	maximo
Viscosidad	A 25° c			-
	A 50°C	s	138	20
Carga de las partículas			194	Positiva
Contenido de agua (en volumen)		%	137	- 35
Betún asfáltico residual		%	139	59 -
Fluidificante por destilación		%	139	- 12
Sedimentación (a los 7 días)		%	140	- 5
Tamizado		%	142	- 0,10
Estabilidad: ensayo de mezcla con cemento		%	144	- -
Penetración (25°C:100g,5s)		0,1 mm	124	120 200
Punto de reblandecimiento anillo y bola		°C	125	40 -
Ductilidad (5°C,5cm/min)		Cm	126	10 -
Recuperación elástica (25°C: torsión)		%	329	12 -

Fuente: Provisa Chile

3.3. Muestreo de los materiales

Para la obtención de los agregados que se utilizara en la mezcla asfáltica templada, que serán materiales provenientes de la Chancadora Garzón, en cantidades lo suficientemente necesario para realizar su caracterización y el Estudio de Mezclas Asfálticas con Emulsión Súper-Estabilizada, se realizó la extracción de la muestra de los áridos con la ayuda de una pala de los tres acopios de materiales de grava, gravilla y arena, tanto de arriba del centro y de abajo para que este homogéneo la muestra y se las puso en bolsas de azúcar, posteriormente se las cargo en una camioneta para trasladar las muestras hasta el laboratorio de la universidad.

Figura 51. Acopio de la Grava



Fuente: Elaboración Propia

Figura 52. Acopio de la Arena



Fuente: Elaboración Propia

Figura 53. Acopio de la Gravilla



Fuente: Elaboración Propia

Figura 54. Muestro del material



Fuente: Elaboración Propia

Para la obtención de la Emulsión Convencional que fue proporcionada por la empresa PROCOSUR, se tomara una muestra lo suficientemente representativa para realizar la caracterización del mismo y los ensayos de laboratorio necesarios para realizar el Estudio de Mezclas Asfálticas Templada, de las muestras de 200 litros he recibido una muestra en un recipiente, en este caso en una botella de 2 litros como se muestra en la figura.

Figura 55. Obteniendo la Muestra de Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración Propia

Para la obtención de la Emulsión Súper-Estabilizada que fue proporcionada por los representantes de la empresa PROVISA en Bolivia con sede en el departamento de Santa Cruz, se tomara una muestra lo suficientemente representativa para realizar la caracterización del mismo y los ensayos de laboratorio necesarios para realizar el Estudio de Mezclas Asfálticas con Emulsión Súper-Estabilizada, de las muestras de 200 litros he recibido una muestra en un recipiente como se muestra en la figura.

Figura 56. Muestra de Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración Propia

3.4. Caracterización de los materiales

3.4.1. Ensayos de los agregados

Para la caracterización de los agregados se realizaron los ensayos que demuestran la calidad que presentan para realizar el Estudio de Mezclas Asfálticas con Emulsión Súper-Estabilizada, para ello se mencionaran todos los ensayos realizados.

Se realizara los ensayos para los agregados pétreos:

- Grava 3/4"
- Grava 3/8" (Gravilla)
- Arena Triturada

3.4.1.1. Ensayo de Granulometría

Objetivo

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio

de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría).

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de $2\frac{1}{2}$, 2, $1\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100, y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como No. 4, No. 10, etc.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla No. 10 (esto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla No. 10 pero queda retenido en la malla No. 200 (partículas mayores que 0,075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla No. 200 se llama fino y corresponde a impurezas, limo y arcilla.

En el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Procedimiento

Figura 57. Sacando una muestra de las bolsas con una cuchara para ponerlas en la bandeja y pesarlas en la balanza



Fuente: Elaboración Propia

Figura 58. Juego de tamices por donde se introducirá la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 59. Tamizando a detalle la muestra para luego obtener el peso retenido en el tamiz



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Tabla 10. Planilla de resultados de las granulometrías de la grava, gravilla y arena del ensayo.

Peso Total Seco	5000,0 gr.		2000,0 gr.		1000,0 gr.	
Tamiz	Grava - Garzón		Gravilla - Garzón		Arena Triturada - Garzón	
N°	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,0	100,0
3/4"	873,10	82,54	0,00	100,00	0,0	100,0
1/2"	2334,20	35,85	50,60	97,47	0,0	100,0
3/8"	1093,10	13,99	544,20	70,26	0,00	100,0
N° 4	693,10	0,13	1284,60	6,03	145,50	85,42
N° 8	0,00	0,13	112,40	0,41	180,80	67,34
N° 16	0,00	0,13	2,20	0,30	122,80	55,06
N° 30	0,00	0,13	0	0,30	98,50	45,21
N° 50	0,00	0,13	0	0,30	162,60	28,95
N° 100	0,00	0,13	0	0,30	197,50	9,00

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Ensayo de Equivalente de Arena

Objetivo

El ensayo de Equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N° 4 (4.75mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente se debe de tener una muestra del material y tamizarlo por el tamiz N°4 para poder tener la muestra que se utilizara para este ensayo colocarlo en un recipiente. Luego se debe de colocar la muestra que se utilizara de arena en el cilindro, se deberá verter la muestra en el cilindro con la ayuda de un embudo y hacer momento del cilindro para que se puedan perder todas las burbujas que tenga, dejar en reposo durante 10 ± 1 minuto.

Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y lavar el material de las paredes del cilindro, Dejar el cilindro y el contenido en reposo por $20 \text{ min} \pm 15\text{s}$. Comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador. Al finalizar los 20 min del periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 60. Probetas y materiales para el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 61. Mediante un embudo vierto la muestra de arena en las probetas hasta el límite que indica la probeta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 62. Las probetas con el defloculante



Fuente: Elaboración Propia

Figura 63. Agitando la probeta con el defloculante



Fuente: Elaboración Propia

Figura 64. Las 3 probetas después de la mezcla



Fuente: Elaboración Propia

Figura 65. Llenamos con agua las 3 probetas hasta el límite superior



Fuente: Elaboración Propia

Figura 66. Mezclando toda la muestra con agua y el defloculante



Fuente: Elaboración Propia

Figura 67. Introduciendo el pisón para compactar



Fuente: Elaboración Propia

Figura 68. Midiendo el nivel de arena



Fuente: Elaboración Propia

ResultadosDatos obtenidos en la práctica:

Tabla 11. Datos del ensayo de equivalente de arena.

ENSAYO	Lecturas		
	1	2	3
Ensayo n°			
Lectura nivel superior	10.5	10.3	9.8
Lectura nivel inferior	9.9	9.8	9.4
Número de ensayos realizados	3		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Utilizamos el promedio para realizar los cálculos:

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{\text{Lectura de nivel inferior}}{\text{Lectura de nivel superior}} * 100$$

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{9.9}{10.5} * 100$$

$$\text{Equivalente de la arena} = 94.29\%$$

Tabla 12. Resultados del Ensayo Equivalente de Arena.

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
% de Arena	94.29 %	95.15 %	95.92%
Promedio	95.12 %		

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.3. Ensayo de Peso Unitario de los Agregados

Objetivo

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido. Los volúmenes empleados son normalmente 0,1-0,5-1,00 pies³ (2,83-14,16-28,31 litros), según el tamaño de los áridos ensayados. Para medir el peso unitario con áridos sueltos se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno. Para medir el peso compactado se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 69. Materiales: molde de 3 L, varilla y la muestra de arena para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 70. Volumen suelto de arena



Fuente: Elaboración Propia

Figura 71. Volumen compactado de arena



Fuente: Elaboración Propia

Figura 72. Obtención del peso de la arena



Fuente: Elaboración Propia

Figura 73. Materiales: molde de 10 L, varilla y la muestra de grava para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 74. Volumen suelto de la grava



Fuente: Elaboración Propia

Figura 75. Volumen compactado de la grava



Fuente: Elaboración Propia

Figura 76. Enrasando con la varilla para la obtención del peso



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Tabla 13. Datos del ensayo de peso unitario de la arena.

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	Peso Muestra + Recipiente	gr.	7005	7180	7415
	Peso del Recipiente	gr.	2605	2605	2605
	Peso del Agregado Seco	gr.	4400	4575	4810
	Volumen Recipiente	cm ³	3000	3000	3000
Peso Unitario Compactado	Peso Muestra + Recipiente	gr.	7985	7830	8100
	Peso del Recipiente	gr.	2605	2605	2605
	Peso del Agregado Seco	gr.	5380	5225	5495
	Volumen Recipiente	cm ³	3000	3000	3000

Fuente: Elaboración propia

Proceso de cálculo de peso unitario

$$\text{Peso Unitario} = \frac{\text{peso del agregado seco}}{\text{volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso Unitario} = \frac{4400}{3000}$$

$$\text{Peso Unitario} = 1,467 \text{ gr/cm}^3$$

Para los demás ensayos se realizó los mismos procedimientos de cálculo.

Tabla 14. Resultados del ensayo de peso unitario de la arena.

Número de Ensayo	Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	gr/cm ³	1,467	1,525	1,603
Promedio Peso Unitario Suelto	gr/cm ³	1,532		
Peso Unitario Compactado	gr/cm ³	1,793	1,742	1,832
Promedio Peso Unitario Compactado	gr/cm ³	1,789		
Peso Unitario de la Arena	gr/cm ³	1,661		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Datos del peso unitario de la gravilla 3/8”.

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	Peso Muestra + Recipiente	gr.	19295	19275	19415
	Peso del Recipiente	gr.	5655	5655	5655
	Peso del Agregado Seco	gr.	13640	13620	13760
	Volumen Recipiente	cm ³	10000	10000	10000
Peso Unitario Compactado	Peso Muestra + Recipiente	gr.	20430	20460	20470
	Peso del Recipiente	gr.	5655	5655	5655
	Peso del Agregado Seco	gr.	14775	14805	14815
	Volumen Recipiente	cm ³	10000	10000	10000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultados del ensayo de la Gravilla 3/8”.

Número de Ensayo	Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	gr/cm ³	1,364	1,362	1,376
Promedio Peso Unitario Suelto	gr/cm ³	1,367		
Peso Unitario Compactado	gr/cm ³	1,478	1,481	1,482
Promedio Peso Unitario Compactado	gr/cm ³	1,480		
Peso Unitario de la Gravilla 3/8”	gr/cm ³	1,424		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Datos del peso unitario de la grava 3/4”.

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	Peso Muestra + Recipiente	gr.	19925	19880	19898
	Peso del Recipiente	gr.	5655	5655	5655
	Peso del Agregado Seco	gr.	14270	14225	14243
	Volumen Recipiente	cm ³	10000	10000	10000
Peso Unitario Compactado	Peso Muestra + Recipiente	gr.	21035	21050	20900
	Peso del Recipiente	gr.	5655	5655	5655
	Peso del Agregado Seco	gr.	15380	15395	15245
	Volumen Recipiente	cm ³	10000	10000	10000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultados del ensayo de la Grava 3/4”.

