

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En el mundo la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales en templado. Para modificar dichas propiedades, la tendencia actual es adicionar a la emulsión o a la mezcla asfáltica aditivos poliméricos o productos de desechos en nuestro medio como ser los desechos de tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) con el fin de mitigar el impacto ambiental que estos producen en nuestro medio ambiente.

Se consideran el tipo de Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) que también pueden utilizarse de la misma forma que una Mezcla Asfáltica Caliente (MAC). Se decidió realizar mezclas asfálticas en templado debido a que las mezclas se adecuan perfectamente en nuestro departamento y también porque trae similares ventajas que una mezcla (MAC).

La preparación de las mezclas asfálticas en templado se lleva a cabo precalentando los áridos a una temperatura de 120°C, mientras la emulsión se mantiene a 60°C junto con el desecho de PVC y Poliestireno en una mezcla homogénea, luego se mezclarán los áridos y la emulsión junto a los polímeros añadidos obteniendo una temperatura de mezclado entre los 115°C a 120°C. el mismo procedimiento será realizado para la mezcla asfáltica convencional sin polímeros. 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, sino 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 (MAT) con emulsión y como mejoran

sus propiedades al adicionar desecho de PVC y Poliestireno. El estudio se centra en las propiedades mecánicas especialmente: Peso volumétrico, estabilidad y fluencia se busca probar en laboratorio que una mezcla asfáltica con emulsión y adición de polímeros tenga mejores propiedades mecánicas que una mezcla convencional en templado. Se considera que este tipo de mezclas (MAT) pueden utilizarse de la misma forma que una mezcla (MAC).

1.2 JUSTIFICACIÓN

El proyecto presenta una viabilidad debido a la conciencia ambiental que este residuo genera en la ciudad. La utilización del desecho de PVC Y PS es favorable para ser complementado en una mezcla asfáltica templada, conservando las propiedades mecánicas y reducir el impacto ambiental que este tipo de material genera.

Tomando en cuenta el crecimiento exponencial de la humanidad a lo largo de la historia, y sabiendo aún que para que la vida cotidiana pueda surgir en cualquier lugar del mundo, se deben buscar las mejores condiciones de infraestructura vial que se realizan constantemente en calzadas para el traslado de forma más rápida, más segura y más barata con los estándares de desarrollo sostenible y es por eso que se optó por la decisión de incluir nuevos materiales que puedan ser incluidos en un futuro en las mezclas asfálticas y que mejoren sus características mecánicas.

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.

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 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 Mezcla Asfáltica Templada con emulsión (MAT) 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 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.

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).

Esta investigación será una herramienta más para la realización de proyectos en un futuro el cual dará mejores resultados y soluciones en proyectos viales dando lugar al reciclaje de materiales y al cuidado del medio ambiente.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación problemática

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 la cual estaría muy bien adecuada a nuestro medio.

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 y utilizando desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos, porque al ser mezclado con la emulsión nos permitirán tener buenos resultados. Estas emulsiones asfálticas serán capaces de ser estables al transporte y al almacenamiento durante largos periodos de tiempo, por lo que resulta conveniente contar con emulsión modificada y aplicado a las condiciones de nuestro país.

La mezcla asfáltica a junto con la emulsión y utilizando desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos, nos permitirán mejorar varias condiciones que serán beneficiosas para la mezcla asfáltica.

En la ciudad de Tarija no se realiza un buen control y monitoreo de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas, siendo una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez ya emplazado y puesto al servicio del usuario.

Es posible que mediante un estudio de las propiedades mecánicas con emulsión y utilizando el desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos, 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

¿Cuál es el comportamiento de una Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) con emulsión asfáltica y utilizando desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos, en sus propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

- ✓ Estudiar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en templado utilizando emulsión asfáltica Betumix CMS-2H y utilizando el desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos, de tal manera que nos permita evaluar la incidencia de este tipo de materiales adicionantes en las propiedades de la mezcla asfáltica templada conformada con agregados de nuestra región.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Definir los aspectos que tienen que ver con las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT), además de la utilización y adición del PVC y PS.
- ✓ Realizar la caracterización de los agregados que se utilizaran en la elaboración de Mezcla Asfáltica Templada (MAT), mediante los ensayos correspondientes.
- ✓ Diseñar la Mezcla Asfáltica Templada (MAT) con emulsión y también con adición del Policloruro de Vinilo (PVC) y el Poliestireno (PS) mediante método Marshall.
- ✓ Determinar los valores de las propiedades mecánicas de la Mezcla Asfáltica Templada (MAT) utilizando el desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos.
- ✓ Comparar las propiedades de estabilidad, fluencia y peso volumétrico entre una mezcla asfáltica convencional y mezclas modificadas con los materiales adicionantes.
- ✓ Establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio de Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) con emulsión y la adición del PVC y PS.

1.5 HIPÓTESIS

Si se realiza una mezcla asfáltica con emulsión en templado y adicionando el triturado del Policloruro de Vinilo (PVC) y el Poliestireno (PS), entonces se mejorarán las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) en comparación de las mezclas asfálticas convencionales, además los resultados nos permitirán tomar mejores decisiones técnicas.

1.6 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1 Identificación de variables

Variable Independiente: Mezcla Asfáltica Templada (MAT) con emulsión y adición del Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS).

Variables Dependientes: Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas especialmente:

- ✓ Estabilidad
- ✓ Fluencia
- ✓ Peso volumétrico

1.6.2 Conceptualización y operacionalización de las variables

❖ VARIABLES INDEPENDIENTES:

Tabla 1. Variable independiente.

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Mezcla asfáltica templada con emulsión y adición de desecho PVC y PS.	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 realizan 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: 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 y que mejoraran sus propiedades mecánicas con la adición de polímeros.

1.7.1.3 Muestra

El comportamiento de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) con emulsión y la adición del PVC y PS comparándola con una mezcla

convencional, que será determinado mediante los ensayos de laboratorio correspondientes.

Para la obtención de la emulsión, se tomará una muestra de un turril 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 (MAT) con emulsión y la adición de los desechos de polímero. Los agregados que se utilizarán para el estudio serán de la región, provenientes de la chancadora Garzón, en cantidades lo suficientemente necesario para su caracterización y el estudio de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas Templadas (MAT) con emulsión y adición de PVC y PS que serán obtenidos de desechos de tuberías y plastaform.

1.7.1.4 Muestreo

Los materiales utilizados del banco de extracción serán muestreados y también la Emulsión asfáltica, el muestro se realizara con la caracterización de los agregados y la Emulsión que son ensayos de laboratorio para determinar o identificar aquellas características que son propios de los materiales a utilizar en la mezcla asfáltica, la muestra de emulsión convencional estarán en un recipiente en este caso en una botella, el Policloruro de Vinilo (PVC) será cortado de los desechos de tuberías en pequeños tamaños junto al Poliestireno (PS), la muestra de los agregados que se utilizaran para la Mezcla Asfáltica Templada (MAT) será de un solo tipo de banco que estarán en bolsas en 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

La inducción es un razonamiento que analiza una porción de un todo sin duda, además 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 y de la emulsión asfáltica como también del Policloruro de Vinilo (PVC) y el Poliestireno (PS), 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 (MAT) con adición de una emulsión y del PVC, PS como aditivos, que serán mezclados con los agregados, los métodos y las fórmulas para determinar los aspectos recién mencionados tiene que ver con parámetros y metodologías ya establecidas, elaboradas y realizadas en otros tipos de mezclas asfálticas, donde los resultados nos ayudaran a saber si las propiedades mecánicas especialmente peso volumétrico estabilidad y la fluencia mejoraron al utilizar diferentes materiales pero con métodos ya conocidos, de esta forma se llegara a la obtención de las conclusiones del trabajo de investigación.

Técnica experimental

Se empleará la técnica experimental, debido a que reúne los medios necesarios de instrumentación y mecanismos adecuados para desarrollar la investigación y obtener los resultados necesarios donde se 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.

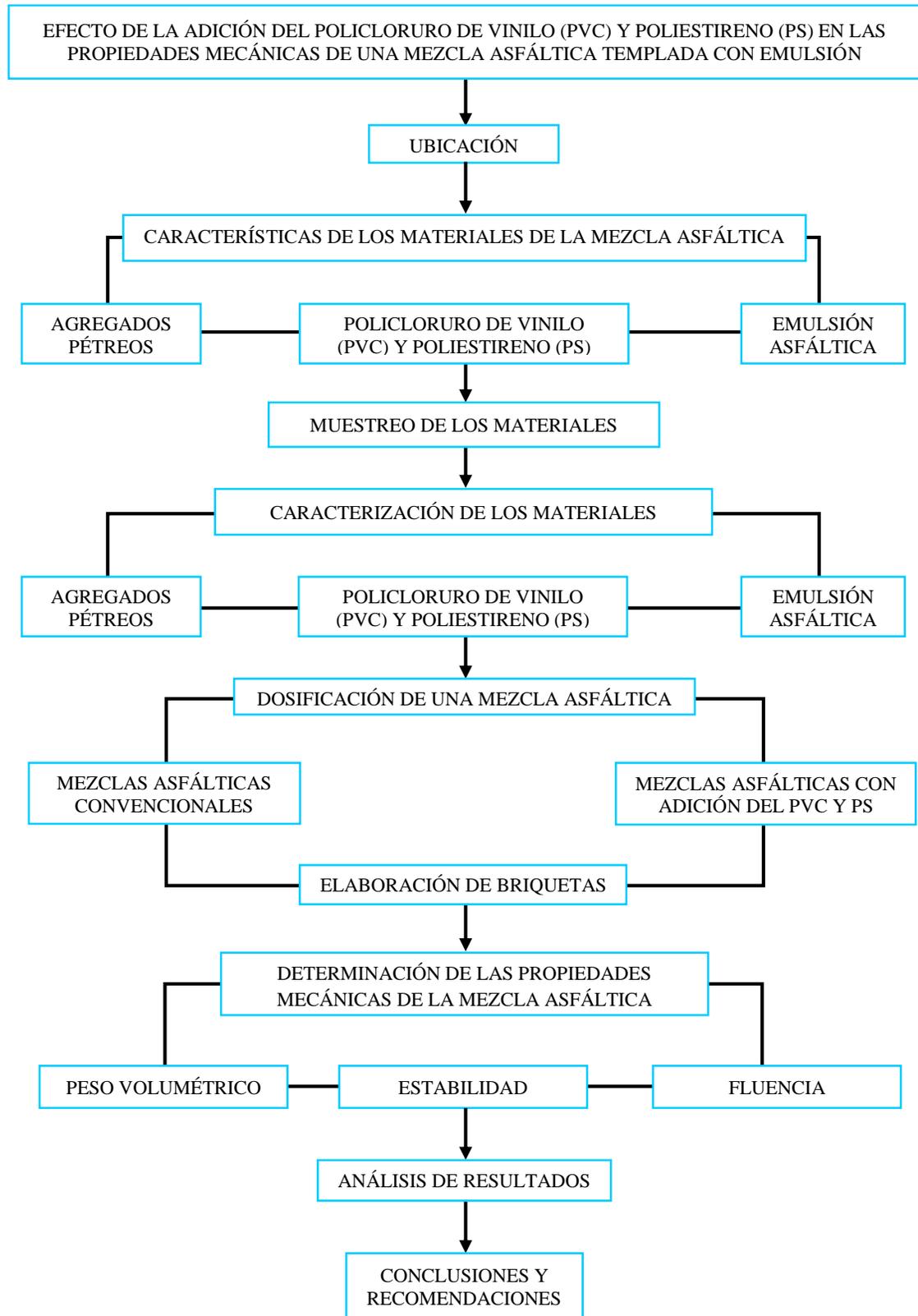
Para la realización de mi trabajo de investigación realizare en el laboratorio los ensayos de granulometría, equivalente de arena, peso unitario del agregado grueso y fino, desgaste por medio de la máquina de los ángeles, peso específico y absorción del agregado grueso y del agregado fino, determinación 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 densidad o peso específico equipo y materiales para el residuo por destilación y equipo de ductilidad.

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 Procedimiento de aplicación



A continuación, se describirá el procedimiento del flujograma del estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas templadas con adición de desecho de tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS).

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 también describiré el tipo de emulsión que utilizare, 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.

También voy a caracterizar los materiales, esa caracterización se desarrollará para los agregados con los ensayos de granulometría, equivalente de 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.

Luego se caracterizará la emulsión asfáltica y para ello voy a realizar los ensayos de viscosidad saybolt-furol, ensayo de penetración, ductilidad, densidad o peso específico y ensayo de residuo por destilación.

Posteriormente voy a realizar los cálculos para la dosificación de la mezcla asfáltica templada convencional para posteriormente hallar el contenido óptimo de emulsión y luego hare la dosificación de una mezcla con la adición de los desechos de PVC y PS en función del porcentaje óptimo encontrado, donde determinare las proporciones de agregados para que cumplan con las especificaciones de la banda del Instituto del Asfalto. Después determinare las proporciones de emulsión mediante el manual básico de emulsiones asfálticas, donde empezare a hallar el contenido óptimo de emulsión asfáltica en función de la estabilidad, densidad, y vacíos de la mezcla donde estos tres parámetros me servirán para hallar el contenido óptimo de una mezcla convencional donde posteriormente se conocerá 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 convencional y con emulsión y adición de los desechos de PVC y PS, para una briqueta de 1200 gramos se formarán, seis grupos de briquetas para hallar el contenido óptimo de emulsión haciendo 3 briquetas por punto de emulsión, y luego realizare diez grupos de briquetas con el valor de contenido óptimo de emulsión y donde se le adicionara el triturado de PVC y PS a la emulsión, convirtiendo a la emulsión en una emulsión polimérica.

Ubicar los materiales con los que voy a trabajar, y realizar los criterios de la selección del banco de materiales y de la emulsión con adición del PVC y el PS, luego voy a caracterizar los materiales, esa caracterización implica que para agregados voy a hacer los ensayos de la granulometría, porcentaje de caras fracturadas en los agregados, equivalente de la arena y agregados finos, desgaste por medio de la máquina de los ángeles, peso específico del agregado fino, peso específico y absorción del agregado grueso, para la emulsión voy hacer los ensayos de viscosidad saybolt-furol, penetración, ductilidad y peso específico, posteriormente voy a realizar la dosificación de la mezcla para elaborar las briquetas, luego utilizare el método Marshall para obtener los resultados de estabilidad y fluencia de la mezcla con emulsión asfáltica.

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:

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

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

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 asfáltica utilizando desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos.

El estudio se centra en determinar las propiedades mecánicas especialmente: Estabilidad y fluencia y peso volumétrico.

En el estudio se hará una introducción del trabajo de investigación y se detallara las justificaciones y luego la situación problemática que se hará en base al desempeño de la investigación puesto que ello se plasmara el estudio de mi proyecto de investigación donde en lo posterior se procederá a realizar los aspectos generales de las mezclas asfálticas así que en la primera instancia se realizara los generalidades del capítulo, luego la definición

de mezcla asfáltica, luego se mencionara los componentes de la mezcla asfáltica, seguido se realizara los conceptos de asfalto y agregados, se establecerán los tipos de asfalto donde se menciona a la emulsión como su comportamiento del mismo.

Posteriormente se realizara loa ensayos en laboratorio donde se utilizara la mezcla asfáltica en con emulsión en templado adicionando el PVC y el PS como materiales adicionantes para que puedan mejorar las características mecánicas y encontrar el porcentaje óptimo de polímero donde se podrá ver un aumento en la mejora de las características mecánicas de la mezcla asfáltica y una vez encontrado el porcentaje óptimo de polímero se procederá a realizar los cálculos de la etapa del proyecto los cuales serán plasmados en la tesis que nos demostrara que los materiales tanto el PVC Y el PS podrán mejorar algunas de las características de los materiales estos materiales adicionantes serán adicionados al mismo tiempo para luego ser mezclados con la emulsión asfáltica por vía húmeda.

Luego 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.

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 problémica 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 la definición se mencionaran los componentes y características del pavimento flexible, luego se hará una definición, clasificación, componentes, características y propiedades de las mezclas asfáltica, seguido se presenta la mezcla asfáltica templada y los materiales adicionantes que son el desecho de PVC y PS, 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 adicionadas con desecho de PVC y PS, posteriormente el diseño de la mezcla con emulsión, donde se mencionara los agregados, el agua, el emulsificante y los materiales adicionantes como los desechos que son materiales poliméricos y por último el método Marshall.

Se establece las mezcla asfáltica con emulsión asfáltica, por lo que en primera instancia se hará la ubicación del proyecto de investigación, el porqué de los materiales se detallará en el siguiente punto a través de los criterios a utilizarse, donde se presenta el criterio de selección de banco de materiales y el criterio de emulsión, luego se hará la muestra, después se realizara el muestreo seguido de las técnicas de muestreo, 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 asfálticas junto a la adición del desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS) como aditivos por vía húmeda, luego se procederá a la dosificación de la mezcla en donde se presentan la metodología, procedimiento y resultados, posteriormente se hará la elaboración de probetas con el método de diseño Marshall y finalmente se presentaran los resultados de la mezcla.