Número de Ensayo	Unidad	1	2	3
Peso Unitario Suelto	gr/cm ³	1,427	1,423	1,424
Promedio	gr/cm ³	1,425		
Peso Unitario Compactado	gr/cm ³	1,538	1,540	1,525
Promedio	gr/cm ³	1,534		
Peso Unitario de la Grava 3/4”	gr/cm ³	1,479		

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.4. Ensayo peso específico y absorción de agua del agregado fino

Objetivo

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso. El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente, este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 77. Muestra saturada y puesta en una bandeja grande



Fuente: Elaboración Propia

Figura 78. Secando la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 79. Introduciendo la muestra en el cono en 3 capas con 25 golpes y enrasando



Fuente: Elaboración Propia

Figura 80. Verificando que la muestra de arena este seca



Fuente: Elaboración Propia

Figura 81. Obteniendo el peso de la muestra, vaciando la muestra en el matraz y llenando de agua el matraz con la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 82. Agitando el matraz y vaciando en un plato toda la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 83. La muestra en el plato listo para meter al horno



Fuente: Elaboración Propia

Figura 84. Obtención del peso seco de la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Tabla 19. Datos del ensayo peso específico del agregado fino

Muestra N°	Peso Muestra "b" (gr)	Peso De matraz (gr)	Muestra + Matraz + Agua (gr)	Peso del agua Agregado al Matraz "w" (ml) ó (gr)	Peso muestra Secada "a" (gr)	Volumen del Matraz "v" (ml)
1	471,5	177,4	961,9	313,00	462,30	500,00
2	472	177,4	967,5	318,10	466,50	500,00
3	476,2	177,4	970,7	317,10	469,40	500,00

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = \frac{a}{v - w}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = \frac{462,30}{500 - 313,00}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = \mathbf{2,47 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = \frac{b}{v - w}$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = \frac{471,5}{500 - 313}$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = \mathbf{2,52 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{a}{((v - w) - (b - a))}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{462,30}{((500 - 313) - (471,5 - 462,30))}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \mathbf{2,60 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{b - a}{b} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{471,5 - 462,30}{471,5} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = \mathbf{1,95\%}$$

Para la muestra 2 y 3 se realiza el mismo procedimiento.

Tabla 20. Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino

Descripción	Arena Ensayo 1	Arena Ensayo 2	Arena Ensayo 3
Peso Específico del Agregado Seco	2,74 gr/cm ³	2,56 gr/cm ³	2,57 gr/cm ³
P. E. A. Saturado Sup. Seco	2,52 gr/cm ³	2,59 gr/cm ³	2,60 gr/cm ³
Peso Específico Aparente	2,60 gr/cm ³	2,64 gr/cm ³	2,67 gr/cm ³

% de Absorción	1,95 %	1,17 %	1,51 %
----------------	--------	--------	--------

Fuente: Elaboración propia

Se realizó tomar la media de los datos representativos 2,53 gr/cm³

3.4.1.5. Ensayo peso específico y absorción de agua en agregados gruesos

Objetivo

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/8" y para la grava 3/4". La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C. Después se lo sumerge en agua, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.). A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 85. Secando la muestra saturada



Fuente: Elaboración Propia

Figura 86. Introduciendo la muestra al canastillo para luego obtener el peso de la muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración Propia

Figura 87. Introduciendo el canastillo con la muestra en agua



Fuente: Elaboración Propia

Figura 88. Equilibrando la balanza con las pesas para obtener el peso sumergido



Fuente: Elaboración Propia

Figura 89. Vaciando la muestra saturada en una bandeja para luego meter al horno



Fuente: Elaboración Propia

Figura 90. Obtención del peso seco de la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Tabla 21. Datos del ensayo de peso específico de la grava 3/4”.

Muestra N°	Peso muestra Secada "a" (gr)	Peso muestra Saturada con Sup. Seca "b" (gr)	Peso muestra Saturada dentro Del agua "c" (gr)
1	4747,20	4795,90	2942,80
2	5002,00	5087,90	3106,80
3	4972,20	5045,30	3047,00

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Grava de 3/4

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \frac{a}{b - c}$$

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \frac{4747,20}{4795,90 - 2942,80}$$

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \mathbf{2,56 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de Superficie Seca} = \frac{b}{b - c}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de Superficie Seca} = \frac{4795,90}{4795,90 - 2942,80}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de Superficie Seca} = \mathbf{2,59 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{a}{a - c}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{4747,20}{4747,20 - 2942,80}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \mathbf{2,63 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{b - a}{a} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{4795,90 - 4747,20}{4747,20} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = \mathbf{1,03 \%}$$

Tabla 22. Resultados del ensayo de peso específico de la grava 3/4".

Muestra N°	Peso específico A granel (gr/cm3)	Peso específico Saturado con Sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico Aparente (gr/cm3)	% De absorción
1	2,56	2,59	2,63	1,03
2	2,52	2,57	2,64	1,72
3	2,49	2,52	2,58	1,47
Promedio	2,52	2,56	2,62	1,40

Fuente: Elaboración propia.

El mismo procedimiento de cálculo se realiza para la gravilla de 3/8:

Tabla 23. Datos del ensayo de peso específico de la gravilla 3/8".

Muestra N°	Peso muestra Secada "a" (gr)	Peso muestra Saturada con Sup. Seca "b" (gr)	Peso muestra Saturada dentro Del agua "c" (gr)
1	4866,90	5003,60	2993,80
2	4843,00	5003,90	2978,80
3	4867,50	5003,20	2990,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla 3/8".

Muestra N°	Peso específico A granel (gr/cm3)	Peso específico Saturado con Sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico Aparente (gr/cm3)	% De absorción
1	2,42	2,49	2,60	2,81
2	2,39	2,47	2,60	3,32
3	2,42	2,49	2,59	2,79
Promedio	2,41	2,48	2,60	2,97

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.6. Ensayo de Desgaste por medio de la Máquina de los Ángeles

Objetivo

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la sub-rasante.

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

El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles, ASTM C-131 ó AASHTO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión. Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 91. Tamizando la muestra por los tamices 3/4'', 1/2'' y 3/8''



Fuente: Elaboración Propia

Figura 92. Vaciando en una bandeja la muestra hasta obtener un peso retenido de 2500 gr



Fuente: Elaboración Propia

Figura 93. En una bandeja 2500 gr de peso retenido del tamiz 1/2'' y en la otra de 3/8''



Fuente: Elaboración Propia

Figura 94. Máquina de los ángeles donde introducimos las muestras de las 2 bandejas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 95. Una vez terminado las 500 revoluciones, hacemos girar la máquina para que salga la muestra desgastada



Fuente: Elaboración Propia

Figura 96. Muestra en la bandeja de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración Propia

Figura 97. Tamizando la muestra en el tamiz N°12



Fuente: Elaboración Propia

Figura 98. Lavando la muestra para luego meter al horno



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 25. Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4".

Pasado	Retenido	Cantidad tomada(gr)
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3806,9
Tipo de Gradación "B"		
Diferencia		1193,1
Número de ensayos realizados		1
Carga Abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm 500Revoluciones

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1193,1\text{gr}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \mathbf{23,86 \%}$$

Tabla 26. Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8”.

Pasado	Retenido	Cantidad tomada(gr)
3/8	1/4	2500
1/4	N°4	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3921
Tipo de Gradación “C”		
Diferencia		1079
Número de ensayos realizados		1
Carga Abrasiva		8 esferas a 32,5 Rpm 500Revoluciones

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1079\text{gr}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \mathbf{21.58 \%}$$

3.4.1.7. Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas

Objetivo

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Resultados

Tabla 27. Datos del ensayo partículas Laminares.

Material	Peso Total de la Muestra	Peso Retenido de Partículas Laminares
3/4"	1000 gr.	35,8 gr.
3/8"	1000 gr.	60,5 gr.

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

$$\% \text{ Total de Partículas Laminares} = \frac{\text{Peso Retenido Partículas Laminares}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Laminares} = \frac{35,8}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Laminares} = \mathbf{3,58 \%}$$

Tabla 28. Resultados del ensayo.

Material	% Total de Partículas Laminares
3/4"	3,58 %
3/8"	6,05 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Datos del ensayo Chatas Alargadas.

Material	Peso Total de la Muestra	Peso Retenido de Partículas Chatas Alargadas
3/4"	1000 gr.	43,8 gr.
3/8"	1000 gr.	20,7 gr.

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

$$\% \text{ T.d.P. Chatas y Alargadas} = \frac{\text{Peso Retenido Partículas Chatas y Alargadas}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = \frac{43,8}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = 4,38 \%$$

Tabla 30. Resultados del ensayo chatas y alargadas.

Material	% Total de Partículas Chatas Alargadas
3/4"	4,38 %
3/8"	2,07 %

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Ensayos de la Emulsión Asfáltica**3.4.2.1. Ensayo de Viscosidad Saybolt-Furol****Objetivo**

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 ml de líquido, a una temperatura determinada, se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro sino causara errores en ensayo debido a que la gasolina puede diluirse con el asfalto y modificara su propiedad.

Se coloca la muestra en el tubo dejándolo ahí un tiempo, la temperatura del baño se debe controlar que se mantenga constante. Se coloca el frasco calibrado de 60 ml cuidadosamente debajo del orificio del equipo de manera que este centrado con ello, se debe de tomar en cuenta que cuando fluya la muestra no deberá chocar con las paredes del frasco, el ensayo se empieza sacando violentamente el tapón del corcho del tubo, al mismo tiempo se deberá iniciar con el cronometraje hasta que fluya totalmente la muestra en el frasco de vidrio. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 99. Equipo de viscosidad



Fuente: Elaboración Propia

Figura 100. Controlando con el termómetro que la temperatura llegue a 50°C



Fuente: Elaboración Propia

Figura 101. Calentando 200 ml de emulsión a 50°C



Fuente: Elaboración Propia

Figura 102. Los corchos puestos en el tubo de viscosidad



Fuente: Elaboración Propia

Figura 103. Poniendo los 2 frascos receptor



Fuente: Elaboración Propia

Figura 104. La emulsión en el tubo de viscosidad



Fuente: Elaboración Propia

Figura 105. Se retiró el tapón de corcho y se controla el tiempo hasta que llegue a la marca de aforo



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 31. Datos del ensayo de viscosidad de la Emulsión Convencional

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Viscocity Saybolt a 50 °C	seg.	114	152
Número de ensayos realizados		2	

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados:

Resultado: **133 segundos**

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 32. Datos del ensayo de viscosidad de la Emulsión Súper-Estabilizada

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Viscosidad Saybolt a 50 °C	seg.	120	138
Número de ensayos realizados	2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados:

Resultado: **129 segundos**

3.4.2.2. Método de residuo por destilación

Objetivo

El procedimiento consiste en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta la temperatura máxima de 260 °C para separar de la emulsión en agua, disolventes y residuo asfáltico. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 106. Obtención del peso del destilador de aleación de aluminio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 107. Vaciando 200 gr de emulsión en el destilador de aleación de aluminio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 108. Armando el equipo para el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 109. Encendido del fuego en el destilador



Fuente: Elaboración Propia

Figura 110. Proceso de destilación



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Tabla 33. Resultados del ensayo de destilación de la Emulsión Asfáltica Convencional

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Residuo de destilación	%	68	66	69	67,5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34. Resultados del ensayo de destilación de la Emulsión Súper-Estabilizada

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Residuo de destilación	%	60	62	-	61

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2.3. Ensayo de Penetración

Objetivo

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Se coloca una muestra a calentar que se colocaran en un recipiente hasta que este fluido se lo coloca en 2 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en el baño María por una hora a de 25°C. Una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 111. Equipo de penetración



Fuente: Elaboración Propia

Figura 112. Muestras del residuo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 113. Baño de agua a 25 °C



Fuente: Elaboración Propia

Figura 114. Proceso de penetración



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Datos obtenidos del ensayo:

Tabla 35. Datos del ensayo de penetración del residuo de la Emulsión Asfáltica
Convencional

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25°C, 100g. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm.	97	140	135
	Lectura N°2	mm.	98	60	110
	Lectura N°3	mm.	100	130	130
PROMEDIO		mm.	98	110	125
Número de Ensayos		3			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: Realizando la media se tiene como valor de penetración de 111 mm a 25°C, 100gr. 5seg.

Datos obtenidos del ensayo:

Tabla 36. Datos del ensayo de penetración del residuo de la Emulsión Súper-
Estabilizada

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Penetración a 25°C, 100g. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm.	150	121
	Lectura N°2	mm.	134	127
	Lectura N°3	mm.	146	136
PROMEDIO		mm.	143	128
Número de Ensayos		2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: Realizando la media se tiene como valor de penetración de 136 mm a 25°C, 100gr. 5seg.

3.4.2.4. Ensayo Punto de inflamación

Objetivo

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

Llenar la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Procedimiento

Figura 115. Equipo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 116. Muestra del residuo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 117. Proceso de punto de inflamación



Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Datos obtenidos:

Tabla 37. Datos del ensayo de punto de inflamación del residuo de la Emulsión
Asfáltica Convencional

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	100	110
Número de ensayos realizados	2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultado: 105°C.

Datos obtenidos:

Tabla 38. Datos del ensayo de punto de inflamación del residuo de la Emulsión Súper-Estabilizada

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	105	100
Número de ensayos realizados	2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultado: 103°C.

3.4.3. Resultados de la caracterización de los materiales

En esta investigación los agregados que he utilizado para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas con adición de una Emulsión Súper-Estabilizada tienen las siguientes propiedades:

Tabla 39. Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos

Ensayo	Agregados	Resultados
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	23,86 %
	Gravilla 3/8"	21,58 %
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	2,52 gr/cm ³
	Gravilla 3/8"	2,41 gr/cm ³
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	2,53 gr/cm ³
Peso unitario	Grava 3/4"	1,479 gr/cm ³
	Gravilla 3/8"	1,424 gr/cm ³
	Arena	1,635 gr/cm ³
Equivalente de Arena		95,12 %

Porcentaje de agregados chatas ya alargadas	Grava 3/4"	4,38 %
	Gravilla 3/8"	2,07 %
Laminaridad	Grava 3/4"	3,58 %
	Gravilla 3/8"	5,84%

Fuente: Elaboración propia.

En la presente investigación manipule la emulsión convencional para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas cuyas propiedades son las siguientes:

Tabla 40. Resultados de los ensayos de caracterización de la emulsión convencional

Ensayo	Resultado
Residuo por destilación	67,5 %
Punto de Inflamación	105 °C
Penetración	111 mm
Viscosidad Saybolt-Furol	133 seg

Fuente: Elaboración propia.

En la presente investigación manipule la emulsión súper-estabilizada para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas cuyas propiedades son las siguientes:

Tabla 41. Resultados de los ensayos de caracterización de la emulsión súper-estabilizada

Ensayo	Resultado
Residuo por destilación	61 %
Punto de Inflamación	103 °C
Penetración	136 mm
Viscosidad Saybolt-Furol	129 seg

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Dosificación

3.5.1. Determinación de proporciones de agregados

Se requiere de ciertos requisitos en la gradación de los agregados, donde se realizó las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones, la banda granulométrica que se utilizó es la TM-25 que se detallan en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras, a partir de esas especificaciones se juega con los porcentajes de grava, gravilla y arena hasta entrar en medio de las curvas mínimas y máximas normadas, donde se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de agregado fino para la granulometría de la mezcla y el resultado fue el siguiente:

Tabla 42. Contenido de agregados en granulometría formada

Tamices	tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0,3	al 0,2	al 0,5	Peso Ret. 1
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	873,10	0,00	0,00	261,93	0,00	0,00	261,93
1/2"	12,5	2334,20	40,60	0,00	700,26	8,12	0,00	708,38
3/8"	9,50	1093,10	587,10	21,67	327,93	117,42	10,83	456,18
Nº4	4,75	693,10	3302,40	302,83	207,93	660,48	151,42	1019,83
Nº8	2,36	0,10	859,50	1176,33	0,03	171,9	588,17	760,10
Nº16	1,18	0,50	77,80	962,83	0,15	15,56	481,42	497,13
Nº30	0,60	0,30	5,60	669,17	0,09	1,12	334,58	335,79
Nº50	0,30	0,20	2,10	550,00	0,06	0,42	275,00	275,48
Nº100	0,15	0,70	3,90	393,17	0,21	0,78	196,58	197,57
Nº200	0,075	0,80	9,90	321,67	0,24	1,98	160,83	163,05
BASE	-	1,70	109,70	600,33	0,51	21,94	300,17	322,62
SUMA		4997,8	4998,6	4998,0	1499,34	999,72	2499	4998,1
PÉRDIDAS		2,2	1,4	2,0				

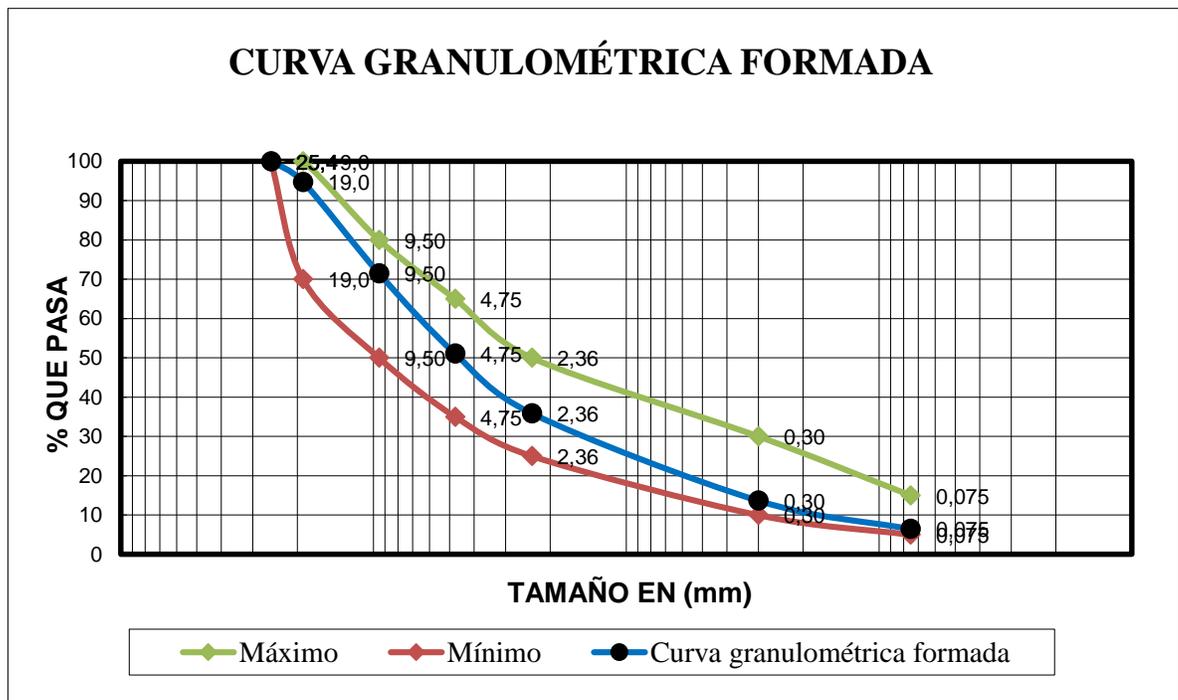
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Granulometría formada

Tamices	tamaño (mm)	TOTAL			% que pasa del total	BANDA TM-25	
		Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret		Especificaciones	
					Mínimo	Máximo	
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	261,93	261,93	5,24	94,76	70	100
1/2"	12,5	708,38	970,31	19,41	80,59	-	-
3/8"	9,50	456,18	1426,49	28,54	71,46	50	80
N°4	4,75	1019,83	2446,32	48,95	51,05	35	65
N°8	2,36	760,10	3206,42	64,15	35,85	25	50
N°16	1,18	497,13	3703,54	74,10	25,90	-	-
N°30	0,60	335,79	4039,34	80,82	19,18	-	-
N°50	0,30	275,48	4314,82	86,33	13,67	10	30
N°100	0,15	197,57	4512,39	90,28	9,72	-	-
N°200	0,075	163,05	4675,44	93,55	6,45	5	15
BASE	-	322,62	4998,06	100,00	0,00	-	-
		4998,06					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1. Curva de la granulometría formada



Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se observa en la tabla y el gráfico de la Granulometría formada de la combinación realizada, vemos que la combinación establecida de 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de agregado fino cumplen con las especificaciones del Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras, por lo que se da por aceptado los factores de combinación.

3.5.2. Determinación de proporción de emulsión

Ya establecida la combinación granulométrica de los agregados, se procedió a la determinación del contenido óptimo de emulsión, el valor fue adoptado del Manual Básico De Emulsiones Asfálticas. A continuación se muestra la determinación del contenido óptimo de emulsión para la mezcla asfáltica templada.

Figura 118. Contenido óptimo de Emulsión Asfáltica

6. Consumo teórico de materiais

A Tabela 28 apresenta o consumo teórico de materiais do serviço de tapa-buraco.

Tabela 28 – Consumo Teórico de Materiais

TIPO DE PMF	ABERTO	SEMI-DENSO	DENSO
TIPO DE REVESTIMENTO	BASE	ROLAMENTO	ROLAMENTO
Brita 2 (1"), (litros/m ³)	200	-	-
Brita 1 (3/4" ou 5/8"), (litros/m ³)	400	300	200
Pedrisco 3/8" ou 1/4", (litros/m ³)	400	600	400
Areia de Rio (litros/m ³)	-	100	-
Pó de Pedra (litros/m ³)	-	-	400
Emulsão RM-1C, (lt/m ²)	75	105	-
Emulsão RL-1C, (lt/m ²)	-	-	140

Fuente: Manual Básico De Emulsiones Asfálticas

Valor asumido de la tabla 105 Lt/m³

Se optó por realizar pruebas a briquetas que estén 10 Lt de emulsión por arriba del contenido óptimo y 10 Lt de emulsión por debajo, para conocer el comportamiento de

sus propiedades mecánicas, especialmente Peso Volumétrico, Estabilidad y Fluencia, haciendo variar 10 Lt de emulsión por cada grupo de briquetas y haciendo 6 briquetas por punto de emulsión. Los otros dos contenidos de emulsión serían de 95 Lt/m³ y 115 Lt/m³. Se prosiguió a los cálculos teóricos de conversión del valor asumido de 105 Lt/m³ adoptado del Manual Básico De Emulsiones Asfálticas para el peso de una briketa de 1200 gr, en la tabla siguiente se muestran los resultados.