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

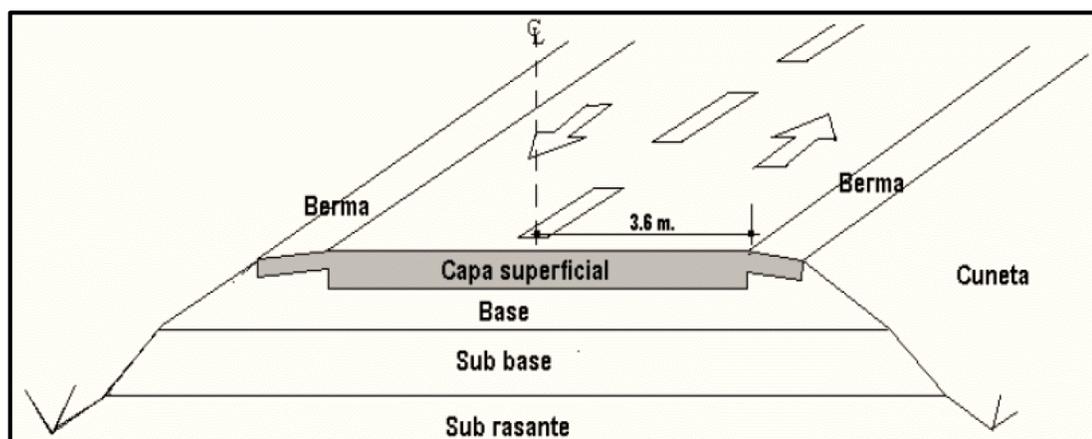
2.1 PAVIMENTO FLEXIBLE

2.1.1 Definición

Se denomina pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre el pavimento. El uso de pavimentos se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras o parkings. Los pavimentos asfálticos o flexibles son aquellos construidos 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 o asfáltico está formado por varias capas, como se observará 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 de tránsito a la sub-rasante.

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



Fuente: (Rafael, 2007).

Dentro de las propiedades 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 estas 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 deben 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 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, este debe ser friccionante y provisto de vacíos, para poder garantizar la resistencia correcta y permanencia de esta en el tiempo, bajo las 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 15cm, es el espesor mínimo para poder construir. Por ende, de forma global en todo proyecto la base en la capa encargada de proporcionar una superficie de rodadura adecuada, con textura y color conveniente, además de resistir los efectos abrasivos del tránsito.

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 de 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 del pavimento. La sub-base también aporta sirviendo de transición

entre la sub-base y la sub-rasante; siendo ocupada como un tipo de filtro para evitar que el material de la base y la sub-rasante, siendo ocupada como un tipo de filtro para evitar que el material 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 la 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 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, este debe ser friccionante 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 de 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.

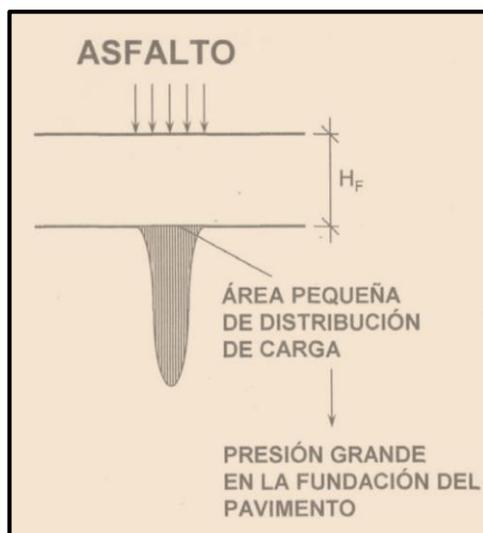
Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto, la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material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

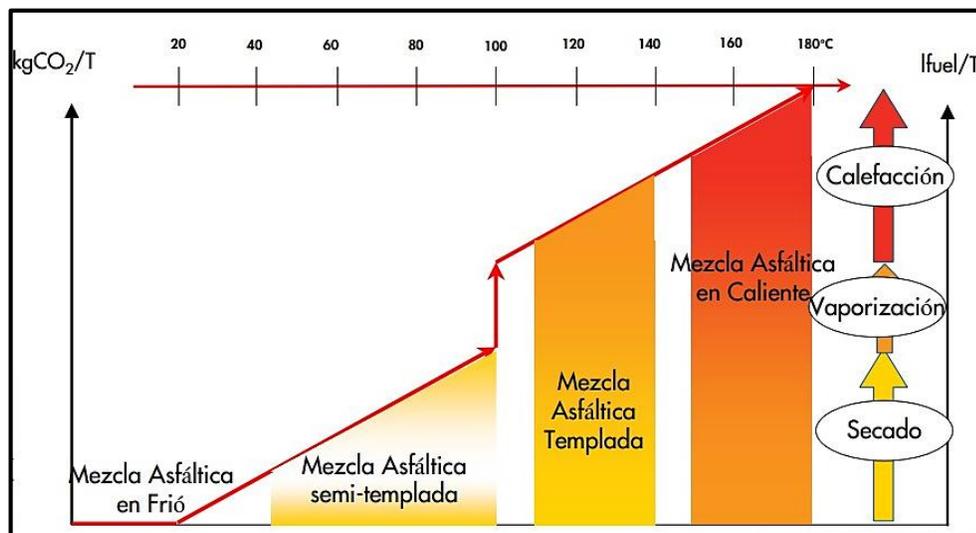
Mezclas asfálticas en caliente (hot mix asphalt): Las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 140°C. Como se ha comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como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

Mezclas asfálticas en caliente (hot mix asphalt): Las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 140°C. Como se comentó

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 grueso más mortero.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

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 está entre 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 razonamiento 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) 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 (MAT), (Federal Highway Administration, 2008)

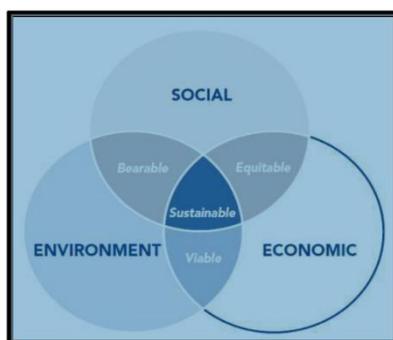
Las Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) son mezclas asfálticas que a través de aditivos o modificaciones en el proceso de mezclado permiten reducir la temperatura de mezclado entre 10°C a 75°C respecto a las temperaturas empleadas en Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) dependiendo de la tecnología que se 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.

2.3.2 Propiedades mecánicas de los polímeros

Resistencia

Cuando se habla de resistencia en polímeros, este tiene varios tipos:

- ✓ Resistencia a la tracción: La resistencia a la tracción o tenacidad es el máximo esfuerzo que un material puede resistir antes de su rotura por estiramiento desde ambos extremos con temperatura, humedad y velocidad especificadas. El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

- ✓ Resistencia a la compresión: La resistencia a la compresión es el máximo esfuerzo que un material rígido puede resistir bajo compresión longitudinal. No es necesario el esfuerzo en el punto de rotura, pero es de significación en materiales que quebrantan bajo una cierta carga. La unidad es fuerza por unidad de área de sección transversal inicial, expresada como Pa. El ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y metales (sobre todo aceros), aunque puede realizarse sobre cualquier material. Se suele usar en materiales frágiles. La resistencia a compresión de todos los materiales siempre es mayor que a tracción. Se realiza preparando probetas

normalizadas que se someten a compresión en un dispositivo para ensayo de compresión o una máquina universal de ensayos. (Brindis, 2002).

- ✓ Resistencia a la flexión: La resistencia a la flexión estática, también conocida como módulo de rotura, representa el máximo esfuerzo desarrollado en la superficie de la probeta en forma de barra, soportada cerca del extremo y cargada en el centro hasta que ocurra la falla. La unidad es fuerza por unidad de área, en Pa. El ensayo es aplicable solamente a materiales rígidos.

- ✓ Resistencia al impacto (Tenacidad): La resistencia al impacto representa la resistencia o tenacidad de un material rígido a la repentina aplicación de una carga mecánica. Es convencionalmente determinado por medición de la energía requerida para fracturar una probeta bajo condiciones normalizadas. La energía absorbida en la fractura de la probeta estándar se expresa en Joule/m. El impacto es convenientemente obtenido por la caída de un péndulo. (Brindis, 2002).

Elongación

La resistencia indica cuánta tensión se necesita para romper algo, sin embargo, ahí es donde corresponde estudiar el comportamiento de elongación de la muestra polimérica. La elongación es un tipo de deformación, que simplemente expresa el cambio en la forma que experimenta cualquier material bajo tensión. Cuando se habla de tensión, la muestra se deforma por alargamiento. Esto precisamente es la elongación.

Por lo general, se habla de porcentaje de elongación, que es el largo de la muestra después del alargamiento (L), dividido por el largo original (L_0), y multiplicado por 100. (Brindis, 2002).

Módulo

Si se quiere conocer cuánto un material resiste la deformación, se mide algo llamado módulo. Para medir el módulo de tracción, se hace lo mismo que para medir la resistencia y la elongación; esta vez se mide la resistencia ejercida sobre el material, tal como se procede con la resistencia a la tracción, incrementándose lentamente la tensión y midiendo

la elongación que experimenta la muestra en cada nivel de tensión, hasta que finalmente se rompe. Luego, se grafica la tensión versus elongación, de este modo:

Usos y aplicaciones

Las aplicaciones del poliestireno son principalmente las relacionadas con el aislamiento térmico y la resistencia mecánica.

Sus usos se manejan principalmente en la industria de la construcción, el empaque de alimentos y el embalaje. Debido a sus características higiénicas e inertes es de gran utilidad en el empaque de alimentos ya que no genera un medio propicio para la formación de bacterias. (Brindis, 2002).

Gracias a sus características mecánicas (gran resistencia) y su bajo peso, se convierte en un elemento de gran utilidad en la industria de los embalajes, ya que por su bajo peso reduce los costos de envío y su capacidad de absorber la energía producida por golpes y vibraciones ayuda a la protección del objeto a enviar. También sus propiedades de aislamiento térmico y acústico le permiten ser un elemento de gran utilidad en la construcción, ya que puede generar ahorro energético a la hora de construir en países de clima templado o tropical. Además, su bajo peso también resulta tentativo en la construcción para su utilización como aligerante de losas de edificios y aligerante para concretos. (Brindis, 2002).

2.3.2.1 Beneficios de la mezcla tibia

Consumo de energía.

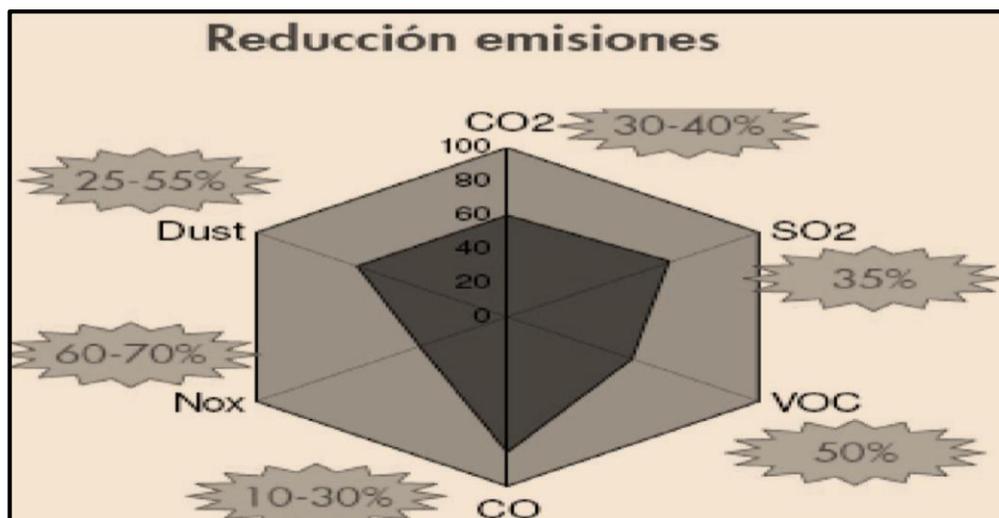
La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta. Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

2.3.2.2 Estudios comparativos sobre las ventajas de las mezclas tibias

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°C 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:

- a) 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".
- b) Comparar, en condiciones de exposición en campo, el tipo de emisiones utilizando Greenfalt con las producidas utilizando HMA (mezcla en caliente convencional).
- c) 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).

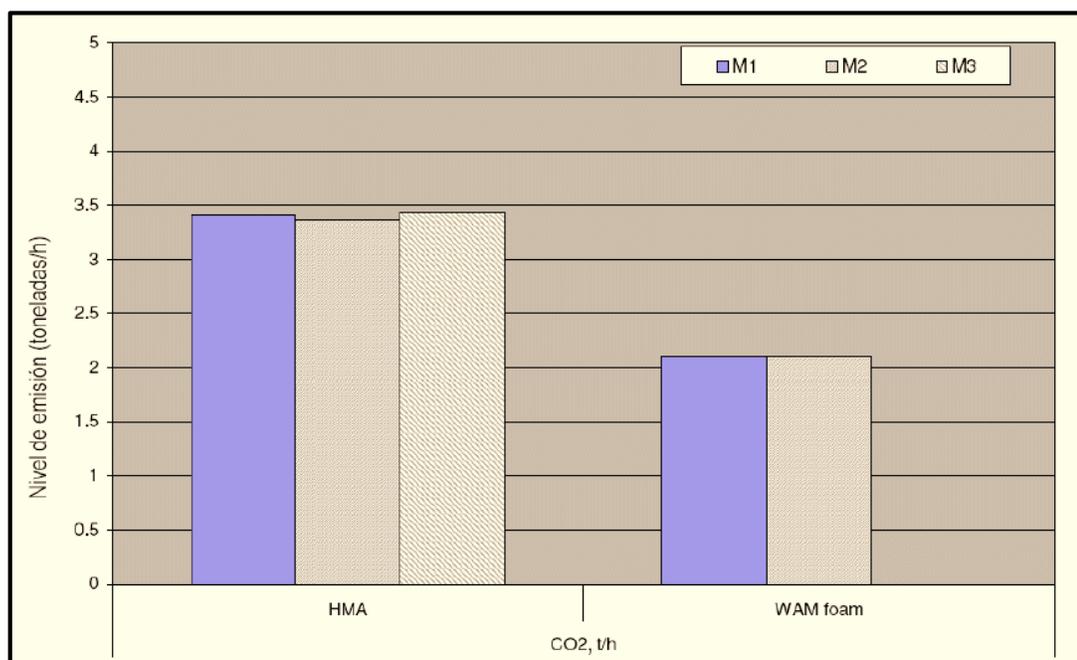
La determinación y cuantificación de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) en las fracciones solubles en benceno se realizaron sobre los toma muestras de HMA. Esto no se ha hecho en el caso de WAM, dado que la cantidad de materia orgánica recogida era demasiado pequeña para dicho análisis. 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%.

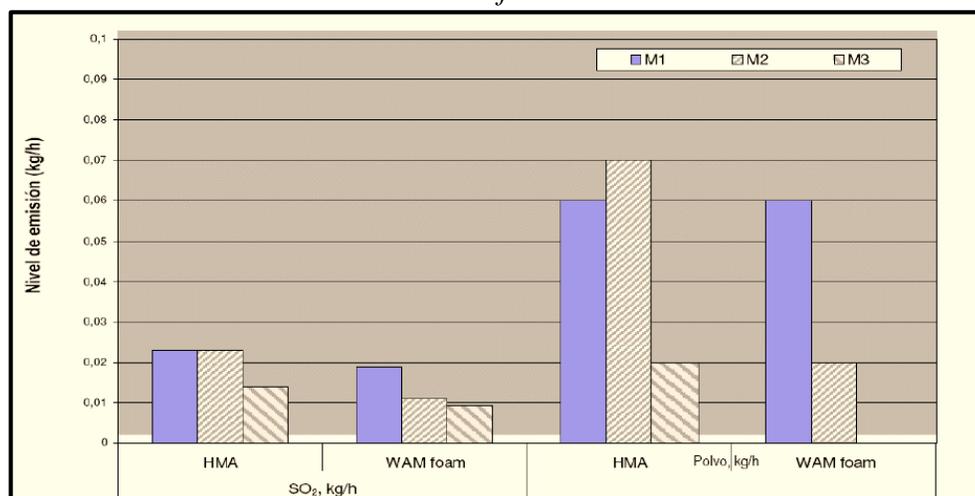
Figura 10. Niveles de emisión de CO y NO_x en tres momentos de medida en la planta de asfalto.



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 planta de asfalto.