Tabla 44. Resultados de contenidos de emulsión

			CANTIDAD DE EMULSIÓN EN LA MEZCLA		
Para 1 m ³	Vol.	Lt	95	105	115
Para 1 Briketa de 1200 gr	Vol.	ml	114	126	138
	Peso	gr	114	126	138

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Determinación de las cantidades de Agregados y de Emulsión

En la tabla siguiente se muestran los resultados que representan las respectivas cantidades de agregados y emulsión necesarias para realizar la producción de la mezcla asfáltica de cada uno de los contenidos de emulsión que contribuirán para la realización de la mezcla asfáltica templada. El peso de la muestra de emulsión y agregado utilizado para cada uno de los puntos en la mezcla asfáltica, fue calculado de acuerdo al porcentaje en masa de cada uno de estos componentes que se encuentra presente en cada una de las briquetas, teniendo como masa para cada briketa 1200 g.

Tabla de Resultados:

Tabla 45. Contenidos de Agregados y Emulsión Convencional

		CANTIDAD DE EMULSIÓN EN LA MEZCLA		
Para 1 m3	Lt	95	105	115
Para 1 Briqueta de 1200 gr	ml	114	126	138
Porcentaje de Emulsión (%)		9,5%	10,5%	11,5%
Porcentaje de Agregado (%)		90,5%	89,5%	88,5%
Peso de la Emulsión (gr)		114,00	126,00	138,00
Peso de Grava (gr)		325,80	322,20	318,60
Peso de Gravilla (gr)		217,20	214,80	212,40
Peso de Arena (gr)		543,00	537,00	531,00
Peso total de la briqueta (gr)		1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Contenidos de Agregados y Emulsión Súper-Estabilizada

		CANTIDAD DE EMULSIÓN EN LA MEZCLA		
Para 1 m3	Lt	95	105	115
Para 1 Briqueta de 1200 gr	ml	114	126	138
Porcentaje de Emulsión (%)		9,5%	10,5%	11,5%
Porcentaje de Agregado (%)		90,5%	89,5%	88,5%
Peso de la Emulsión (gr)		114,00	126,00	138,00
Peso de Grava (gr)		325,80	322,20	318,60
Peso de Gravilla (gr)		217,20	214,80	212,40
Peso de Arena (gr)		543,00	537,00	531,00
Peso total de la briqueta (gr)		1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Ya establecidas las proporciones de cada agregado y las diferentes dosificaciones de emulsión que se utilizarán en la mezcla asfáltica templada, se inicia el mezclado en laboratorio para la realización de las briquetas.

3.6. Preparación de las muestras de mezcla

Equipo y materiales utilizados:

- Balanza $A \pm 0.1$ gr.
- Cuchara para extraer los agregados
- Platos
- 2 Hornos
- Frascos
- Moldes para la preparación de probetas
- Papel filtro
- Brocha
- Bandeja metálica para la mezcla
- Cuchara para la mezcla
- Termómetro
- Espátula.
- Equipo de compactación.
- Martillo o pisón.
- Extractor de probetas.

Procedimiento

La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio de la planta de la pintada de la alcaldía municipal, en donde se realizarán tres puntos de contenidos de emulsión que variarán en un valor de 12 ml para cada punto, para ello se ha tomado de base el contenido óptimo de emulsión obtenido del Manual Básico De Emulsiones Asfálticas, los 12 ml equivale a los 10 Lt mencionados en la determinación de proporción de emulsión.

Primeramente se realizó el pesaje de las cantidades de grava de 3/4", gravilla de 3/8" y arena mediante una balanza como se muestra en la siguiente figura, los agregados estaban en plato para luego introducirlas al horno y ser calentadas a una temperatura de 120 °C.

Figura 119. Pesando la cantidad de agregados



Fuente: Elaboración propia

Luego se pesó la cantidad de emulsión en un frasco como se muestra en la siguiente figura, para después introducirla al horno y ser calentada a una temperatura de 60 °C.

Figura 120. Pesando la cantidad de emulsión



Fuente: Elaboración propia

Mientras van calentando los agregados y la emulsión, se empezó a preparar los moldes, poniendo la base en el equipo de compactación, luego el molde y el collarín, después

con una brocha se empezó a cubrir con aceite el papel filtro para luego ser introducido en el molde, cuando los agregados ya estén calentados a 120°C y la emulsión a 60°C , entonces se procedió a vaciar los agregados en una bandeja y después la emulsión para realizar la mezcla, una vez que la mezcla este homogénea se procedió a controlar la temperatura de la mezcla como se muestra en la siguiente figura.

Figura 121. Controlando la Temperatura de Mezclado



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se empezó a vaciar la mezcla dentro del molde en dos capas dando golpes a cada capa con una espátula para que la mezcla este bien distribuido, luego se procedió a controlar la temperatura para la compactación como se muestra en la siguiente figura.

Figura 122. Controlando la Temperatura de Compactación



Fuente: Elaboración propia

Luego de controlar la temperatura, se introdujo otro papel filtro cubierto con aceite al molde con la mezcla, luego se empezó a asegurar el molde con el equipo de compactación, se colocó el martillo al equipo de compactación, y se procedió al proceso de compactación de 75 golpes por cara, una vez terminado de compactar se retira el molde del equipo de compactación y se lo coloca en un extractor de probetas, para extraer la briqueta realizada como se muestra en la siguiente figura.

Figura 123. Extrayendo la briqueta



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente a la extracción de la briqueta se procede a numerarla con una tiza, el mismo procedimiento se realizó para todas las briquetas. Después que se elaboran las briquetas se procedió a la determinación de las propiedades mecánicas, especialmente peso volumétrico, estabilidad y fluencia, para realizar el análisis del comportamiento de la mezcla compactada.

Determinación del Peso Volumétrico

Primeramente se realizó el marcado de las briquetas en cuatro puntos, el marcado se hizo mediante una regla y una tiza, luego con un vernier se procedió a medir y registrar las cuatro alturas, al igual que se midió y se registró los dos diámetros en las dos direcciones, luego se determinó el peso de las briquetas a través de una balanza como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 124. Midiendo las alturas de las briquetas con un vernier



Fuente: Elaboración propia

Figura 125. Determinando el peso de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Determinación de Estabilidad y Fluencia

Primeramente se realizó la medición de las alturas en cuatro puntos de la briqueta con un vernier para determinar su altura media, luego se limpió las superficies interiores de las mordazas, posteriormente se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga hasta que se produce la rotura de la briqueta, se lee y anota las lecturas de estabilidad y fluencia.

Figura 126. Rotura de briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.7. Evaluación de las propiedades mecánicas

3.7.1. Evaluación del Peso Volumétrico

Se hizo tres grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo tres briquetas por punto de emulsión. Para la identificación de las briquetas de peso volumétrico se las enumero como: 1, 2, 3, para 114 ml; 4, 5, 6, para 126 ml y 7, 8, 9 para 138 ml. En este caso se tomara en cuenta la enumeración de las briquetas: 4, 5 y 6 para un contenido de 126 ml de Emulsión Convencional. Se desarrollara el cálculo paso a paso para un mejor entendimiento de la evaluación del peso volumétrico para un contenido de emulsión de 126 ml.

Altura de las briquetas

Se midieron las alturas de cada briqueta en cuatro puntos, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, para un contenido de 126 ml de Emulsión Convencional sus alturas correspondientes son las siguientes:

Tabla 47. Datos de alturas medidas de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Alturas (cm)
126 ml	4	6,20
		6,20
		6,20
		6,20
	5	6,15
		6,15
		6,10
		6,15
	6	6,20
		6,15
		6,10
		6,20

Fuente: Elaboración propia

Calculo

$$h_5 = \frac{6,15 + 6,15 + 6,10 + 6,15}{4}$$

$$h_5 = 6,14 \text{ cm}$$

Tabla 48. Resultados de alturas promedios de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Altura Promedio (cm)
126 ml	4	6,20
	5	6,14
	6	6,16

Fuente: Elaboración propia

Diámetro de las briquetas

Se midieron los diámetros de cada briqueta en dos direcciones, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, para un contenido de 126 ml de Emulsión Convencional sus diámetros correspondientes son las siguientes:

Tabla 49. Datos de diámetros medidos de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetros (cm)
126 ml	4	10,10
		10,15
	5	10,10
		10,10
	6	10,20
		10,15

Fuente: Elaboración propia

Calculo

$$D_5 = \frac{10,10 + 10,10}{2}$$

$$D_5 = 10,10 \text{ cm}$$

Tabla 50. Resultados de diámetros promedios de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetro Promedio (cm)
126 ml	4	10,13
	5	10,10
	6	10,18

Fuente: Elaboración propia

Volumen de las briquetas

Teniendo los resultados de los diámetros promedio y las alturas promedio, se utiliza la ecuación para determinar el volumen de la briqueta.

Tabla 51. Datos promedios de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)
126 ml	4	10,13	6,20
	5	10,10	6,14
	6	10,18	6,16

Fuente: Elaboración propia

Calculo

$$Volumen = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

$$Volumen_5 = \frac{\pi * D_5^2}{4} * h_5$$

$$Volumen_5 = \frac{\pi * 10,10^2}{4} * 6,14$$

$$Volumen_5 = 491,93 \text{ cm}^3$$

Tabla 52. Resultados de volúmenes de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Volumen (cm ³)
126 ml	4	499,69
	5	491,93
	6	501,38

Fuente: Elaboración propia

Peso de las briquetas

Una vez que se identificó o enumeró cada briqueta, se procedió a pesar cada una de ellas, en la tabla siguiente se muestran los datos de los pesos obtenidos de cada briqueta.

Tabla 53. Datos de pesos de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Peso (gr)
126 ml	4	1130,8
	5	1127,8
	6	1144,2

Fuente: Elaboración propia

Peso Volumétrico

Para la determinación de esta propiedad mecánica es necesario una ecuación, y se debe tener los resultados de pesos y volúmenes de cada briqueta, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 54. Datos de pesos y volúmenes de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Peso (gr)	Volumen (cm ³)
126 ml	4	1130,8	499,69
	5	1127,8	491,93
	6	1144,2	501,38

Fuente: Elaboración propia

Calculo

$$\text{Peso Volumétrico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Peso Volumétrico}_5 = \frac{\text{Peso}_5}{\text{Volumen}_5}$$

$$\text{Peso Volumétrico}_5 = \frac{1127,8}{491,93}$$

$$\text{Peso Volumétrico}_5 = 2,29 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 55. Resultados de Peso Volumétrico de cada briqueta

Contenido de emulsión	Identificación	Peso Volumétrico ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)
126 ml	4	2,26
	5	2,29
	6	2,28

Fuente: Elaboración propia

Una vez teniendo los resultados de pesos volumétricos de las tres briquetas para un contenido de emulsión de 126 ml, se procede a calcular el promedio de esos resultados.