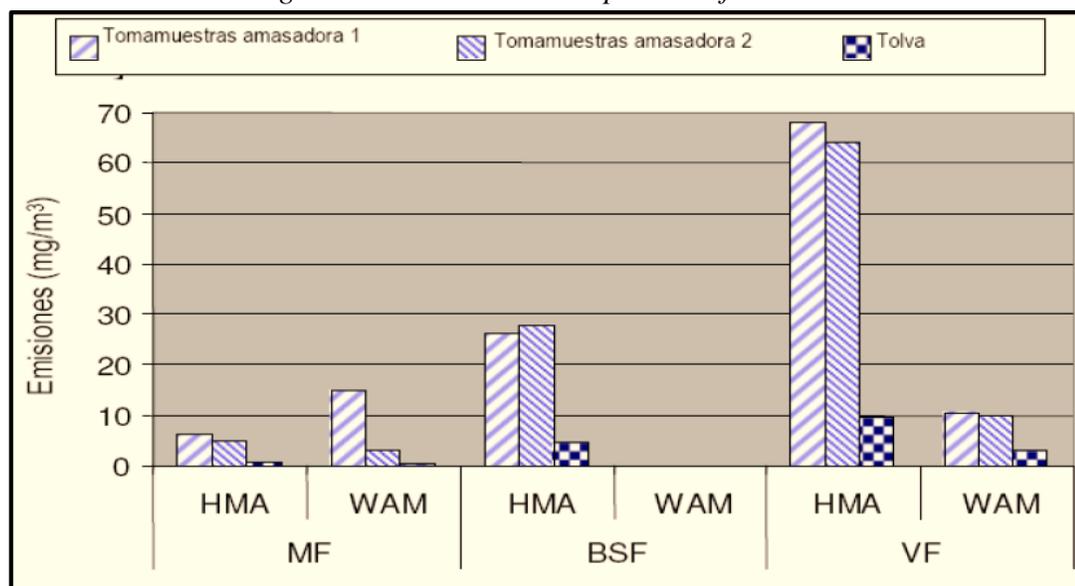
Fuente: (Lopera Palacios, 2011).

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

En las figuras 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 3 que 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 3. Valores de exposición.

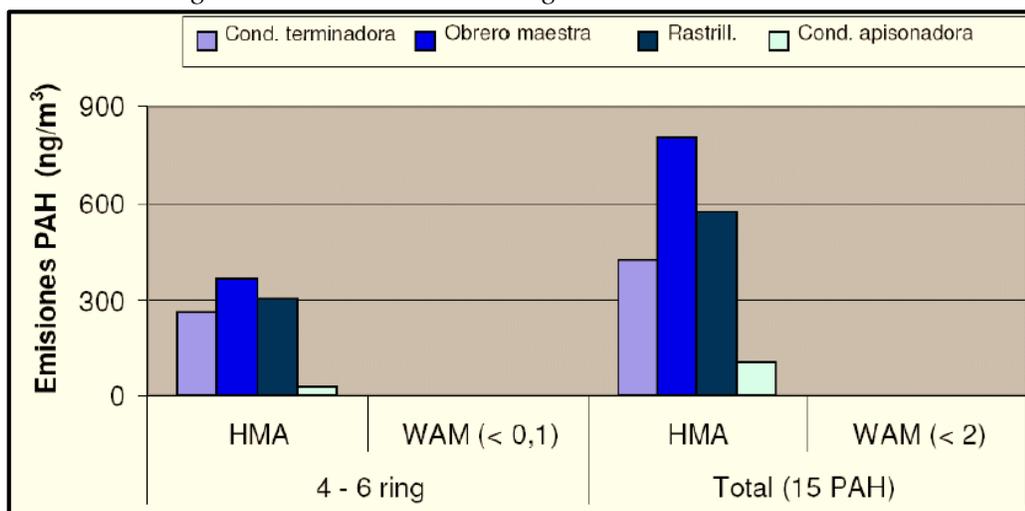
TWA DE 8 h en mg/m ³	Extensión WAM (día 2)		
	MF	BSF	SV
Conductor de la asfáltadora	0,22	0,05	3,45
Obrero de la maestra 1	0,19	0,08	2,4
Obrero de la maestra 2	0,19	0,07	1,18
Rastrillador	0,16	0,14	2,93
Conductor de la apisonadora	0,13	0,03	0,79
Estático 1	0,97	0,02	0,32
Estático 2	0,14	0,01	0,23

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.

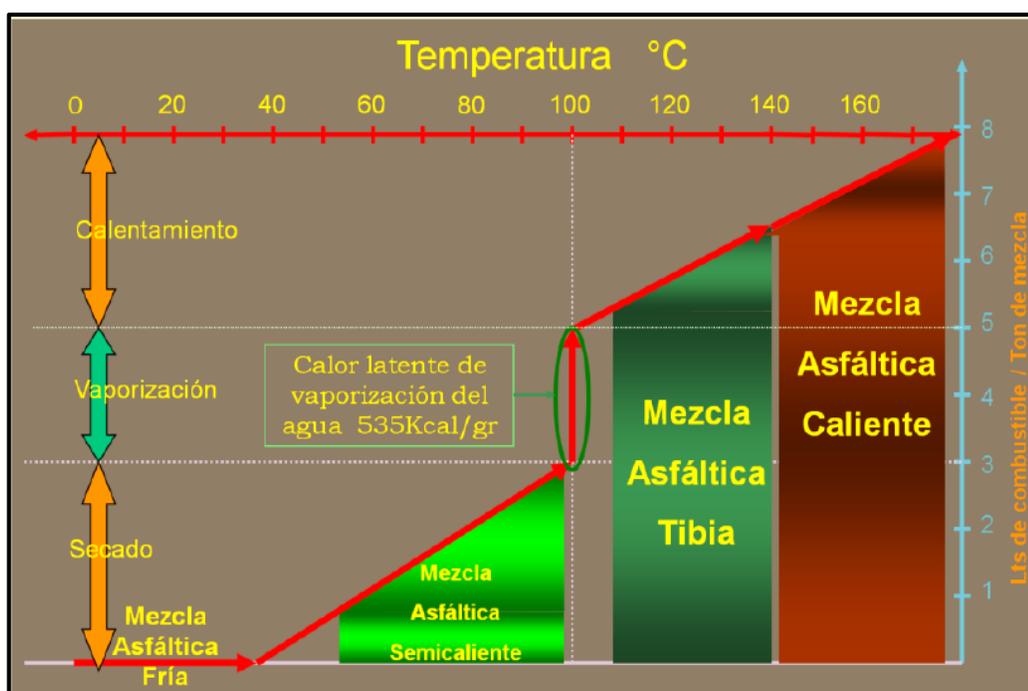
Los aerosoles orgánicos, expresados en fracción soluble en benceno, emitidos con WAM a aproximadamente 125°C están comprendidas en el rango inferior encontrado comúnmente para la extensión de mezclas en caliente cuando se utiliza una administración satisfactoria del producto (v.g. el uso de la temperatura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

2.3.2.3 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 4. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura.

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en Frío	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 Semitempladas	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 semitempladas, 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 y se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009)
Mezclas Tibias WMA	100°C a 135°	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)

Fuente: Comisión permanente del asfalto, 2008.

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: Elaboración propia.

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.

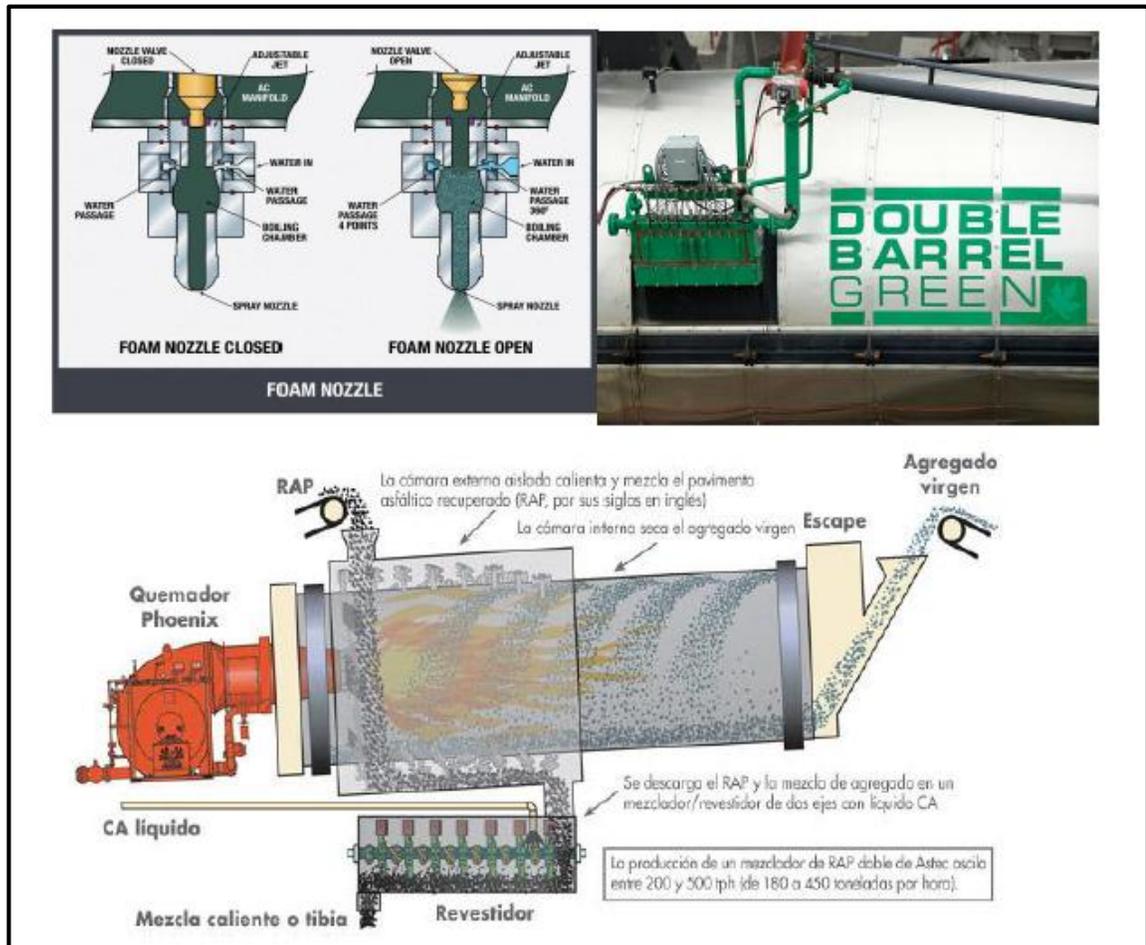
Agua encapsulada, alrededor del 20% de agua cristalizada.

Resultados

Uso de un alimentador adicional en la planta de mezcla.

Temperatura de mezcla alrededor de 130°C.

Figura 16. Sistema de inyección del asfalto en forma de espuma.



Fuente: (Lopera Palacios, 2011).

Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam fue desarrollado en 1997

Principio

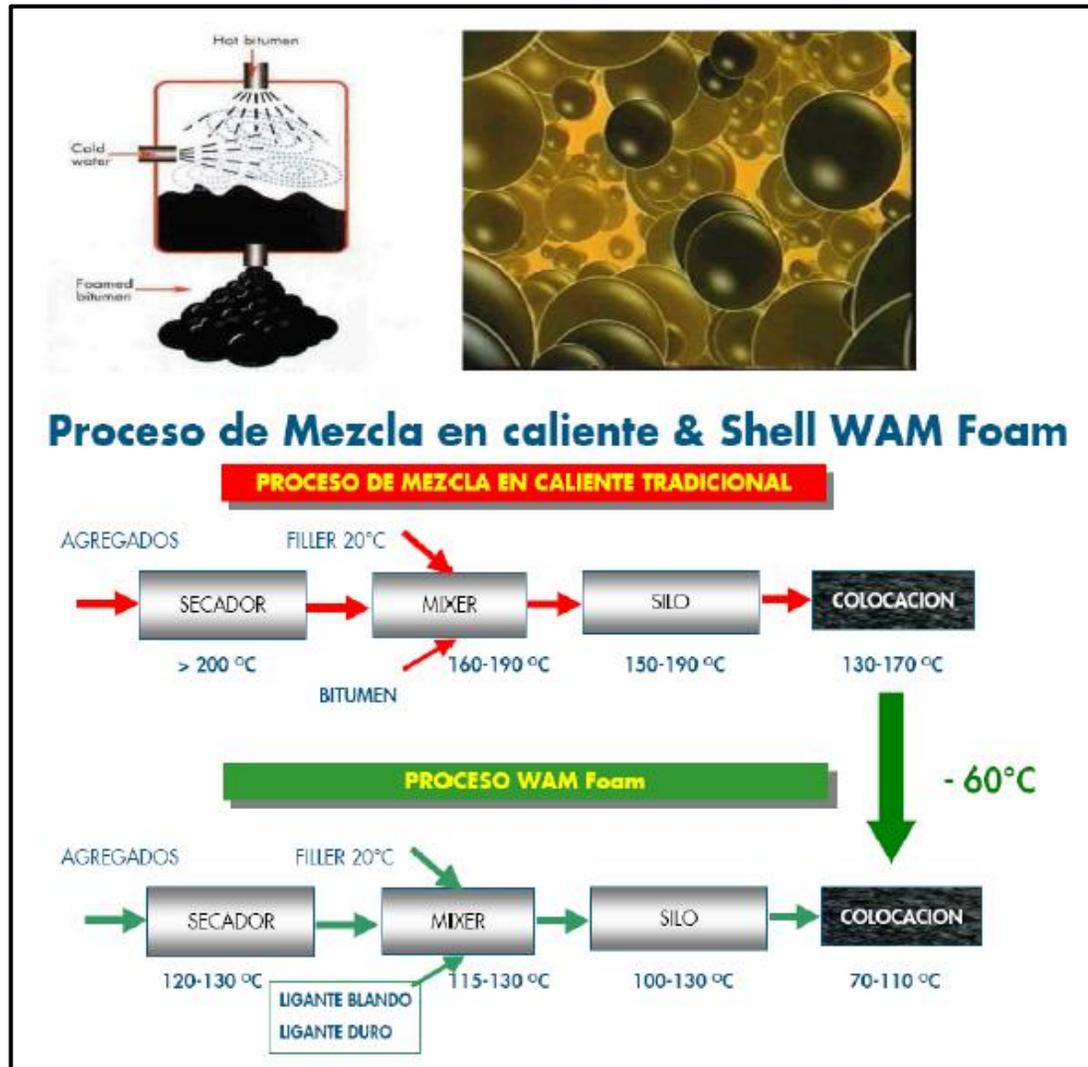
Un betún blando con una viscosidad baja para en primer lugar, envolver los agregados y un betún duro en forma de espuma para recubrir la parte superficial.

Resultados

Reducción de temperatura de hasta de 60°C.

Similar desempeño que una mezcla asfáltica en caliente.

Figura 17. Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam.



Fuente: (Lopera Palacios, 2011).

Sistema basado en emulsión

Principio

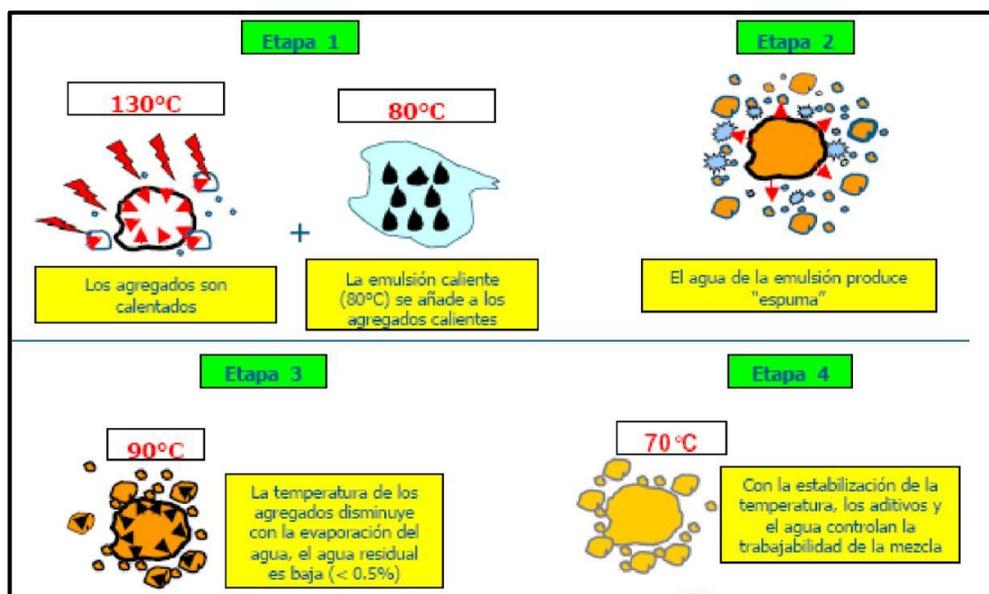
Emulsión con un emulsificante especial.

Resultados

Reducción de la Temperatura de 50 a 75°C.

Sistemas. Evotherm de Meadwestvaco.

Figura 18. Etapas para producir mezcla tibia basada en emulsión.



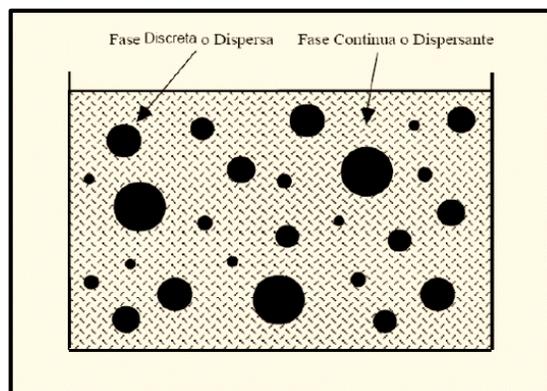
Fuente: (Lopera Palacios, 2011).

2.3.3 Emulsión

2.3.3.1 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 19, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

Figura 19. 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.

2.3.3.2 Tipos de emulsión

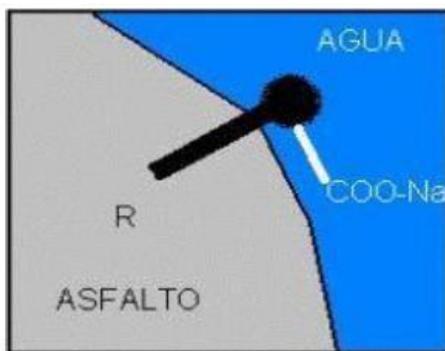
Dentro de las emulsiones asfálticas podemos distinguir dos grandes grupos que se determinan de acuerdo a la carga eléctrica que poseen, esto principalmente depende del tipo de emulsificador:

- a) Emulsiones aniónicas que son las de carga negativa.
- b) Emulsiones catiónicas que son las de carga positiva.

Emulsiones aniónicas

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

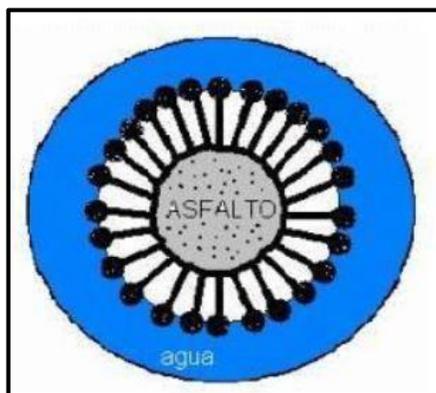
Figura 20. Emulsión aniónica.



Fuente: (Rodríguez, 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 21, quedando tapizado de radicales negativos y actúan como si estuvieran cargados negativamente.

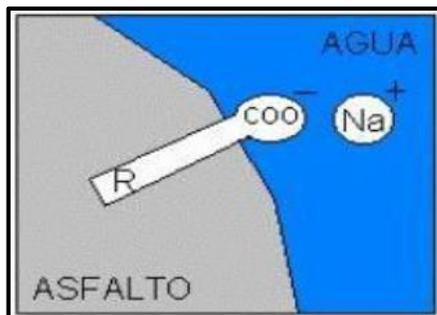
Figura 21. Glóbulo de cemento asfáltico cubierto de moléculas del agente emulsionante.



Fuente: (Rodríguez, 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 emulgentes 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 22:

Figura 22. 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)

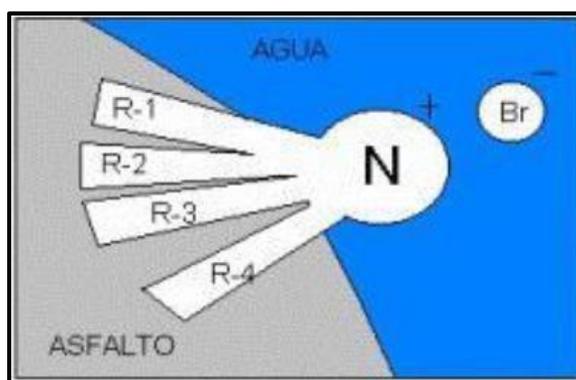
Dependiendo de la rapidez de quiebre se clasifican y esto va dependiendo según la proporción y tipos de emulsificantes empleados, se obtienen según estos las emulsiones de mayor o menor rapidez de quiebre, o sea la velocidad con que las partículas de asfalto recubren el agregado pétreo separándose del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

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 23. Esquema sumersión de los radicales en el glóbulo de asfalto.



Fuente: (Rodríguez, 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)

✓ = 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 5:

Tabla 5. Clasificación de emulsiones asfálticas.

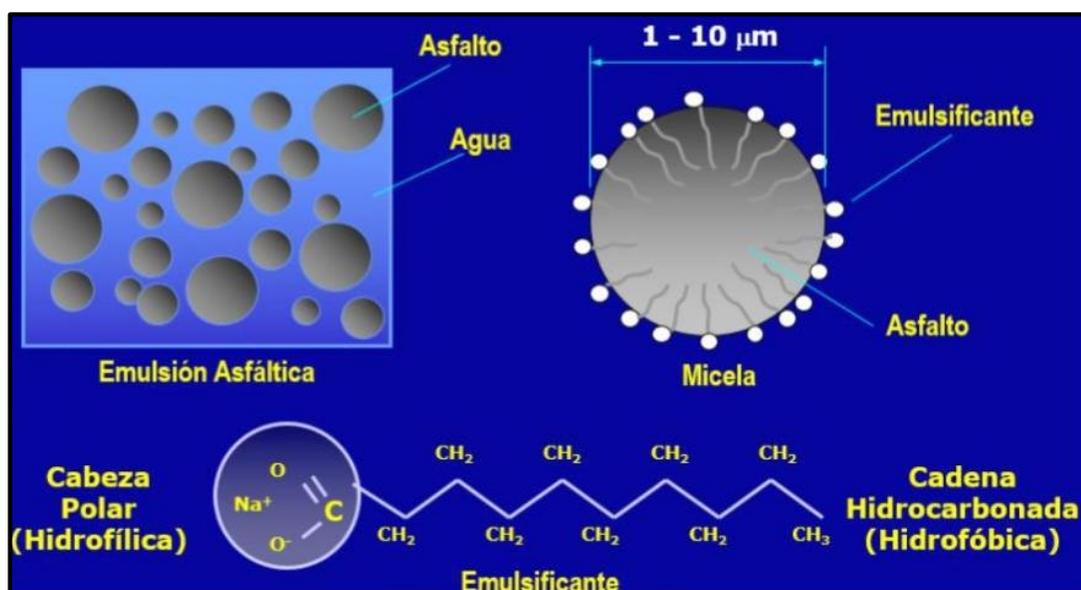
Clasificación	Contenido de asfalto (% en masa)	Tipo de rompimiento	Polaridad
EAR-55	55	Rápido	Aniónica
EAR-60	60	Rápido	Aniónica
EAM-60	60	Medio	Aniónica
EAM-65	65	Medio	Aniónica
EAL-55	55	Lento	Aniónica
EAL-60	60	Lento	Aniónica
EAI-60	60	Para Impregnación	Aniónica
ECR-60	60	Rápido	Catiónica
ECR-65	65	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).

2.3.3.3 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 24). 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 24. 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:

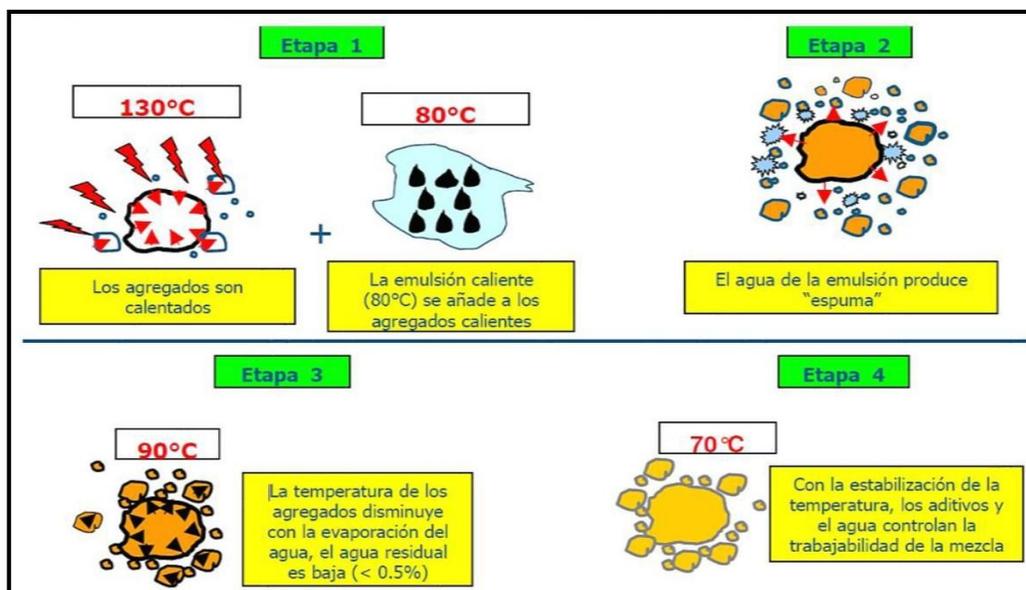
- Empleo de emulsiones asfálticas tradicionales con aditivos químicos.
- Empleo de emulsión asfáltica súper-estabilizada.

2.3.3.4 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 25. 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 25. 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.

2.3.3.5 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.

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.

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.

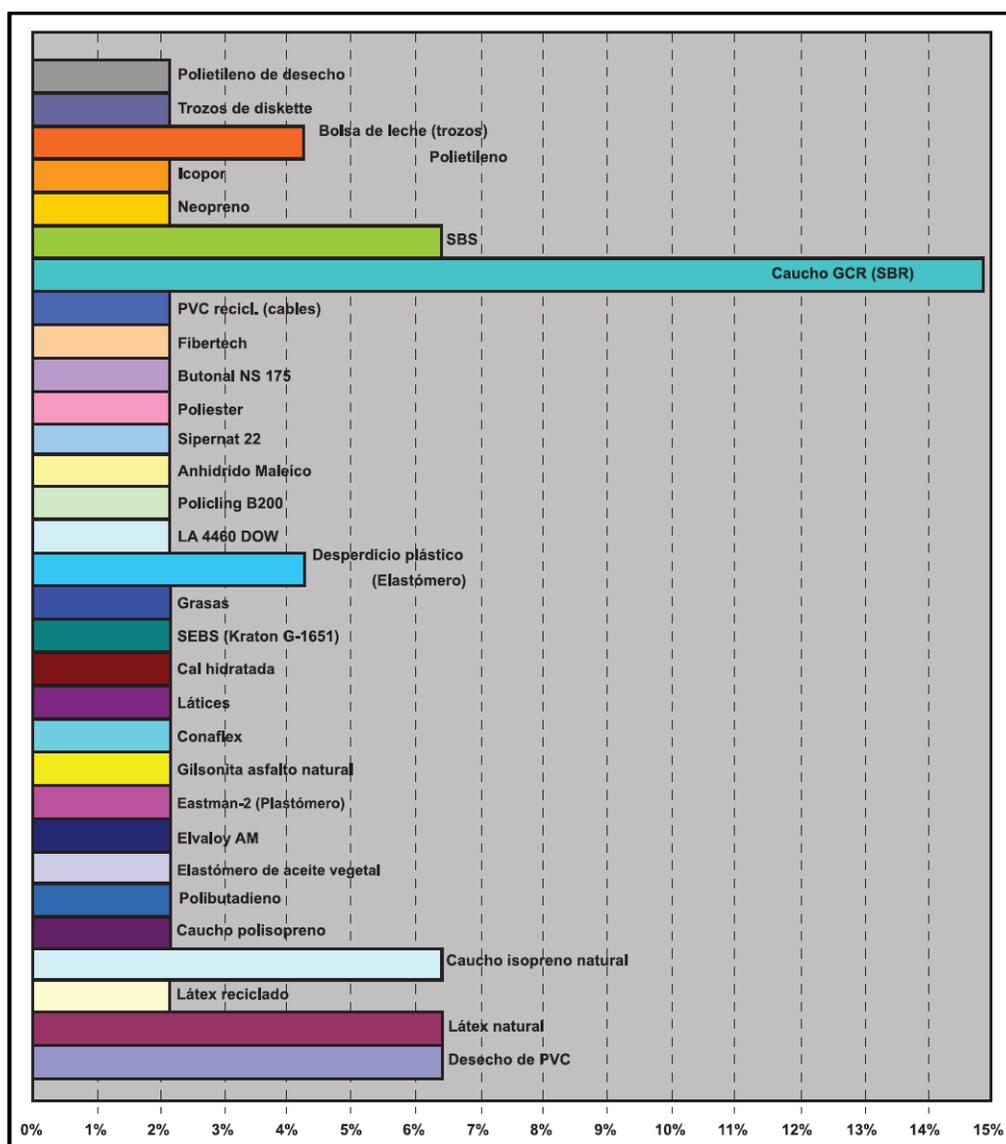
El grado de adhesividad la viscosidad

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 estabildades), de la mineralogía del agregado y de manera directa de la granulometría de la emulsión y de su velocidad de rotura.

2.4 MATERIALES MODIFICADORES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando son sometidas a niveles elevados de tránsito y de gradientes de temperatura. En Colombia, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología.

Figura 26. Materiales modificadores.



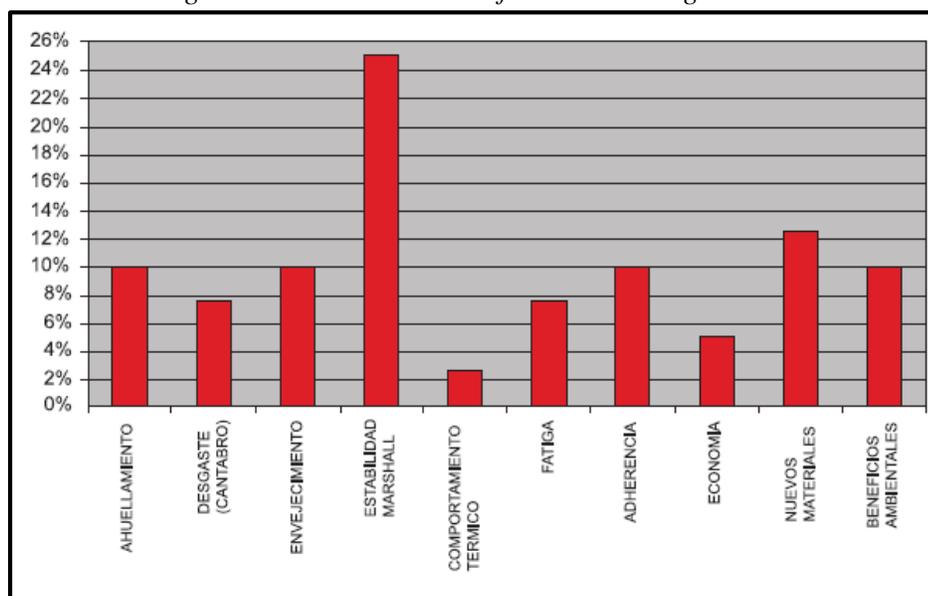
Fuente: Instituto nacional de vías Colombia.

Se presentan los polímeros utilizados en las investigaciones consultadas. La mayoría de polímeros utilizados son por lo general producto del reciclaje o de desecho industrial. Otros por el contrario, como la asfaltita y el látex, se fabrican de materiales naturales. Los documentos consultados muestran claramente que los polímeros con los que más se trabaja en las investigaciones fueron los que se encuentran dentro del grupo de los elastómeros.

Materiales utilizados para modificar asfaltos

Se puede observar que a lo largo de las investigaciones de asfaltos modificados que el objetivo más perseguido por los diferentes grupos de investigaciones ha sido medir como influye en la resistencia obtenida por medio del ensayo de estabilidad Marshall, la adición de polímeros al asfalto.

Figura 27. Estudio de las diferentes investigaciones.



Fuente: Modificaciones realizadas con materiales en Colombia (Rondón, y otros, 2007)

Polímeros modificadores de asfalto

Se presentan los polímeros utilizados en las investigaciones consultadas. La mayoría de polímeros utilizados son por lo general producto del reciclaje o de desecho industrial.

Otros por el contrario, como la asfaltita y el látex, se fabrican de materiales naturales.

Los documentos consultados muestran claramente que los polímeros con los que más se trabaja en las investigaciones fueron los que se encuentran dentro del grupo de los elastómeros.

POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetida de una o varias moléculas unidad por enlaces covalentes. El termino macromolécula significa molécula muy grande. “Polímero” y “Macromolécula” son términos que suelen utilizarse indistintamente, aunque estrictamente hablando no son equivalentes ya que las macromoléculas, en principio, no requieren estar formadas por unidades de repetición.