Calculo

$$\text{Peso Volumétrico}_{126\text{ ml}} = \frac{PV_4 + PV_5 + PV_6}{3}$$

$$\text{Peso Volumétrico}_{126\text{ ml}} = \frac{2,26 + 2,29 + 2,28}{3}$$

$$\text{Peso Volumétrico}_{126\text{ ml}} = 2,28 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 56. Resultado de Peso Volumétrico para un contenido de 126 ml de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	Peso Volumétrico ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)
126 ml	2,28

Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se realiza para los otros dos contenidos de emulsión, cada grupo de briquetas enumeradas tiene su respectiva cantidad de emulsión, a continuación se muestran los resultados de peso volumétrico de los tres contenidos de emulsión.

Resultados de Peso Volumétrico

En la tabla siguiente se añadió el % Emulsión, que es el contenido de emulsión expresado en porcentaje, ya se hizo mención de esto en las tablas 39 y 40 de contenidos de Agregados y Emulsión.

Tabla 57. Resultados del Peso Volumétrico de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)
114 ml	9,5	2,27
126 ml	10,5	2,28
138 ml	11,5	2,23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Resultados del Peso Volumétrico de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)
114 ml	9,5	2,31
126 ml	10,5	2,28
138 ml	11,5	2,25

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Evaluación de la Estabilidad

Al igual que el peso volumétrico se hizo tres grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo tres briquetas por punto de emulsión, para la identificación de las briquetas de estabilidad se las enumero como: 10, 11, 12, para 114 ml; 13, 14, 15, para 126 ml y 16, 17, 18, para 138 ml. Se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas por punto de emulsión para tener el resultado de estabilidad de dicho punto de emulsión. En la tabla siguiente se muestran los resultados de estabilidad obtenidos mediante el equipo Marshall de cada contenido de emulsión.

Tabla 59. Resultados de Estabilidad de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Estabilidad (lb)
114 ml	9,5	1396,78
126 ml	10,5	1568,03
138 ml	11,5	1798,93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. Resultados de Estabilidad de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Estabilidad (lb)
114 ml	9,5	2057,63
126 ml	10,5	2159,38
138 ml	11,5	2256,99

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Evaluación de la Fluencia

Al igual que el peso volumétrico se hizo tres grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo tres briquetas por punto de emulsión, para la identificación de las briquetas de Fluencia se las enumero como: 10, 11, 12, para 114 ml; 13, 14, 15, para 126 ml y 16, 17, 18, para 138 ml. Se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas por punto de emulsión para tener el resultado de Fluencia de dicho punto de emulsión. En la tabla siguiente se muestran los resultados de Fluencia obtenidos mediante el equipo Marshall de cada contenido de emulsión.

Tabla 61. Resultados de Fluencia de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Fluencia (0,01 plg.)
114 ml	9,5	12,93
126 ml	10,5	13,98
138 ml	11,5	14,67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Resultados de Fluencia de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Fluencia (0,01 plg.)
114 ml	9,5	13,48
126 ml	10,5	14,04
138 ml	11,5	15,21

Fuente: Elaboración propia

3.8. Análisis de Resultados

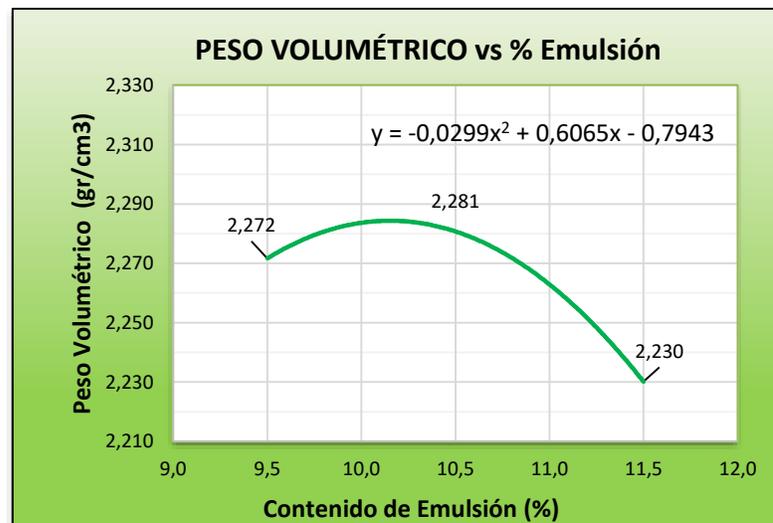
3.8.1 Análisis de resultados de las propiedades mecánicas

Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de Peso Volumétrico, Estabilidad y Fluencia correspondientes para cada contenido de emulsión, para posteriormente poder realizar un análisis de los resultados de la Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada y con Emulsión Convencional.

Análisis de resultados del Peso Volumétrico

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de Emulsión y los resultados de Pesos Volumétricos de cada contenido de emulsión.

Gráfico 2. Análisis Curva Peso Volumétrico vs. % Emulsión Convencional

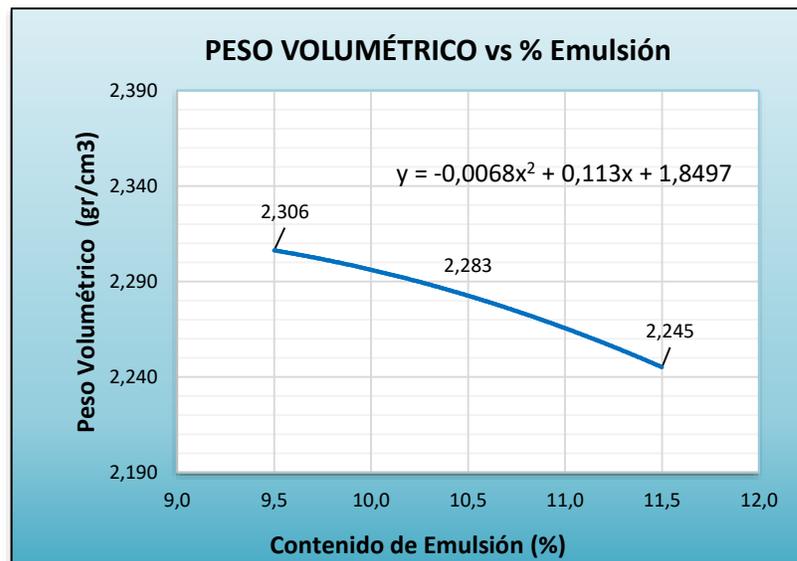


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Convencional expresado en porcentaje con el Peso Volumétrico expresado en gr/cm³, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa dos secciones donde el

Peso Volumétrico sube a medida que el % de emulsión aumenta hasta cierto punto, donde al aumentar el % de emulsión el Peso Volumétrico empieza a descender. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 donde tienen una variación del Peso Volumétrico de 2,27 a 2,23 gr/cm³, con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = -0,0299x^2 + 0,6065x - 0,7943$

Gráfico 3. Análisis Curva Peso Volumétrico vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



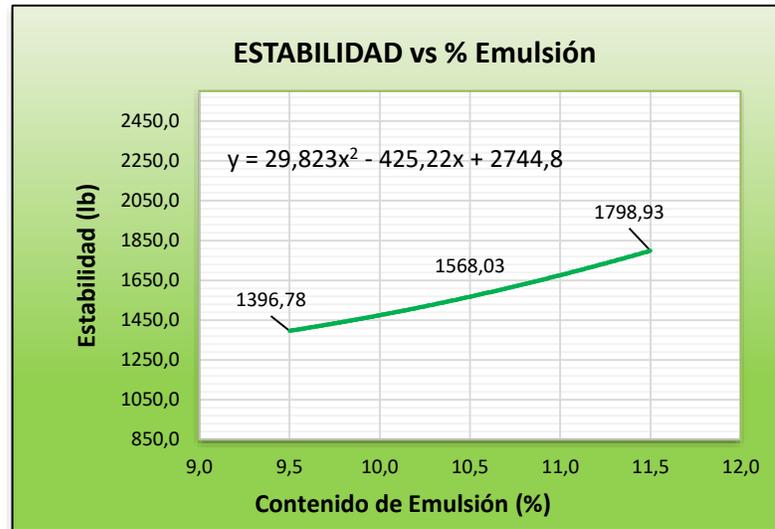
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Súper-Estabilizada expresado en porcentaje con el Peso Volumétrico expresado en gr/cm³, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que el Peso Volumétrico es inversamente proporcional al % de emulsión, entonces a mayor % de emulsión, menor Peso Volumétrico. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 donde tienen una variación del Peso Volumétrico de 2,31 a 2,25 gr/cm³, con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = -0,0068x^2 + 0,113x + 1,8497$

Análisis de resultados de la Estabilidad

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de Emulsión y los resultados de Estabilidad de cada contenido de emulsión.

Gráfico 4. Análisis Curva Estabilidad vs. % Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Convencional expresado en porcentaje con la Estabilidad expresado en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la Estabilidad baja a medida que el % de emulsión disminuye, entonces a mayor % de emulsión, mayor la Estabilidad. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 cuyas estabilidades nos marcan desde 1396,78 lb hasta 1798,93 lb, siendo el mayor valor de 1798,93 lb que se obtiene al contenido de emulsión de 11,5 con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = 29,823x^2 - 425,22x + 2744,8$

Gráfico 5. Análisis Curva Estabilidad vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración propia

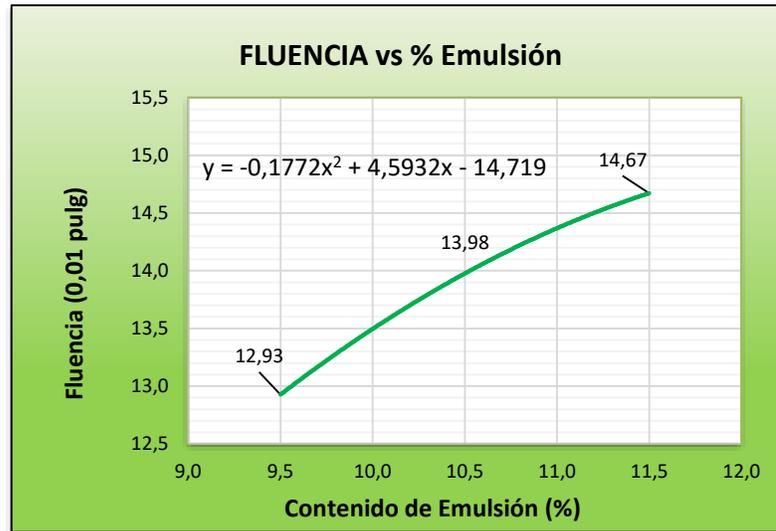
En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Súper-Estabilizada expresado en porcentaje con la Estabilidad expresado en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica la Estabilidad es proporcional al % de emulsión, entonces a mayor % de emulsión, mayor Estabilidad. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 cuyas estabilidades nos marcan desde 2057,63 lb hasta 2256,99 lb, siendo el mayor valor de 2256,99 lb que se obtiene al contenido de emulsión de 11,5 con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es:

$$y = -2,0704x^2 + 143,16x + 884,51$$

Análisis de resultados de la Fluencia

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de Emulsión y los resultados de Fluencia de cada contenido de emulsión.