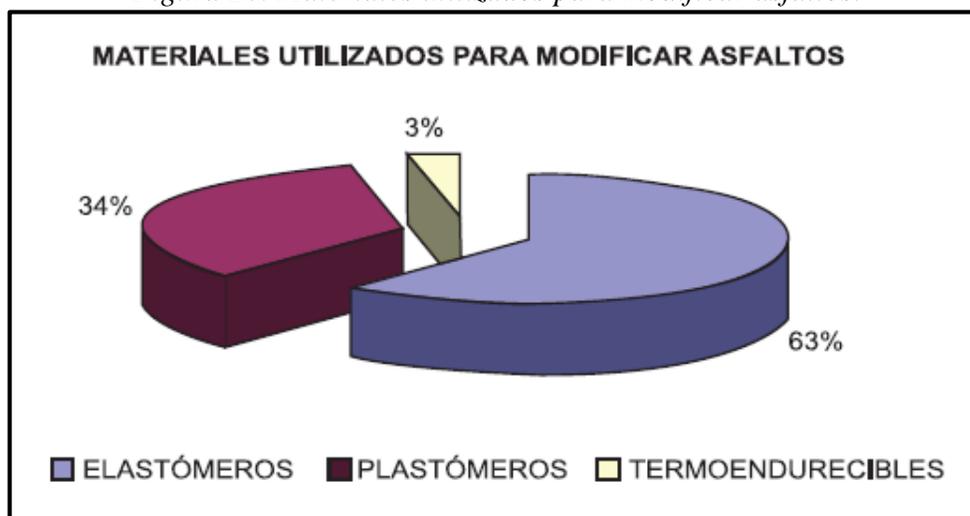
(Brindis, 2002)

Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, mientras que los naturales o biopolímeros como la celulosa, el ADN o las proteínas presentan estructuras mucho más complejas. Los polímeros sintéticos tienen, hoy por hoy, mayor interés en el punto de vista comercial, por lo que en general siempre se refieren a ellos (Brindis, 2002)

Los monómeros son compuestos de bajo peso molecular que puede unirse a otras moléculas pequeñas para formar macromoléculas de cadenas largas comúnmente conocidas como polímeros. Los polímeros son mezclas de macromoléculas de distintos pesos moleculares, por lo tanto, no son especies químicas puras y tampoco tienen un punto de fusión definido. Cada una de las especies forman a un polímero si tiene un peso molecular determinado (M_i) y por lo tanto, para caracterizar una muestra de polímero se busca caracterizar la distribución de pesos moleculares de las moléculas de las especies que lo conforman. (Brindis, 2002)

De acuerdo a lo anterior, la mayoría de los elementos usados para la modificación de asfaltos han sido de tipo elastómeros.

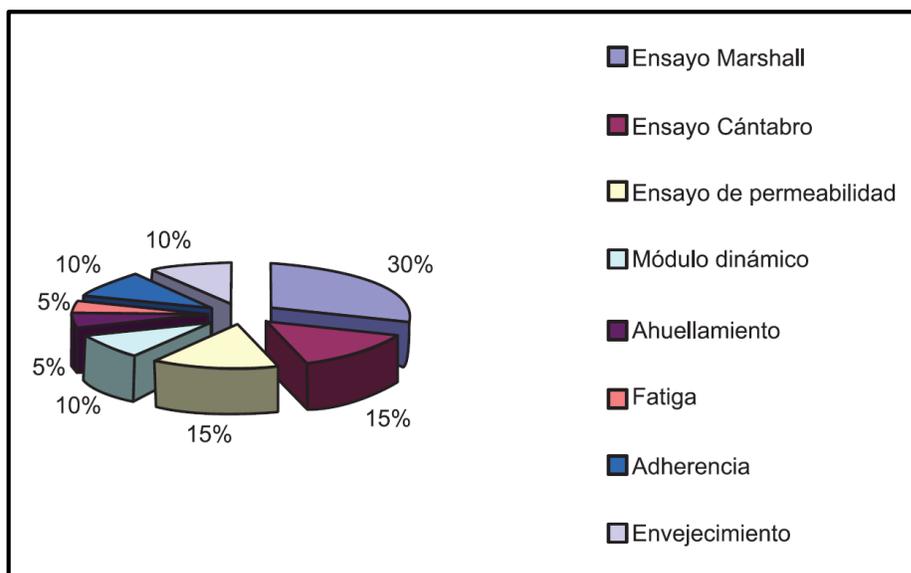
Figura 28. Materiales utilizados para modificar asfaltos.



Fuente: Modificaciones realizadas con materiales en Colombia (Rondón, y otros, 2007)

El procedimiento usado para evaluar estas modificaciones en su mayoría es el ensayo Marshall, al ser un procedimiento económico y fácil de entender, sin embargo, esta alternativa no es tan confiable ya que dicho procedimiento se aleja en gran medida de la realidad.

Figura 29. Materiales utilizados para modificar asfaltos



Fuente: *Modificaciones realizadas con materiales en Colombia (Rondón, y otros, 2007)*

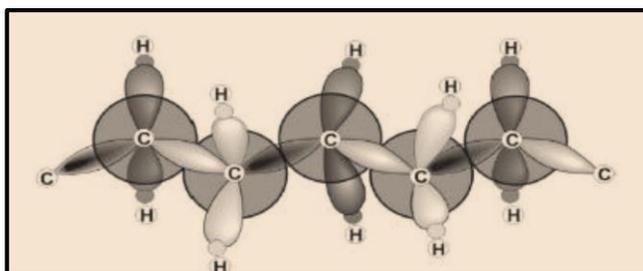
ESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS

La estructura de los polímeros se suele considerar en dos niveles, estructura química y estructura física. La estructura química se refiere a la construcción de la molécula individual y la estructura física al ordenamiento de unas moléculas respecto a otras.

Estructura química.

En los polímeros la unión entre monómeros se realiza siempre mediante enlace covalentes. La figura muestra un trozo de la cadena de polietileno. Los átomos de carbono que constituyen la cadena principal presentan una configuración. Por tanto sus orbitales se dispondrán formando un tetraedro en torno al átomo de carbono y el ángulo de enlace de dos carbonos consecutivos será de aproximadamente 109° . (Brindis, 2002)

Figura 30. Configuración Sp^3 para los átomos de carbono de la cadena principal de la molécula de polietileno.

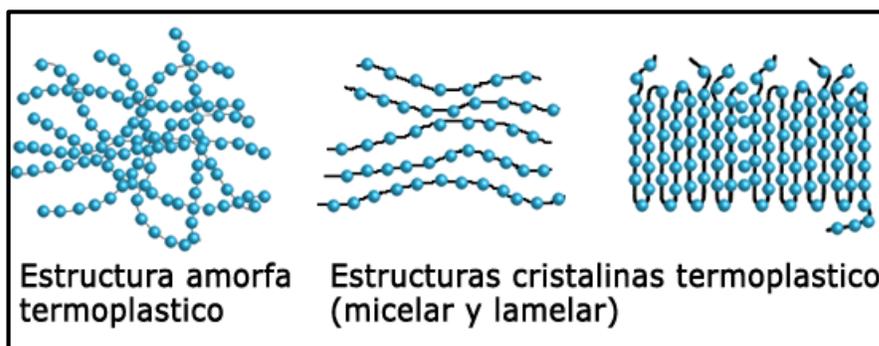


Fuente: *Introducción a la química de los polímeros*, 1995.

Estructura Física

Los términos cristalino y amorfo se utilizan normalmente para indicar las regiones ordenadas y desordenadas de los polímeros, respectivamente. La figura se muestra un esquema de un sistema amorfo, uno semicristalino y otro cristalino. En estado sólido algunos polímeros son completamente amorfos, otros son semicristalinos y, dependiendo de las condiciones de cristalización, un polímero con capacidad de cristalizar puede ser amorfo o semicristalino. (Brindis, 2002)

Figura 31. Estructura física de los polímeros.



Fuente: Introducción a la química de los polímeros”, 1995.

USOS Y APLICACIONES

Las aplicaciones del poliestireno son principalmente las relacionadas con el aislamiento térmico y la resistencia mecánica.

Sus usos se manejan principalmente en la industria de la construcción, el empaque de alimentos y el embalaje. Debido a sus características higiénicas e inertes es de gran utilidad en el empaque de alimentos ya que no genera un medio propicio para la formación de bacterias. (Brindis, 2002)

Gracias a sus características mecánicas (gran resistencia) y su bajo peso, se convierte en un elemento de gran utilidad en la industria de los embalajes, ya que por su bajo peso reduce los costos de envío y su capacidad de absorber la energía producida por golpes y vibraciones ayuda a la protección del objeto a enviar. También sus propiedades de aislamiento térmico y acústico le permiten ser un elemento de gran utilidad en la construcción, ya que puede generar ahorro energético a la hora de construir en países de clima templado o tropical. Además, su bajo peso también resulta tentativo en la

construcción para su utilización como aligerante de losas de edificios y aligerante para concretos. (Brindis, 2002)

ANÁLISIS DE LOS POLÍMEROS UTILIZADOS COMO AGENTES MODIFICADORES

MATERIALES SINTÉTICOS

Policloruro de Vinilo (PVC)

Se conoce el Policloruro de Vinilo, un plástico que surge a partir de la polimerización del monómero de cloroetileno (también conocido como cloruro de vinilo). Los componentes del PVC derivan del cloruro de sodio y del gas natural o del petróleo, e incluyen cloro, hidrógeno y carbono.

Poliestireno (PS)

Es un polímero vinílico. Estructuralmente, es una larga cadena hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono. Es producido por una polimerización vinílica por radicales libres a partir del monómero estireno.

2.5 Método Marshall

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 (Vb) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire (Vv) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

Descripción del método Marshall

El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½” 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 1200g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso

Equipo

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

- ✓ Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- ✓ Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50°F (10°C) y 450°F (232°C).

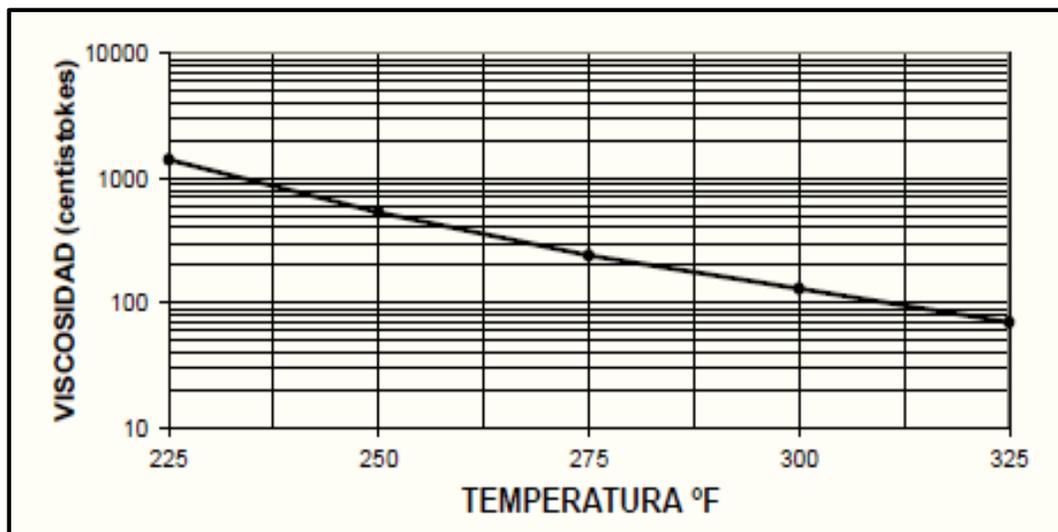
- ✓ Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- ✓ Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).
- ✓ Molde de compactación que consta de una base, molde 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.
- ✓ 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.
- ✓ Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- ✓ Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- ✓ Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

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 a 20 centistokes para la temperatura de compactación.

Figura 32. Curva viscosidad-temperatura para cementos asfálticos.



Fuente: (Instituto del asfalto).

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 ($13,9^{\circ}\text{C}$), 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.

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 vuelve 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

Ensayo Marshall

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

Procedimiento de ensayo

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

En la mezcla sin compactar:

- ✓ Peso específico efectivo.
- ✓ Peso específico máximo.

En la muestra compactada:

- ✓ Peso específico bulk.
- ✓ Estabilidad y flujo a 60°C.
- ✓ Análisis de densidad y Vacíos.

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°C a 1°C.

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:

- ✓ Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4" debajo del pivote.
- ✓ Sumergir la briqueta en baño de agua a 60°C (140°F), durante 30 a 40 minutos.

- ✓ 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°C (70 a 100°F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.

- ✓ 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 guía superior de la mordaza.

- ✓ 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).

- ✓ Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guía, 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.
- ✓ 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.

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:

- ✓ 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.

- ✓ 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/m³, por 62,4 para peso unitario en lb/pie³.

- ✓ 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.

- ✓ 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/m³ (ó entre 62,4 lb/pie³). Los valores de peso específico bulk así obtenidos, serán usados en el cálculo posterior de vacíos.

presentación de resultados

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

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. Se elaboran gráficos, para presentar las relaciones entre los siguientes valores:

- ✓ Estabilidad vs. porcentaje de asfalto.

- ✓ Peso unitario vs. porcentaje de asfalto.
- ✓ Porcentaje de vacíos en la mezcla vs. porcentaje de asfalto.
- ✓ Flujo vs. porcentaje de asfalto.
- ✓ Porcentaje de vacíos en el agregado vs. porcentaje de asfalto.

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.

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:

- ✓ Estabilidad máxima.
- ✓ Peso unitario máximo.
- ✓ 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.

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:

- ✓ El valor de la estabilidad aumenta al aumentar el contenido de asfalto hasta un punto máximo, a partir del cual la estabilidad decrece.
- ✓ 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.
- ✓ 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

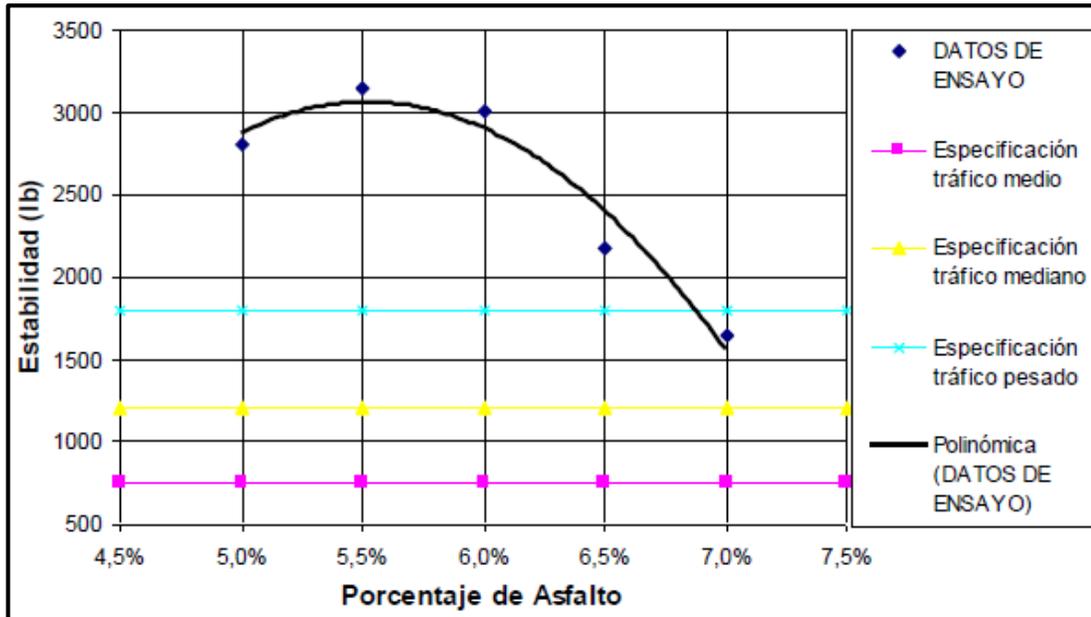
un contenido de asfalto un poco más alto que el correspondiente a la máxima estabilidad.

- ✓ El porcentaje de vacíos (de aire) se reduce al aumentar el contenido de asfalto, hasta llegar al final a un contenido mínimo de vacíos.

- ✓ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, generalmente decrece hasta un valor mínimo, y luego aumenta al incrementarse el contenido de asfalto.

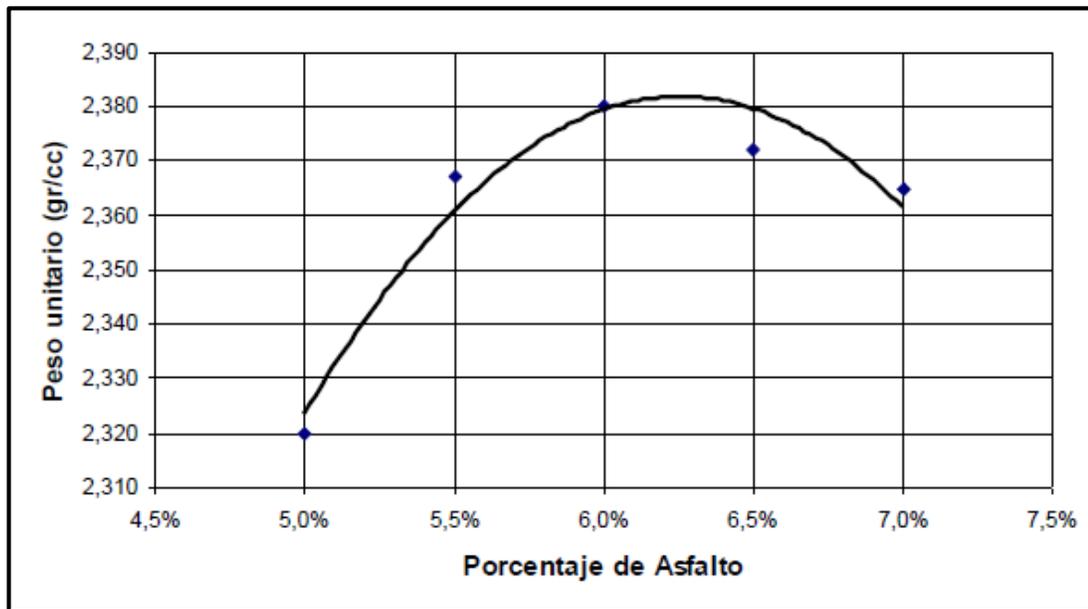
Curvas método Marshall

Figura 33. Curva estabilidad vs. porcentaje de asfalto.



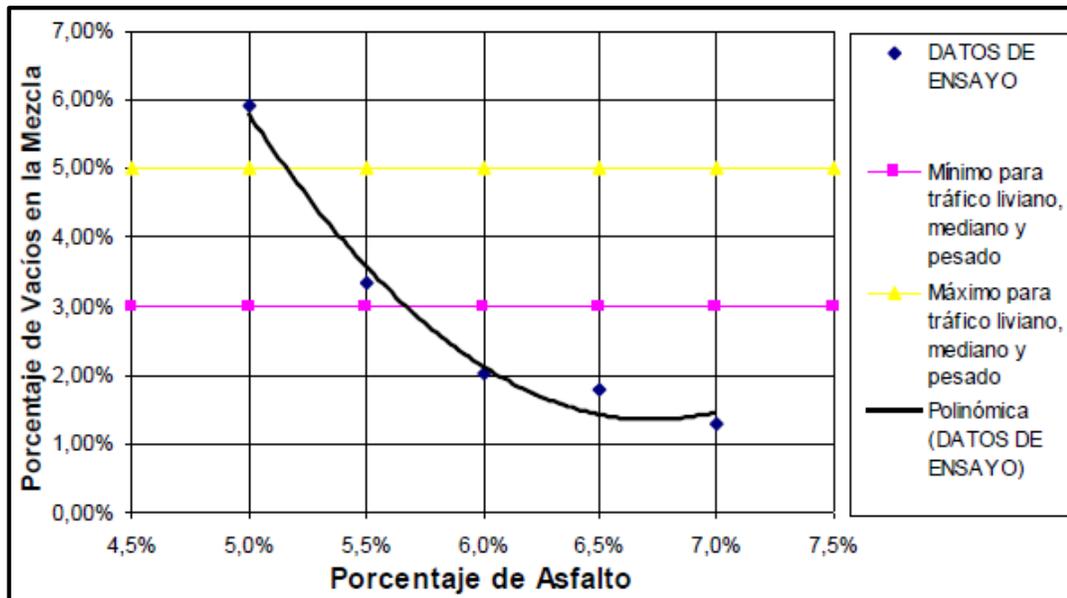
Fuente: (UMSS).

Figura 34. Curva de peso unitario vs. porcentaje de asfalto.



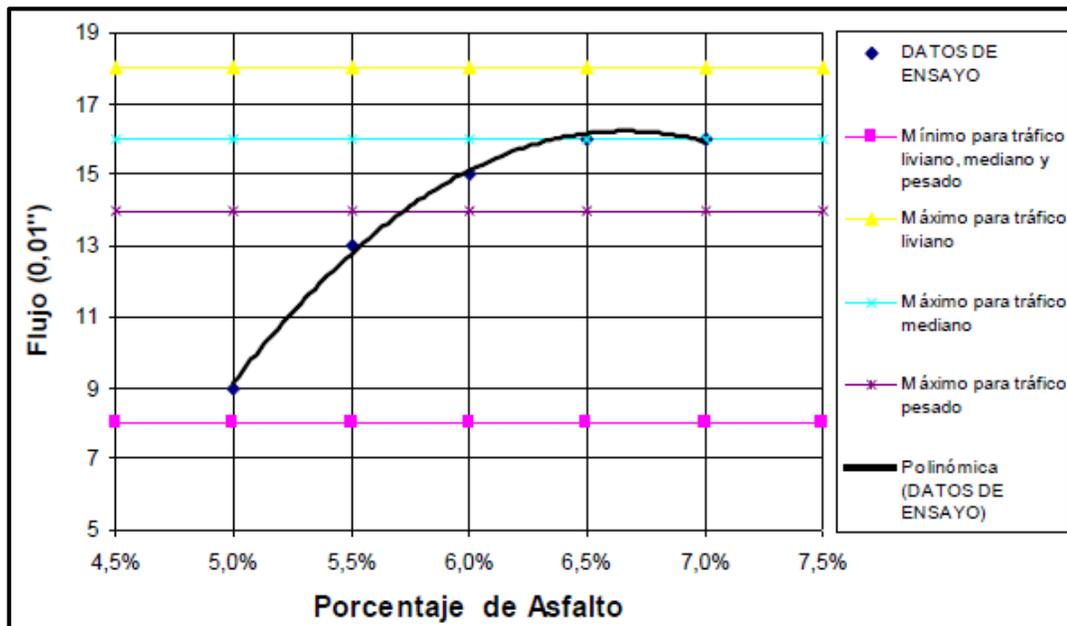
Fuente: (UMSS).

Figura 35. Curva porcentaje de vacíos en la mezcla vs. porcentaje de asfalto.



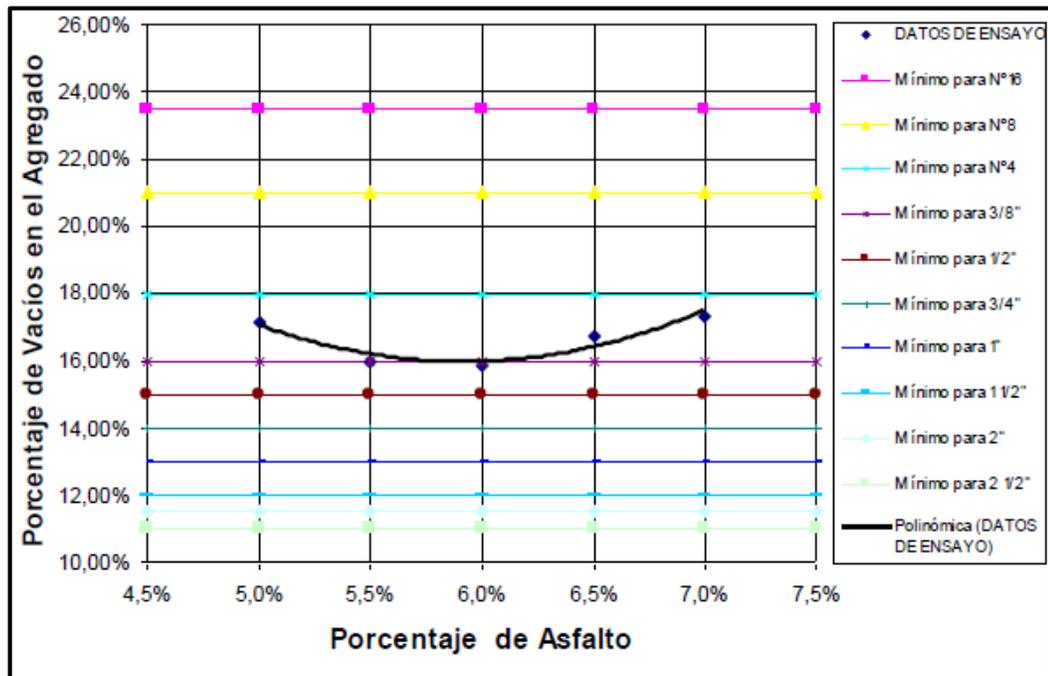
Fuente: (UMSS).

Figura 36. Curva flujo vs. porcentaje de asfalto.



Fuente: (UMSS).

Figura 37. Curva porcentaje de vacíos en el agregado vs. porcentaje de asfalto.



Fuente: (UMSS).

CAPÍTULO III

MEZCLA ASFÁLTICA TEMPLADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y UTILIZANDO EL POLICLORURO DE VINILO (PVC) y POLIESTIRENO (PS) COMO ADITIVOS

Este capítulo describe el proceso para realizar mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica, queriendo demostrar que al adicionar el PVC y el PS pueda ser una alternativa más en hacer una mezcla asfáltica templada cuyas propiedades son iguales o mejores que una mezcla asfáltica templada, es otra 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 en temperaturas bajas no se puede utilizar porque se produce el fraguado y ya no logra su densificación, o seguimos haciendo caliente o buscamos una temperatura donde esas propiedades no se consideren críticas y ahí está la temperatura en templada. Además, los tiempos van cambiando cada vez la tecnología hace aparecer más materiales, los cuales tienen o presenten mejores propiedades para mejorar una mezcla asfáltica, entonces ahora es importante estudiar y evaluar la presencia de nuevos materiales que podemos encontrar en nuestro medio y poder reciclarlos y evitar la contaminación del medio ambiente, en este proyecto de investigación adicionaremos al mismo tiempo los dos materiales como aditivos.

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 misma, pero adicionando los materiales adicionantes que son el PVC y el PS, para poder analizar y comparar sus propiedades.

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

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 Republica de Argentina, al Este con la República del Paraguay y al Oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí.

Figura 38. Mapa político del estado plurinacional de Bolivia.



Fuente: <https://bo.reyqui.com/2012/10/mapa-politico-de-bolivia.html>.

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 km^2 .

Figura 39. Mapa político del departamento de Tarija.

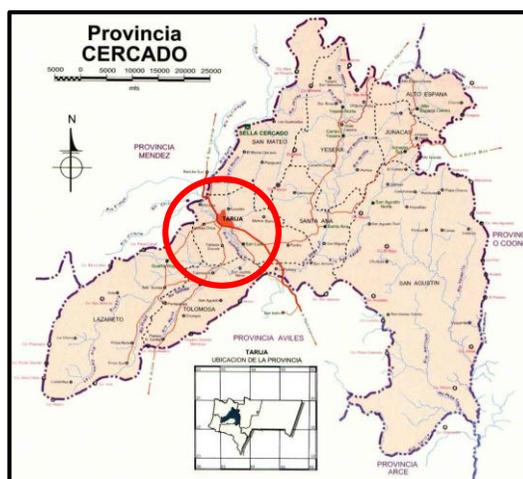


Fuente: <https://bo.reyqui.com/search/label/Tarija%20Bolivia>.

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 40. 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 41. Ubicación de la comunidad de San Mateo.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

Figura 42. Ubicación de la chancadora Garzón.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

Figura 43. Ubicación de acopio de materiales.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.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 cumplen 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 las imágenes de la chancadora Garzón.

Figura 44. Chancadora Garzón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Oficinas de la chancadora Garzón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Equipo y maquinaria.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 MATERIALES ADICIONANTES A LA MEZCLA ASFÁLTICA POR VÍA HÚMEDA (PVC Y PS)

Con la idea de realizar un análisis del comportamiento en las propiedades mecánicas de peso volumétrico, estabilidad y fluencia al adicionar estos desechos de polímero al mismo tiempo en la mezcla asfáltica con emulsión en templado y también poder evitar la contaminación del medio ambiente.

Se realizó un tamizado de la muestra del plástico triturado y todo aquel desecho de PVC retenido en el tamiz N°100 será utilizado para nuestra investigación y con el PS no se realizó dicha granulometría porque al ser un material muy ligero no se realizó el tamizado del mismo solo se desmenuzó en pequeños tamaños.

Figura 47. Recolección de los materiales adionantes Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliestireno (PS).



Fuente: Elaboración propia.

TRITURADO DEL MATERIAL ADICIONANTE

Se procedió a triturar el material en la empresa trituradora Capital Industrial que queda dentro de la fábrica de la empresa de Formas Plásticas.

Figura 48. Capital Industrial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49. Equipos de trituración.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50. Materiales triturados de PVC y PS.



Fuente: Elaboración propia.

Finalizado el proceso del triturado de ambos materiales se recolecto con mucho cuidado el material dentro de una bolsa en un recipiente, para luego proceder al tamizado solo del PVC como anteriormente se describió y lo que se hizo con el Poliestireno es seleccionar los tamaños más pequeños porque si se quería realizar el tamizado al ser un material

liviano no pasaba por los tamices y se adhería a las mallas del tamiz y por eso seleccionó un tamaño entre los 0,2-0,3 mm.

Las partículas a 0,15 mm (tamiz N°100) del PVC y 0,2-0,3 mm del PS constituirá el material de estudio dentro de las mezclas asfálticas y estarán listas para ser incorporadas a la emulsión por vía húmeda.

Figura 51. Tamizado del Policloruro de Vinilo (PVC).

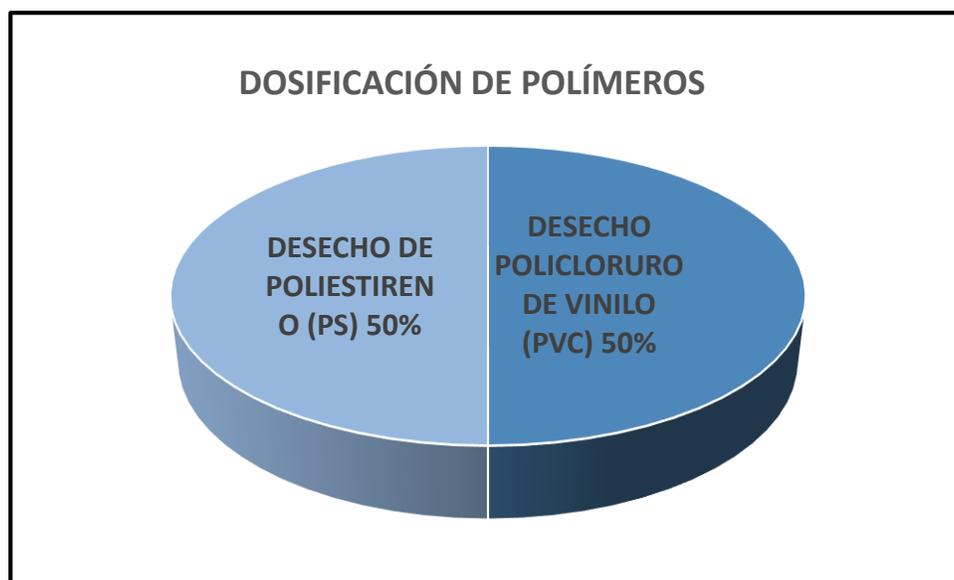


Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Dosificación de los polímeros

Serán añadidos en un 50% de Policloruro de vinilo y 50% de poliestireno en la mezcla asfáltica específicamente al contenido óptimo de emulsión asfáltica por vía húmeda añadiendo desde el 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10% de polímero haciendo que al dosificar por vía húmeda nuestra emulsión se vuelva una emulsión polimérica al ser calentada a una temperatura de 60°C.

Grafico 1. Dosificación de los polímeros utilizados para la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA EMULSIÓN

En este trabajo de investigación se centra en estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica templada utilizando la siguiente emulsión convencional rotura media donde posteriormente se podrá ver en la ficha técnica de la emulsión de Stratura asfaltos:

Figura 52. Características de la emulsión asfáltica.

ANEXO I		STRATURA ASFALTOS			
Certificado de Calidad de Origen					
Certificado N.º 38-1513/17			Data de emissão: 04/12/2019		
Cliente: SEGOVIA FERNANDEZ RENE					
Produto: BETUMIX CMS-2H			Quantidade: 20.200 KG		
Ordem de carregamento N.º 38-22976/18			Data de fabricação: 23/03/2018		
Fatura: 155/17			Lote: 38-1327/18		
Características do produto					
ENSAIO	MÉTODO	UNI D.	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	
				STRA	CLIENTE
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C	AASHTO T 72	Seg.	50-450	127	
Estabilidade, 24 hrs.	AASHTO T 59	% massa	1 máx.	0,3	
Desemulsibilidade	AASHTO T 55	% massa	40 mín.	0,05	
Carga de partícula	AASHTO T 59	---	Positiva	POS	
Peneiração	AASHTO T 78	% massa	0,1 máx.	0,0	
Destilação					
Solvente destilado	AASHTO T 78	% volume	3 máx	0	
Resíduo		% massa	65 mín.	68,3	
Ensaio sobre o resíduo da destilação					
Penetração (100g, 5s, 25°C)	AASHTO T 49	0,1 mm	50-100	60	
Solubilidade em tricloroetileno	AASHTO T 44	%	99,0 mín.	100	
Ductilidade, 25°C, 5 cm/min.	AASHTO T 51	cm	100 mín.	>100	
Densidade relativa a 25°C	AASHTO T 228	g/cm³	---	1-1,05	
RESPONSÁVEL QUÍMICO: Emerson Rodrigues Maciel – CRQ 4ª REG. SP. – 04241037 Irma Elizabeth Batista RG: 40.382.757-9 Assistente Administrativo Paulínia-SP					

Fuente: Estrutura asfaltos.