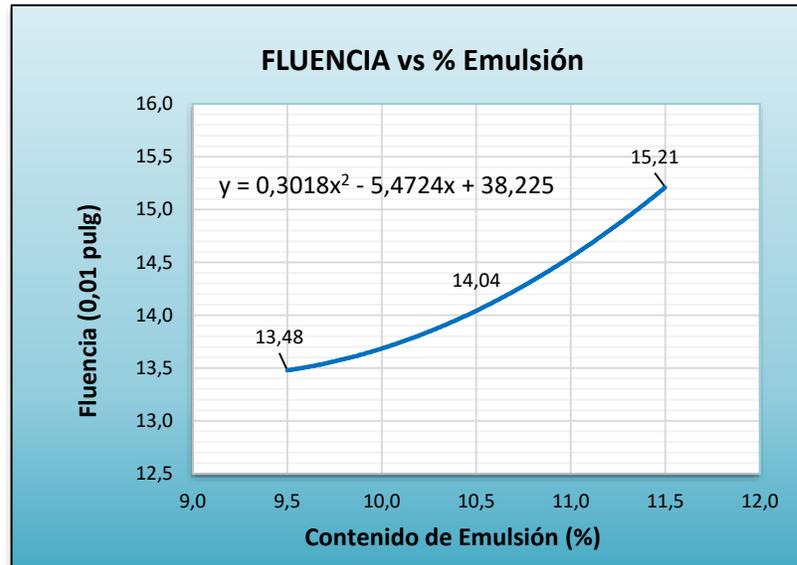
Gráfico 6. Análisis Curva Fluencia vs. % Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Convencional expresado en porcentaje con la Fluencia expresado en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 donde tienen una variación de la fluencia de 12,93 a 14,67 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor de 14,67 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de emulsión de 11,5 con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = -0,1772x^2 + 4,5932x - 14,719$

Gráfico 7. Análisis Curva Fluencia vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se muestra la relación del contenido de Emulsión Súper-Estabilizada expresado en porcentaje con la Fluencia expresado en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 9,5 y 11,5 donde tienen una variación de la fluencia de 13,48 a 15,21 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor de 15,21 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de emulsión de 11,5 con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = 0,3018x^2 - 5,4724x + 38,225$

3.8.2 Análisis de que ahorra en energía y costo en la producción respecto a mezclas convencionales

La energía necesaria para producir mezclas tibias es significativamente menor a la energía que se requiere para producir las mezclas asfálticas en caliente convencionales. Según estudios, la producción de mezcla asfáltica tibia requiere entre un 20 % a un 35 % menos combustible en comparación a la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 63. Producción de Mezcla Asfáltica en Caliente

Temperatura de mezclado (T°)	Cantidad de Mezcla (Tn/h)	Energía Combustible Diésel (Lt/h)	Costo del Diésel (Bs)
150	90	800	2976,0

Fuente: Planta de asfalto de la alcaldía municipal de Tarija

Tabla 64. Producción de Mezcla Asfáltica Templada

Temperatura de mezclado (T°)	Cantidad de Mezcla (Tn/h)	Energía Combustible Diésel (Lt/h)	Costo del Diésel (Bs)
120	90	640	2380,8

Fuente: Planta de asfalto de la alcaldía municipal de Tarija

$$\Delta \text{Energía} = \frac{800 - 640}{800} * 100$$

$$\Delta \text{Energía} = 20 \%$$

El ahorro de energía debido a las bajas temperaturas de producción de Mezclas Asfálticas Templadas respecto a Mezclas Asfálticas en Caliente es del 20 % por hora

$$\Delta \text{Costo} = \frac{2976 - 2380,8}{2976} * 100$$

$$\Delta \text{Costo} = 20 \%$$

La reducción en costo para la producción de Mezclas Asfálticas Templadas respecto a Mezclas Asfálticas en Caliente es del 20 % por hora

3.8.2 Análisis de justificar el tipo de tráfico y carretera para la aplicación de este tipo de mezcla

Las carreteras en nuestro país se clasifican de la siguiente manera, de acuerdo al tráfico:

Tabla 65. Clasificación técnica de carreteras

CATEGORIA	TPD (Tráfico promedio diario)
Autopista	> 10000
Autoruta	> 5000
Primario	1500-3000
Colector	> 500
Local	-
Desarrollo	-

Fuente: Manual del ABC

El estudio realizado corresponde a pavimentos de cualquier tipo de la categoría de carreteras de acuerdo a la norma, y en la clasificación no existe una correspondencia del tipo de tráfico de la carretera con un tipo de mezcla, sino esta es una decisión que dependerá del criterio del proyectista de cada tramo de la carretera a diseñar, que decidirá por construir por una Mezcla Asfáltica en Caliente, Mezcla Asfáltica Templada o Mezcla Asfáltica en Frio, y en nuestro caso el proyecto obedece solo al estudio de la Mezcla Asfáltica Templada.

La utilización de la Emulsión Súper-Estabilizada obedecía a encontrar la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas, como la estabilidad de la mezcla, para que sea más durable, cuya correspondencia aunque no esté especificada las carreteras que mayor estabilidad necesitan son las carreteras por las que más tráfico van circular, que en este caso serían las autopista, autoruta y primario.

Entonces ya a criterio de proyectista personal este tipo de mezcla podrá satisfacer a los que tienen mayor tráfico, que en este caso serían la autopista, autoruta y primario, es decir que debería ser para tráfico pesado, pero se puede hacer para cualquiera.

3.8.2 Análisis de definir ventajas y desventajas de la aplicación

VENTAJAS.-

- ✚ Reducción de la oxidación del asfalto en la etapa de mezclado, colocación y compactación incrementando la durabilidad del pavimento.
- ✚ Eliminación del envejecimiento prematuro del ligante asfáltico.
- ✚ Se puede lograr la reducción del consumo de energía mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto.
- ✚ Menores temperaturas de trabajo producen también un menor desgaste en las plantas asfálticas.
- ✚ Se disminuye emisiones de gases contaminantes en el proceso de mezclado.
- ✚ Mejora el manejo de la mezcla bituminosa y facilita/optimiza la compactación de la mezcla bituminosa.
- ✚ Permite reiniciar el tráfico sobre la mezcla bituminosa de manera más rápida.
- ✚ Reduce la exposición de los trabajadores a los humos y olores tanto en la planta como en la aplicación, generados en la colocación de las mezclas asfálticas en caliente, con los cuales los trabajadores aspiran menos cantidades de los mismos.
- ✚ Mejor ambiente de trabajo para los operarios en sitio.
- ✚ Mayor seguridad y comodidad para los trabajadores, que no tendrán que trabajar a tan altas temperaturas y que estarán en ambientes menos contaminados.
- ✚ Fácil adaptación de las plantas en caliente y de los equipos de compactación de las mezclas tradicionales, ocasionando pequeños sobrecostos iniciales que se verán compensados por los ahorros en otros ámbitos.
- ✚ No presentan dificultades para los trabajadores, que seguirán las pautas esenciales de las mezclas en caliente con sencillas variantes.
- ✚ Posibilidad de pavimentar en espesores gruesos y abrir al tráfico al poco tiempo, lo que las hace aptas para trabajos de reparación.

DESVENTAJAS.-

- ✚ No existe un procedimiento de diseño de mezclas templadas normalizadas en nuestro medio.
- ✚ Reciente utilización y por lo tanto baja producción investigativa y experiencia en obra de su utilización.
- ✚ Las Propiedades físicas y mecánicas de mezclas templadas son menores en comparación de las mezclas en caliente, por ello la recomendación de utilizar productos con mayor capacidad estabilizante.
- ✚ El resultado de estas mezclas depende del método de fabricación.
- ✚ El súper estabilizante genera mayores vacíos con aire por lo tanto mayor tiempo de rigidización.
- ✚ Las menores temperaturas de fabricación pueden generar que el secado del agregado pétreo no sea suficiente produciendo pérdida de adherencia en la mezcla.

3.8.2 Análisis comparativo de la mezcla asfáltica templada con emulsión convencional versus mezcla asfáltica templada con emulsión súper-estabilizada en costo

Tabla 66. Precios Unitarios de mezcla asfáltica templada con emulsión convencional

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
PROYECTO: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO (MAT-EC)						
ACTIVIDAD: COLOCADO DE CARPETA						
UNIDAD: M3						
CANTIDAD: 1,00						
TIPO DE CAMBIO Bs/\$us:						6,91
	A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
1	-	Diesel	lt	18,00	3,72	66,96
2	-	Arena clasificada	m3	0,41	145,00	59,45
3	-	Emulsión Convencional	lt	105,00	5,53	580,44
4	-	Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,15	152,00	22,80
5	-	Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,26	162,00	42,12
>	D	TOTAL MATERIALES			(A)	771,77
B MANO DE OBRA						
1	-	Obrero	Hr	0,07	13,18	0,92
2	-	Capataz	Hr	1,80	18,02	32,44
3	-	Chofer	Hr	0,00	16,44	0,00
4	-	Ayudante de maquinaria y equip	Hr	0,03	13,18	0,40
5	-	Operador de planta	Hr	0,09	24,85	2,24
6	-	Operador de equipo liviano	Hr	0,08	16,44	1,32
7	-	Operador	Hr	0,82	18,02	14,78
>	E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	52,08
	F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	37,07
	O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	13,32
>	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O)=	102,47
C EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS						
1	-	Terminadora de asfalto	Hr	0,08	350	28,00
2	-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0	420,7	0,00
3	-	Compactador rodillo liso y pata	Hr	0,04	304,66	12,19
4	-	Escoba mecanica autopropulsada	Hr	0,03	70,60	2,12
5	-	Planta calentamiento de asfalto	Hr	0,09	964,97	86,85
6	-	Rodillo neumatico TPS 10000	Hr	0,08	332,33	26,59
7	-	Volquete 12 m3 o 20 Tn	Hr	0,03	227,85	6,84
		Herramientas menores		5,00%	(G)	5,12
>	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	167,70
>	J	SUB TOTAL			(D+G+I)	1041,94
>	L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS			(J)	161,50
>	M	PARCIAL			(J+L)	1.203,44
>	N	UTILIDAD			(M)	120,34
>	Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(M+N)	1.323,79
>		PRECIO ADOPTADO				1.323,79