3.5 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 ubicada en San Mateo, en cantidades lo suficientemente necesario para realizar su caracterización y el estudio de las mezclas asfálticas con emulsión convencional, 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 sea homogéneo la muestra y se la puso en bolsas de azúcar, posteriormente se las cargo en una camioneta para trasladar las muestras hasta el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Figura 53. Acopio de la grava.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54. Acopio de la gravilla.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 55. Acopio de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56. Muestreo 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 un bidón de 10 litros como se muestra en la figura.

Figura 57. Obteniendo la muestra de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

3.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

3.6.1.1 Ensayo de los agregados

Para la caracterización de los agregados que serán utilizadas en el estudio de mezclas asfálticas con emulsión, se realizaron los ensayos según las normas ASTM y AASHTO, en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Se realizará los ensayos para los agregados pétreos:

- a) Grava de 3/4"
- b) Grava de 3/4" (gravilla)
- c) Arena triturada

3.6.1.2 Ensayos de granulometría (ASTM C 136 AASHTO T 27)

Objetivo

Este método de ensayo tiene por objetivo 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 redondeada y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo el 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 utilizará 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" , $1\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{4}$ " , $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{8}$ " 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 N°4, N°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 N°10 pero queda retenido en la malla N°200 (partículas mayores que 0.075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N°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 58. Sacando una muestra de las bolsas con una cuchara para ponerlas en la bandeja y pesarlas en la balanza.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 59. Juego de tamices por donde se introducirá la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 60. Tamizado a detalle la muestra para luego obtener el peso retenido en el tamiz.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica

En los resultados de las tablas que se muestran más adelante, solo estará uno de los 3 ensayos realizados para cada agregado, en este caso agregado grueso (grava y gravilla) y agregado fino (arena)

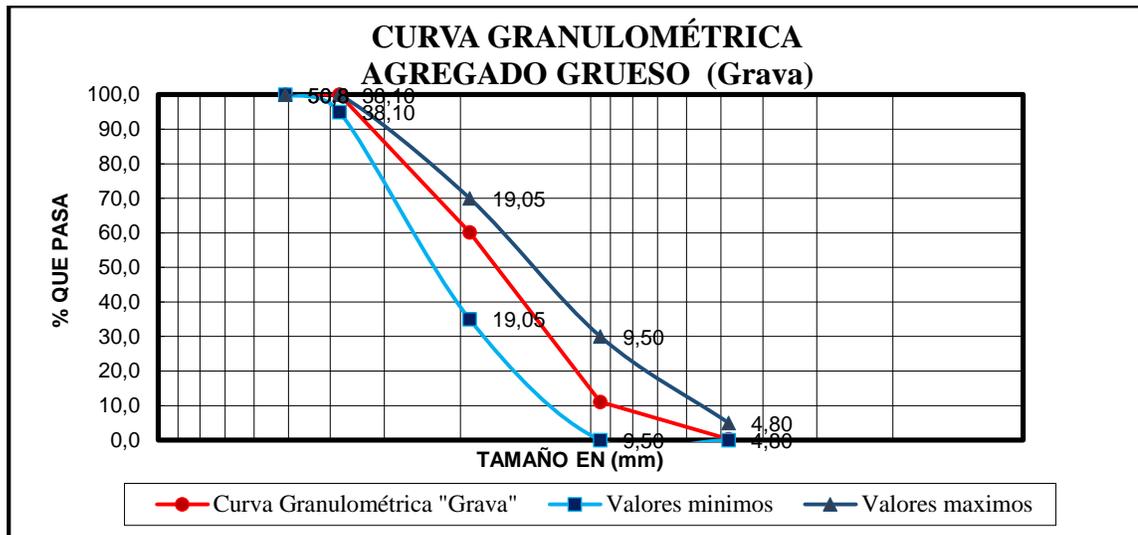
Tabla 6. Planilla de resultado de la granulometría del agregado grueso (grava).

Peso Total (gr.)			10000		% Que pasa del total
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		
			(gr)	(%)	
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	3325,65	3325,65	33,26	66,70
1/2"	12,50	3479,20	6804,85	68,05	32,00
3/8"	9,50	2082,65	8887,50	88,88	11,10
N°4	4,80	1082,20	9969,70	99,70	0,30
Base	0	25,90	9995,60	99,96	0,00
Suma =		9995,60			
Pérdidas =		4,40			
Mf =		7,22			

Tamaño max = 3/4"

Fuente: Elaboración propia.

Grafico 2. Curva granulométrica del agregado grueso (grava).



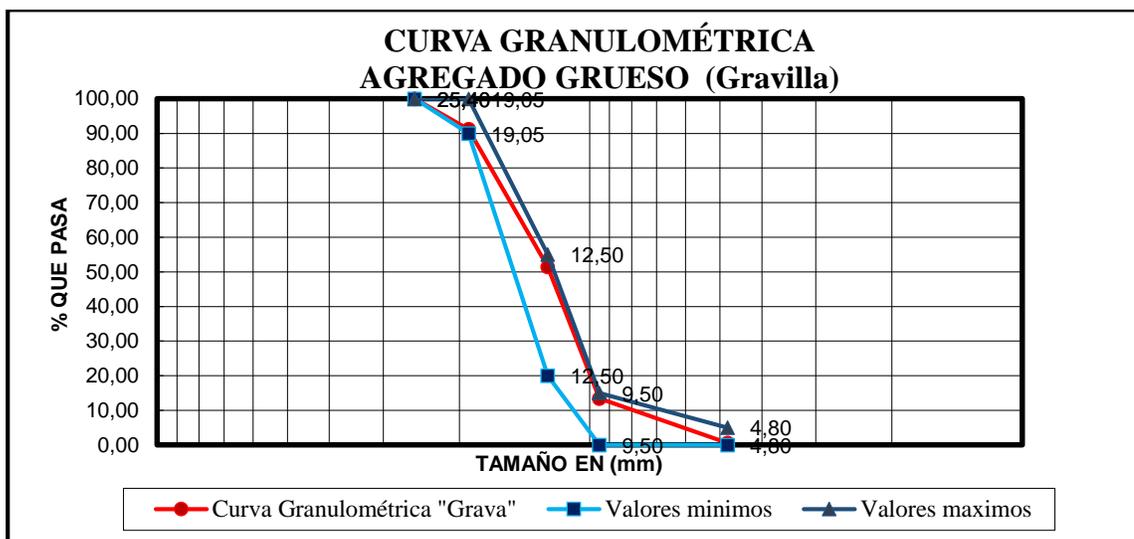
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Planilla de resultado de la granulometría del agregado grueso (gravilla).

Peso Total (gr.)			10000		% Que pasa del total
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado (gr)	(%)	
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	875,70	875,70	8,76	91,24
1/2"	12,50	3979,58	4855,28	48,55	51,45
3/8"	9,50	3805,30	8660,58	86,61	13,39
N°4	4,80	1283,10	9943,68	99,44	0,56
BASE	0	51,63	9995,31	99,95	0,00
Suma =		9995,31			
Pérdidas =		4,69	Tamaño max = 3/4"		
Mf =		6,95			

Fuente: Elaboración propia.

Grafico 3. Curva granulométrica del agregado grueso (gravilla).



Fuente: Elaboración propia.

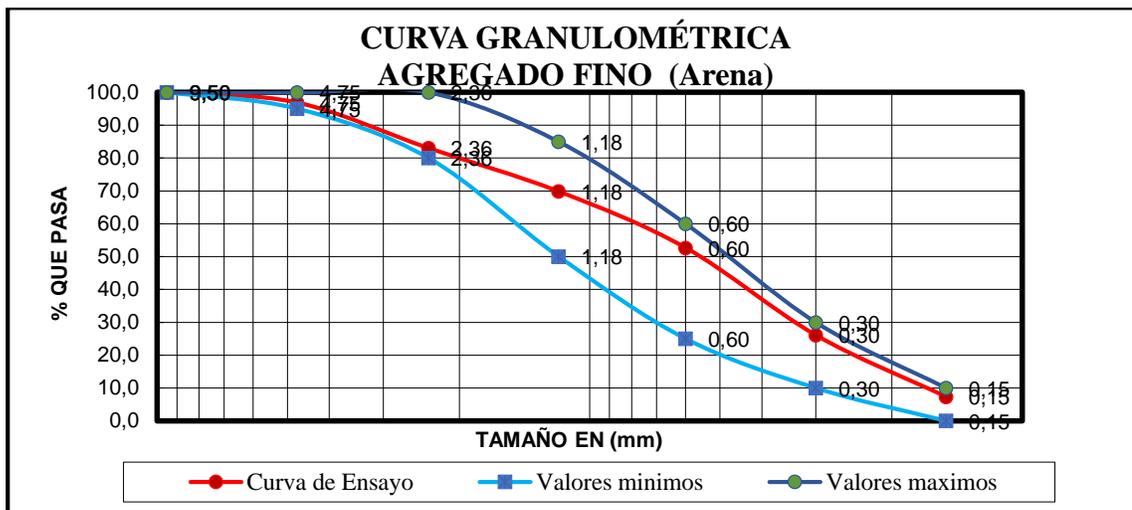
Tabla 8. Planilla de resultado de la granulometría del agregado fino (arena).

Peso Total (gr.)			2000		% Que pasa del total
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	63,00	63,00	3,15	96,90
N°8	2,36	276,60	339,60	16,98	83,00
N°16	1,18	263,80	603,40	30,17	69,80
N°30	0,60	343,20	946,60	47,33	52,70
N°50	0,30	531,40	1478,00	73,90	26,10
N°100	0,15	374,90	1852,90	92,65	7,40
BASE		143,50	1996,40	99,82	0,20
	Suma=	1996,40			
	Pérdidas=	3,60			
	Mf=	2,64			

Tamaño max=N°4"

Fuente: Elaboración propia.

Grafico 4. Curva granulométrica del agregado fino (arena).



Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.3 Ensayo de equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T 176-00)

Objetivo

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a las cantidad relativa 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 con respecto del material y tamizado 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 Administración Boliviana de Carreteras (ABC).

Procedimiento

Figura 61. Probetas y materiales para el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62. Mediante un embudo vierto la muestra de arena en las probetas hasta el límite que indica la probeta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63. Las probetas con el defloculante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64. Agitando la probeta con el defloculante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65. Las tres probetas después de la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66. Llenamos con agua las 3 probetas hasta el límite superior.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67. Mezclando toda la muestra con agua y el defloculante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68. Introduciendo el pisón para compactar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 69. Verificando como quedo después del apisonamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 9. Datos del ensayo de equivalente de arena.

Ensayo	Lecturas		
	1	2	3
Ensayo N°	1	2	3
Lectura nivel superior	10,40	10,20	9,90
Lectura nivel inferior	9,90	9,80	9,40
Número de ensayos realizados	3		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos

Utilizaremos el promedio para realizar los cálculos:

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

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{9,90}{10,40} * 100$$

$$\text{Equivalente de arena} = 95,19\%$$

Tabla 10. Resultados del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
% de arena	95,19	96,08	94,95
Promedio	95,41 %		

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.4 Ensayo de peso unitario de los agregados (ASTM C 29 AASHTO T 19 M-00)

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 Administración de Carreteras (ABC).

Procedimiento

Figura 70. Materiales molde de 3 L, varilla y la muestra de arena para realizar el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 71. Volumen suelto 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. Enrazando con la varilla para la obtención del peso.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 11. Datos del ensayo de peso unitario de la arena suelta.

PESO UNITARIO SUELTO					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)
1	2605	3000	7010	4405	1,468
2	2605	3000	7180	4575	1,525
3	2605	3000	7410	4805	1,602
Promedio					1,532

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Datos del ensayo de peso unitario de la arena compactado.

PESO UNITARIO COMPACTADO					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)
1	2605	3000	798	5375	1,792
2	2605	3000	7835	5230	1,743
3	2605	3000	8050	5445	1,815
Promedio					1,783

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{4405,00}{3000}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,468 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

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

Tabla 13. Datos del peso unitario de la gravilla 3/4".

PESO UNITARIO SUELTO					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso Recip. + Muestra Suelta (gr)	Peso Muestra Suelta (gr)	Peso Unitario Suelto (gr/cm3)
1	5655	10000	19290	13635	1,364
2	5655	10000	19280	13625	1,363
3	5655	10000	19410	13755	1,376
Promedio					1,367

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados del ensayo de gravilla 3/4".

PESO UNITARIO COMPACTADO					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso Recip. + Muestra Suelta (gr)	Peso Muestra Suelta (gr)	Peso Unitario Suelto (gr/cm3)
1	5655	10000	20425	14770	1,477
2	5655	10000	20455	14800	1,480
3	5655	10000	20460	14805	1,481
Promedio					1,479

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Datos del peso unitario de la grava 3/4”.

PESO UNITARIO SUELTO					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso Recip. + Muestra Suelta (gr)	Peso Muestra Suelta (gr)	Peso Unitario Suelto (gr/cm3)
1	5655	10000	19927	14272	1,427
2	5655	10000	19878	14223	1,422
3	5655	10000	19896	14241	1,424
Promedio					1,425

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados del ensayo de gravilla 3/4”.

PESO UNITARIO COMPACTADO					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso Recip. + Muestra Suelta (gr)	Peso Muestra Suelta (gr)	Peso Unitario Suelto (gr/cm3)
1	5655	10000	21036	15381	1,538
2	5655	10000	21045	15390	1,539
3	5655	10000	20895	15240	1,524
Promedio					1,534

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.5 Ensayo peso específico del agregado fino (ASTM C 128 AASHTO T 84)

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 2 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 (ABC).

Procedimiento

Figura 77. Muestra saturada y puesta en una bandeja grande.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 78. Sacando la muestra de arena.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 79. Secando la muestra de arena con secadora.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 80. Introduciendo la muestra en el cono en 3 capas con 25 golpes y enrasando.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 81. Verificando que la muestra de arena está seca.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 82. Obteniendo el peso de la muestra, vaciando la muestra en el matraz.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 83. Llenando de agua el matraz con la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 84. Agitando el matraz y vaciando en un plato toda la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 85. La muestra en el plato listo para meter al horno y pesarla posteriormente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 86. Obtención del peso seco de la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 17. Datos del ensayo peso específico del agregado fino.

Muestra N°	Peso muestra "B" (gr)	Peso de matr�az (gr)	Muestra+ matr�az + Agua (gr)	Peso del agua agregado al matr�az "W" (ml) � (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen Del matr�az "V" (ml)
1	500	177,50	962,80	285,30	483,40	500,00
2	500	177,50	968,40	290,90	487,30	500,00
3	500	177,50	969,60	292,10	485,25	500,00

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{463,40}{500 - 312,80}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,48 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{P. E. A. Saturado superficial seco} = \frac{B}{V - W}$$

$$\text{P. E. A. Saturado superficial seco} = \frac{500}{500 - 285,30}$$

$$\text{P. E. A. Saturado superficial seco} = 2,25 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{((V - W) - (B - A))}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{500}{((500 - 285,30) - (500 - 483,40))}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,44 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500 - 483,40}{483,40} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = 3,32\%$$

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

Tabla 18. Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Muestra N°	P. E. a granel (gr/cm ³)	P. E. saturado con sup. seca (gr/cm ³)	P. E. aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,25	2,33	2,44	3,32
2	2,33	2,39	2,48	2,54
3	2,33	2,41	2,51	2,95
	2,31	2,38	2,48	2,94

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.6 Ensayo peso específico del agregado grueso (ASTM C 127 AASHTO T 85)

Objetivos

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos grueso. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/4" 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°C a 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 interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en 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 Administración de Carreteras (ABC).

Procedimiento*Figura 87. Secado la muestra saturada.*

Fuente: Elaboración propia.

Figura 88. Introduciendo la muestra al canastillo para luego obtener el peso de la muestra saturada con superficie seca.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 89. Introduciendo el canastillo con la muestra en agua.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 90. Equilibrando la balanza con las pesas para obtener el peso sumergido.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 91. Vaciando la muestra saturada en una bandeja para luego meter al horno.



Fuente:

Elaboración propia.

Figura 92. Obtención del peso seco de la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 19. 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	4748,30	4790,80	2945,87
2	5003,00	5086,70	3105,60
3	4976,20	5043,40	3045,00

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Grava de 3/4"

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{4748,30}{4790,80 - 2945,87}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,57 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de superficie seca} = \frac{4790,80}{4790,80 - 2945,87}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de superficie seca} = 2,60 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4748,30}{4748,30 - 2945,87}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,63 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{B - A}{A} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{4790,80 - 4748,30}{4748,30} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorcion} = 0,90 \%$$

Tabla 20. Resultados del ensayo de peso de la grava 3/4".

Muestra				
---------	--	--	--	--

N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,57	2,60	2,63	0,90
2	2,53	2,57	2,64	1,67
3	2,49	2,52	2,58	1,35
	2,53	2,56	2,62	1,31

Fuente: Elaboración propia.