Son: Mil trescientos veintitres con 79/100 Bolivianos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 67. Precios Unitarios de mezcla asfáltica templada con emulsión súper-estabilizada

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
PROYECTO: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO (MAT-ESE)						
ACTIVIDAD: COLOCADO DE CARPETA						
UNIDAD: M3						
CANTIDAD: 1,00						
TIPO DE CAMBIO Bs/\$us:						6,91
	A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
1	-	Diesel	lt	18,00	3,72	66,96
2	-	Arena clasificada	m3	0,41	145,00	59,45
3	-	Emulsión Súper-Estabilizada	lt	105,00	7,19	754,57
4	-	Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,15	152,00	22,80
5	-	Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,26	162,00	42,12
>	D	TOTAL MATERIALES			(A)	945,90
	B	MANO DE OBRA				
1	-	Obrero	Hr	0,07	13,18	0,92
2	-	Capataz	Hr	1,80	18,02	32,44
3	-	Chofer	Hr	0,00	16,44	0,00
4	-	Ayudante de maquinaria y equip	Hr	0,03	13,18	0,40
5	-	Operador de planta	Hr	0,09	24,85	2,24
6	-	Operador de equipo liviano	Hr	0,08	16,44	1,32
7	-	Operador	Hr	0,82	18,02	14,78
>	E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	52,08
	F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	37,07
	O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	13,32
>	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O)=	102,47
	C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
1	-	Terminadora de asfalto	Hr	0,08	350	28,00
2	-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0	420,7	0,00
3	-	Compactador rodillo liso y pata	Hr	0,04	304,66	12,19
4	-	Escoba mecanica autopropulsada	Hr	0,03	70,60	2,12
5	-	Planta calentamiento de asfalto	Hr	0,09	964,97	86,85
6	-	Rodillo neumatico TPS 10000	Hr	0,08	332,33	26,59
7	-	Volquete 12 m3 o 20 Tn	Hr	0,03	227,85	6,84
		Herramientas menores		5,00%	(G)	5,12
>	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	167,70
>	J	SUB TOTAL			(D+G+I)	1216,07
>	L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15,50%	(J)	188,49
>	M	PARCIAL			(J+L)	1.404,56
>	N	UTILIDAD		10,00%	(M)	140,46
>	Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(M+N)	1.545,02
>		PRECIO ADOPTADO				1.545,02

Son: Mil quinientos cuarenta y cinco con 02/100 Bolivianos

Fuente: Elaboración propia

3.9. Validación de Resultados

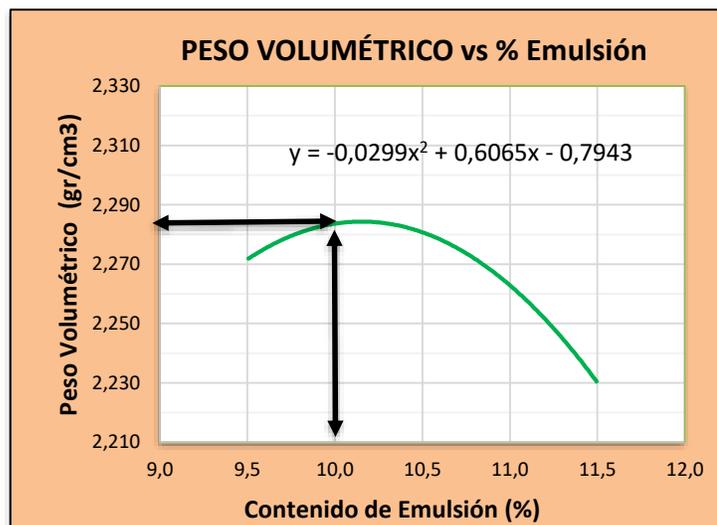
Para verificar que los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas mostrados anteriormente estén bien, se realizara la validez de los mismos a través de las ecuaciones de las curvas graficadas. En donde nos asumiremos un contenido de emulsión, en este caso se asumió el valor de 10 % de emulsión, que equivale a 120 ml de emulsión para una briqueta de 1200 gr, que a su vez también equivale a 100 Lt/m³ de emulsión.

Peso Volumétrico de la ecuación

Valor asumido:

10 % → 120 ml

Gráfico 8. Validación de Curva Peso Volumétrico vs. % Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración propia

Ecuación de Curva Peso Volumétrico vs. % Emulsión Convencional

$$y = -0,0299 * X^2 + 0,6065 * X - 0,7943$$

Calculo

$$X = 10 \%$$

Y=?

$$y = -0,0299 * X^2 + 0,6065 * X - 0,7943$$

$$y = -0,0299 * 10^2 + 0,6065 * 10 - 0,7943$$

$$y = 2,28 \frac{gr}{cm^3}$$

Peso Volumétrico de las Briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de peso volumétrico se las enumero como: 19, 20, 21, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de peso volumétrico, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 68. Resultado de Peso Volumétrico para un contenido de 120 ml de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)
120 ml	10	2,31

Fuente: Elaboración propia

Validación de Peso Volumétrico

Se puede observar que el resultado obtenido de $2,28 \frac{gr}{cm^3}$ de Peso Volumétrico de la ecuación con el resultado obtenido de $2,31 \frac{gr}{cm^3}$ de Peso Volumétrico de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,29 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

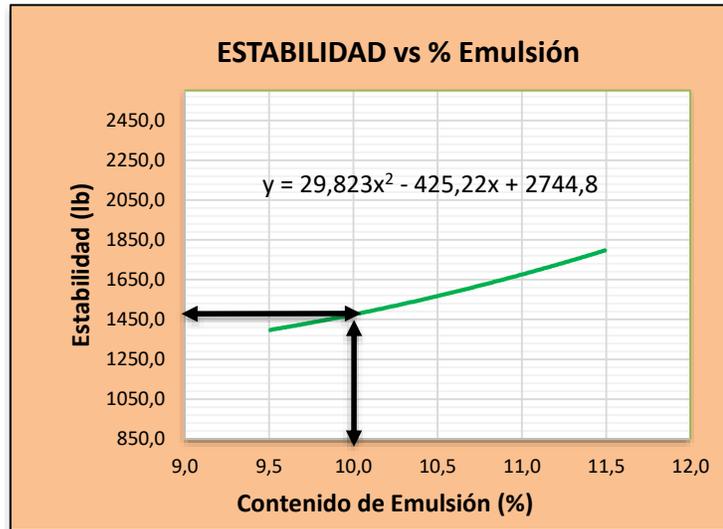
Tabla 69. Validación Peso Volumétrico de Emulsión Convencional

Forma	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)	Validación
Ecuación	2,28	Cumple
Briquetas	2,31	

Fuente: Elaboración propia

Nota: El mismo procedimiento de validez se hace para las siguientes graficas con X= 10 % y con sus respectivas ecuaciones de cada curva

Gráfico 9. Validación de Curva Estabilidad vs. % Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración propia

Estabilidad de la ecuación

$$X= 10 \%$$

$$y = 1474,9 \text{ lb}$$

Estabilidad de las briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de estabilidad se las enumero como: 22, 23, 24, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de estabilidad, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 70. Resultado de Estabilidad para un contenido de 120 ml de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Estabilidad (lb)
120 ml	10	1448,45

Fuente: Elaboración propia

Validación de Estabilidad

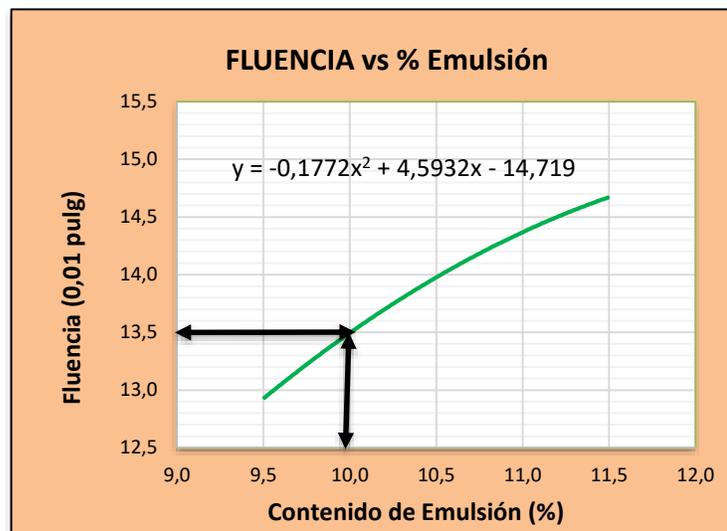
Se puede observar que el resultado obtenido de 1474,9 lb de Estabilidad de la ecuación con el resultado obtenido de 1448,45 lb de Estabilidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,79 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 71. Validación Estabilidad de Emulsión Convencional

Forma	Estabilidad (lb)	Validación
Ecuación	1474,9	Cumple
Briquetas	1448,45	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10. Validación de Curva Fluencia vs. % Emulsión Convencional



Fuente: Elaboración propia

Fluencia de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 13,49 \text{ (0,01 plg)}$$

Fluencia de las briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de fluencia se las

enumerado como: 22, 23, 24, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de fluencia, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 72. Resultados de Fluencia para un contenido de 120 ml de Emulsión Convencional

Contenido de emulsión	% Emulsión	Fluencia (0,01 plg.)
120 ml	10	13,66

Fuente: Elaboración propia

Validación de Fluencia

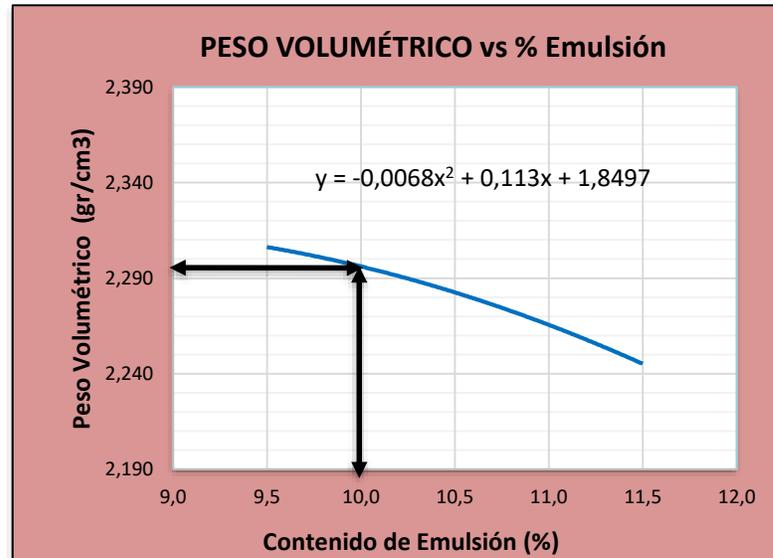
Se puede observar que el resultado obtenido de 13,49 (0,01plg) de Fluencia de la ecuación con el resultado obtenido de 13,66 (0,01plg) de Fluencia de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,25 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 73. Validación Fluencia de Emulsión Convencional

Forma	Fluencia (0,01 plg.)	Validación
Ecuación	13,49	Cumple
Briquetas	13,66	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11. Validación de Curva Peso Volumétrico vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración propia

Peso Volumétrico de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 2,29 \frac{gr}{cm^3}$$

Peso Volumétrico de la Briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de peso volumétrico se las enumeró como: 19, 20, 21, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de peso volumétrico, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 74. Resultado de Peso Volumétrico para un contenido de 120 ml de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)
120 ml	10	2,28

Fuente: Elaboración propia

Validación de Peso Volumétrico

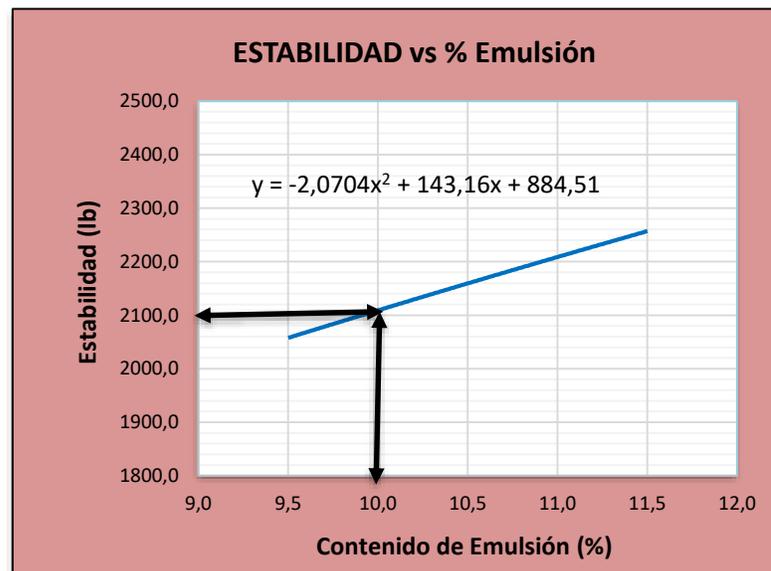
Se puede observar que el resultado obtenido de $2,29 \frac{gr}{cm^3}$ de Peso Volumétrico de la ecuación con el resultado obtenido de $2,28 \frac{gr}{cm^3}$ de Peso Volumétrico de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 0,43 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 75. Validación del Peso Volumétrico de Emulsión Súper-Estabilizada

Forma	Peso Volumétrico ($\frac{gr}{cm^3}$)	Validación
Ecuación	2,29	Cumple
Briquetas	2,28	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 12. Validación de Curva Estabilidad vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración propia

Estabilidad de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 2109,07 \text{ lb}$$

Estabilidad de las briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de estabilidad se las enumero como: 22, 23, 24, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de estabilidad, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 76. Resultado de Estabilidad para un contenido de 120 ml de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Estabilidad (lb)
120 ml	10	2071,39

Fuente: Elaboración propia

Validación de Estabilidad

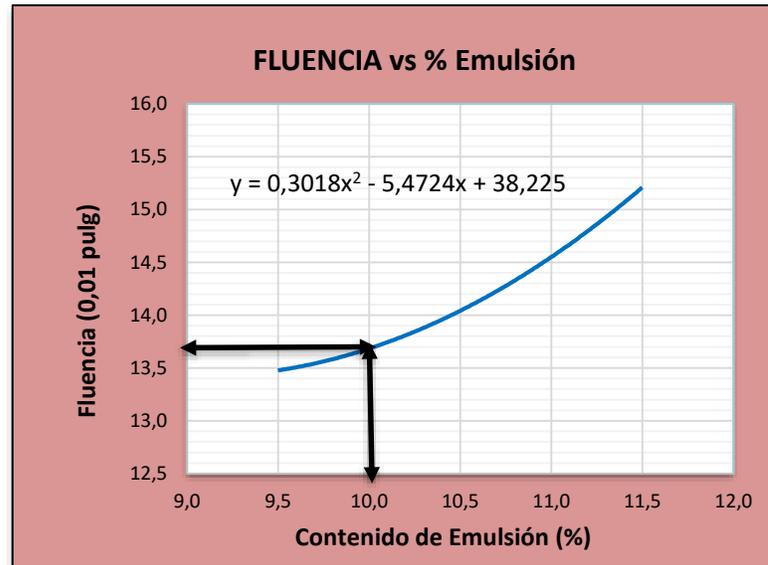
Se puede observar que el resultado obtenido de 2109,07 lb de Estabilidad de la ecuación con el resultado obtenido de 2071,39 lb de Estabilidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,82 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 77. Validación Estabilidad de Emulsión Súper-Estabilizada

Forma	Estabilidad (lb)	Validación
Ecuación	2109,07	Cumple
Briquetas	2071,39	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 13. Validación de Curva Fluencia vs. % Emulsión Súper-Estabilizada



Fuente: Elaboración propia

Fluencia de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 13,68 \text{ plg}$$

Fluencia de las briquetas

Se hizo tres briquetas con un contenido de 120 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de fluencia se las numero como: 22, 23, 24, para 120 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de fluencia, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 78. Resultados de Fluencia para un contenido de 120 ml de Emulsión Súper-Estabilizada

Contenido de emulsión	% Emulsión	Fluencia (0,01 plg.)
120 ml	10	13,83

Fuente: Elaboración propia

Validación de Fluencia

Se puede observar que el resultado obtenido de 13,68 (0,01plg) de Fluencia de la ecuación con el resultado obtenido de 13,83 (0,01plg) de Fluencia de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,08 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 79. Validación Fluencia de Emulsión Súper-Estabilizada

Forma	Fluencia (0,01 plg.)	Validación
Ecuación	13,68	Cumple
Briquetas	13,83	

Fuente: Elaboración propia

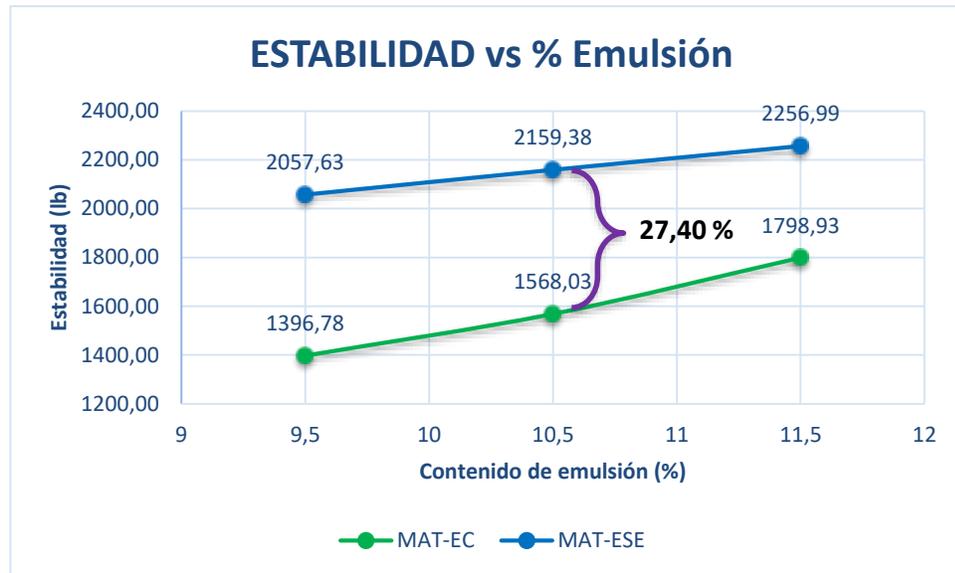
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- ❖ Se determinó la proporción de agregados pétreos mediante una combinación que pueda cumplir con las especificaciones de la banda granulométrica TM-25 que se detalla en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras, llegando a establecer que la combinación granulométrica de 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de arena, usada para realizar la mezcla presentó buenos resultados.
- ❖ Los resultados obtenidos de peso volumétrico del contenido óptimo de Emulsión Súper-Estabilizada, luego de ensayar cada una de las briquetas elaboradas y su posterior análisis, se obtienen valores ligeramente parecidos que los obtenidos con la Emulsión Convencional. Para la mezcla con Emulsión Súper-Estabilizada se obtuvieron valores de 2,34 gr/cm³, 2,24 gr/cm³ y 2,27 gr/cm³ que realizando el promedio se obtiene un valor de 2,28 gr/cm³, y los valores para la mezcla con Emulsión Convencional fueron de 2,27 gr/cm³, 2,29 gr/cm³ y 2,28 gr/cm³ que realizando el promedio se obtiene un valor de 2,28 gr/cm³.
- ❖ Con el contenido óptimo de Emulsión Súper-Estabilizada, se elaboraron y ensayaron 3 briquetas, y posterior a ello se evaluó la estabilidad de cada briqueta con lo que se obtuvo una estabilidad de 2159,38 lb superiores a la de la Emulsión Convencional de 1568,03 lb, demostrando con ello que la Mezcla Asfáltica Templada con la adición de Emulsión Súper-Estabilizada se obtienen mejores resultados.
- ❖ Con el contenido óptimo de Emulsión Súper-Estabilizada, se elaboraron y ensayaron 3 briquetas, y posterior a ello se evaluó la fluencia de cada briqueta con lo que se obtuvo un resultado de fluencia de 14,04 centésimas de pulgada,

superior a la de la Emulsión Convencional de 13,98 centésimas de pulgada, demostrando con ello que la Mezcla Asfáltica Templada con la adición de Emulsión Súper-Estabilizada se obtienen mayores resultados de fluencia.

- ❖ Se demuestra que las propiedades mecánicas evaluadas para una Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión Súper-Estabilizada y con Emulsión Convencional no son equivalentes especialmente en la estabilidad, debido a que existe diferencia entre ambas. Las mezclas con Emulsión Súper-Estabilizada son mayores en un 27,40 % de estabilidad respecto a una mezcla con Emulsión Convencional, a continuación se muestra un gráfico de esta diferencia.



4.2. Recomendaciones

- ❖ Se aconseja tener en cuenta la manipulación y almacenamiento de la emulsión ya que debido a eso se puede perder propiedades y porcentaje de agua debido a la evaporación de la misma.

- ❖ Hacer un buen uso del tiempo para la realización de la caracterización de los agregados y de la emulsión por la falta de equipos y materiales en los laboratorios.
- ❖ Se recomienda tener mucho cuidado al hacer los ensayos de la caracterización de la emulsión, especialmente al calentar la emulsión a altas temperaturas.
- ❖ Tener en cuenta los moldes y el martillo para la realización de las briquetas, por la falta de material en los laboratorios, porque son muestras que se necesitan para realizar el trabajo de investigación.
- ❖ Ha sido importante controlar la temperatura al momento de estar haciendo la Mezcla Asfáltica Templada con Emulsión.
- ❖ Se recomienda tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos para la obtención de buenos resultados.
- ❖ Dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación y sobre todo a la prensa debido a la calibración del anillo de carga Marshall, porque podría afectar a los resultados.