El mismo procedimiento de cálculo se realiza para la gravilla de 3/4”.

Tabla 21. Datos del ensayo se realiza para la gravilla de 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	4868,80	5004,60	2994,60
2	4860,00	5002,90	2988,80
3	4865,50	5003,20	2990,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla 3/4”.

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,42	2,49	2,60	2,79
2	2,41	2,48	2,60	2,94
3	2,42	2,49	2,60	2,83
	2,42	2,49	2,60	2,85

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.7 Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles (ASTM C 131 AASHTO T 96)

Objetivos

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 las superficies, 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 O AASHTO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a abrasión. Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores 37.5 mm (1 1/2") y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4"), 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 93. Tamizando la muestra por los tamices 3/4", 1/2" y 3/8"



Fuente: Elaboración propia.

Figura 94. Vaciando en una bandeja la muestra hasta obtener un peso retenido de 2500 gr.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 95. En una bandeja 2500 gr de peso retenido del tamiz 1/2" y en la otra de 3/8".

Fuente: Elaboración propia.

Figura 96. Máquina de los ángeles donde introducimos las muestras de las 2 bandejas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 97. Una vez terminado las 500 revoluciones, hacemos girar la máquina para que salga la muestra desgastada.

Fuente: Elaboración propia

Figura 98. Muestra en la bandeja de la máquina de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia.

Tamizado 99. Tamizando la muestra en el tamiz N°12.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 100. Lavando la muestra para luego meter al horno.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 23. Tabla de los agregados gruesos y el N° de esferas para el desgaste de los ángeles.

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/8".

Pasado	Retenido	Cantidad tomada (gr)
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7)		3806,90
Tipo de gradación "B"		
Diferencia		1193,10
Número de ensayos realizados		1
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm 500 Revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos

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

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1193,10\text{gr}}{5000} * 100$$

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

Tabla 25. Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/4”.

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

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo

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

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

$$\% \text{ de desgaste} = 21,58 \%$$

3.6.1.8 Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas (ASTM D791)

Objetivo

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados. Los aparatos y procedimientos 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 de Carreteras.

Resultados

Tabla 26. Datos del ensayo partículas laminares.

Material	Peso total de la muestra	Peso retenido de partículas laminares
3/4" (grava)	1000 gr	35,80 gr
3/4" (gravilla)	1000 gr	60,50 gr

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo

$$\% \text{ total de partículas laminares} = \frac{\text{Peso retenido partículas laminares}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ total de partículas laminares} = \frac{35,80}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ total de partículas laminares} = \mathbf{3,58\%}$$

Tabla 27. Resultados del ensayo.

Material	% Total de partículas laminares
3/4"	3,58%
3/4"	6,05%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Datos del ensayo chatas alargadas.

Material	Peso total de la muestra	Peso retenido de partículas laminares
3/4"	1000 gr	43,80 gr
3/4"	1000 gr	20,70 gr

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo

$$\% \text{ T. d. P Chatas y alargadas} = \frac{\text{Peso retenido partículas chatas y alargadas}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ T. d. P Chatas y alargadas} = \frac{43,80}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ T. d. P Chatas y alargadas} = \mathbf{4,38\%}$$

Tabla 29. Resultados del ensayo chatas y alargadas.

Material	% Total de partículas laminares
3/4"	4,38%
3/4"	2,07%

Fuente: Elaboración propia.

3.7 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

3.7.1 Ensayo de viscosidad saybolt-furol (ASTM D 244 AASHTO T-72)

Objetivo

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60ml 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 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 toar 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 (ABC).

Procedimiento

Figura 101. Equipo de viscosidad saybolt-furol.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 102. Controlando con el termómetro que la temperatura llegue a 50°C.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 103. Los corchos puestos en el tubo de viscosidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 104. Poniendo los 2 frascos recibidor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 105. La emulsión en el tubo de viscosidad.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 106. Se retiró el tapón de corcho y se controla el tiempo hasta que llegue a la marca de aforo.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 30. Datos del ensayo de viscosidad de la emulsión convencional.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Viscosidad-saybolt-furol a 50°C	Seg.	119	116	116
Número de ensayos realizados		3		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados:

Resultados: **117 segundos**

3.7.2 Método de residuo por destilación (ASTM D 6997 AASHTO T 59-97)

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 107. Obtención del peso del destilador de aleación de aluminio.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 108. Vaciando 200 gr de emulsión en el destilador de aleación de aluminio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 109. Armando el equipo para el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 110. Encendido del fuego en el destilador.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 111. Proceso de destilación.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 31. Resultados del ensayo de destilación de la emulsión asfáltica convencional.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Residuo de destilación	%	68	67,5	70	68,5

Fuente: Elaboración propia.

3.8 ENSAYOS AL RESIDUO DE DESTILACIÓN

3.8.1 Ensayo de penetración (ASTM D5 AASHTO T 49-97)

Objetivo

La penetración se define como la distancia, expresada en decimas 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 segundos 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 coloca en el baño María por una hora a 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 decimas 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 (ABC).

Procedimiento

Figura 112. Equipo de penetración.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 113. Muestras del residuo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 114. Baño de agua a 25°C.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 115. Proceso de penetración.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 32. 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	64	68,0	68,0
	Lectura N°2	mm	63	66,0	65,0
	Lectura N°3	mm	61	64,0	63,0
Promedio		mm	62,7	66,0	65,3
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 65 mm a 25°C, 100 gr. 5 seg.

3.8.2 Ensayo de ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T 51-00)

Objetivo

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm, a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y a una velocidad de $5\text{cm}/\text{min} \pm 5\%$. Para otras temperaturas debería especificarse la velocidad.

Procedimiento

Figura 116. Llenar de agua el equipo del ductilemetro a una temperatura de 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Figura 117. Armar los moldes y colocar glicerina con maicena.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 118. Colocar el residuo de la emulsión en los moldes dejando por 30 minutos secando.

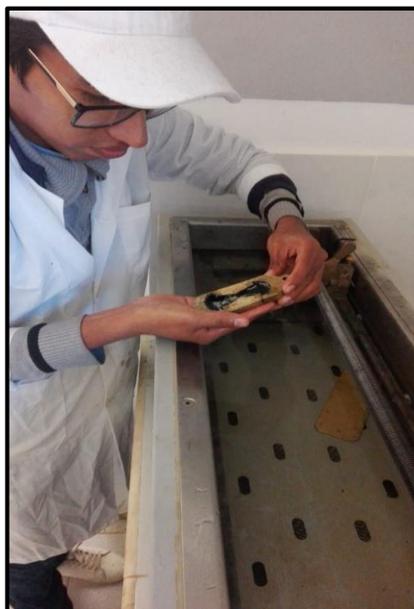


Fuente: Elaboración propia.

Figura 119. Enrasar y posteriormente dejarlo en el agua por 30 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 120. Colocando los moldes en el ductilímetro después de los 30 min en agua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 121. Encender el equipo y ver cuánto es la marcación en la regla cuando caiga al estirarse el residuo de emulsión.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Datos del ensayo de ductilidad del residuo de la emulsión asfáltica.

Descripción	Molde 1 (cm)	Molde 2 (cm)	Molde 3 (cm)
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	118	112	115
Promedio (cm)	115		
N° de ensayos	3		

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3 Ensayo para determinar la densidad real o peso específico del residuo de la emulsión o ligante asfáltico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)

Objetivo

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos en este caso del residuo de la emulsión, mediante el uso del picnómetro o vaso precipitado a la temperatura requerida de 25°C.

Procedimiento

Figura 122. Limpieza de los vasos precipitados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 123. Determinar la masa de los vasos precipitados limpio y seco.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 124. Sumergir el picnómetro con agua destilada en agua por 30 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 125. Retire el vaso precipitado y luego proceder a secarlo y pesarlo.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 126. Se debe llenar el vaso precipitado del ligante asfáltico previamente calentado y dejarlo por 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 127. Luego se procede agregar el agua destilada hasta los 50 ml y se deja por 30 minutos en agua y luego procedemos a pesarlo.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 34. Datos del ensayo de peso específico o densidad relativa del residuo de la emulsión asfáltica convencional.

Cemento asfáltico residual de la emulsión							
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr	36,85	33,80	35,02			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	60,33	57,95	59,55			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	56,58	52,01	55,55			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	60,45	58,15	59,70			
Peso Específico	gr/cm ³	1,003	1,008	1,004	1,005	1,000	1,050

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos

Realizando el cálculo de la media de los ensayos

Resultado: 1,005 gr/cm³

Resultado 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 desecho de PVC y Poliestireno tienen las siguientes propiedades:

Tabla 35. Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados.

Ensayo	Agregados	Resultados
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	Grava 3/4"	23,86%
	Gravilla 3/4"	21,58%
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	2,53gr/cm ³
	Gravilla 3/4"	2,42gr/cm ³
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	2,31gr/cm ³
Peso unitario	Grava 3/4"	1,48gr/cm ³
	Gravilla 3/4"	1,42gr/cm ³
	Arena	1,66gr/cm ³
Equivalente de arena	Arena	95.41%
Porcentaje de agregados chatas ya alargadas	Grava 3/4"	4,38%

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 36. Resultados de los ensayos de caracterización de la emulsión convencional.

Ensayo	Resultado
Residuo por destilación	68,50%
Ductilidad	115cm
Penetración	65mm
Viscosidad saybolt-furol	117seg
Peso específico o densidad relativa	1,005gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

3.9 DOSIFICACIÓN

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 utilizo es la del instituto del asfalto, 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 3/4" y 50% de agregado fino para la granulometría de la mezcla.

Figura 128. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas.

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in (50 mm)	1 ½ in (37,5 mm)	1 in (25,0 mm)	¾ in (19,0 mm)	½ in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)	No. 16 (1,18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 ½ in. (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (50mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 ½ in. (37,5mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
1 in. (25,0 mm)	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
¾ in. (19,0mm)	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
½ in. (12,5mm)	35 - 65	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
3/8 in. (9,5mm)	...	...	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...
No. 4 (4,75mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	...	100
No. 8 (2,36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	95 - 100
No. 16 (1,18mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	85 - 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	70 - 95
No. 50 (300 µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	45 - 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	20 - 40
No. 200 (75 µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Fuente: Instituto del asfalto.

Las especificaciones de granulometría de agregado se adaptaron al tipo de gradación que se puede observar en la figura el cual nos muestra que nuestra mezcla pertenece a una mezcla cerrada.

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, la selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

Tabla 37. Contenido de agregados en granulometría formada.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0,30	al 0,20	al 0,50
		1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	1229,53	437,85	0,00	368,86	87,57	0,00
1/2"	12,5	1690,25	1988,75	0,00	507,08	397,75	0,00
3/8"	9,50	1508,00	1902,65	0,00	452,40	380,53	0,00
Nº4	4,75	555,35	641,55	157,50	166,61	128,31	78,75
Nº8	2,36	5,20	20,10	691,50	1,56	4,02	345,75
Nº16	1,18	1,10	3,80	662,00	0,33	0,76	331,00
Nº30	0,60	0,80	0,25	860,50	0,24	0,05	430,25
Nº50	0,30	0,50	0,19	1151,00	0,15	0,04	575,50
Nº100	0,15	1,40	0,16	1012,55	0,42	0,03	506,28
Nº200	0,075	2,00	1,00	235,40	0,60	0,20	117,70
BASE	-	3,40	1,20	228,50	1,02	0,24	114,25
Suma		4997,5	4997,5	4999,0	1499,26	999,50	2499,48
Pérdidas		2,5	2,5	1,1			

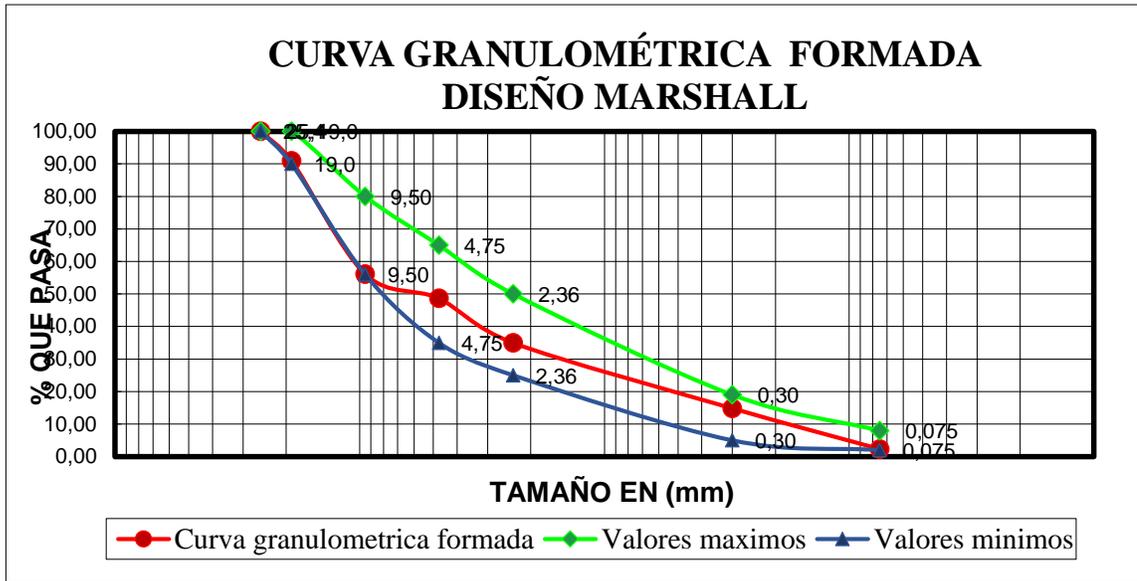
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Granulometría formada.

TOTAL				Especificaciones del INSTITUTO DEL ASFALTO	
Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1,00					
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
456,43	456,43	9,13	90,87	90	100
904,83	1361,25	27,23	72,77	-	-
832,93	2194,18	43,90	56,10	56	80
373,67	2567,85	51,38	48,62	35	65
351,33	2919,18	58,40	41,60	-	-
332,09	3251,27	65,05	34,95	23	49
430,54	3681,81	73,66	26,34	-	-
575,69	4257,50	85,18	14,82	5	19
506,73	4764,22	95,32	4,68	-	-
118,50	4882,72	97,69	2,31	2	8
115,51	4998,23	100,00	0,00	-	-
4998,2					

Fuente: elaboración propia.

Grafico 5. Curva de la granulometría formada.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se observa en la tabla y el grafico de la granulometría formada de la combinación realizada, vemos que la combinación establecida de 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/4" y 50% de agregado fino cumplen con las especificaciones del manual de la Administradora de Carreteras (ABC), por lo que se da por aceptado los factores de combinación.

3.9.1 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 del contenido óptimo debía estar cercano al valor propuesto por el manual básico de emulsiones asfálticas. A continuación, se muestra la determinación del contenido óptimo de emulsión para mezcla asfáltica templada.

Figura 129. 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, (l/m ³)	75	105	-
Emulsão RL-1C, (l/m ³)	-	-	140

Fuente: Manual básico de emulsiones asfálticas.

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 3 briquetas por punto de emulsión.. Se realizó 6 grupos de briquetas en total para encontrar el contenido óptimo de emulsión y se pudo encontrar que el contenido óptimo de emulsión está al 10% de emulsión equivalente a 100 Lt/m³ y comparando con el manual básico de emulsiones asfálticas se pudo evidenciar que se asemeja al valor de 105 Lt/m³ trabajando con agregados de la chancadora Garzón ese porcentaje equivale a 120 ml de emulsión para luego con ese porcentaje trabajar para encontrar el porcentaje óptimo de polímero que será añadido en una briqueta de 1200 gr, en la tabla siguiente se muestran los resultados.

Tabla 39. Resultados de contenidos de emulsión.

		CANTIDAD DE EMULSIÓN EN LA MEZCLA						
Para 1 m ³	Vol.	Lt	66	80	90	110	120	140
Para 1 Briqueta de 1200 gr	Vol.	ml	78,83	96,35	113,87	131,39	148,91	166,42
	Peso	gr	78,83	96,35	113,87	131,39	148,91	166,42

Fuente: Elaboración propia.

3.9.2 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 briqueta 1200 g.

Tabla de Resultados:

Tabla 40. Contenidos de agregados y emulsión convencional.

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	4,5%	5,5%	6,5%	7,5%	8,5%	9,5%
Porcentaje de emulsión (%)	6,6%	8,0%	9%	11%	12%	14%
Porcentaje de agregado (%)	93,4%	92,0%	91%	89%	88%	86%
Peso de la emulsión (gr)	78,83	96,35	113,87	131,39	148,91	166,42
Peso de grava (gr)	336,35	331,09	325,84	320,58	315,33	310,07
Peso de gravilla (gr)	224,23	220,73	217,23	213,72	210,22	206,72
Peso de arena (gr)	560,58	551,82	543,07	534,31	525,55	516,79
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

3.10 PROCEDIMIENTO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL

Método Marshall modificado aplicado a mezclas con emulsiones asfálticas

El propósito de esta investigación es el de adaptar el método Marshall utilizado en la zona para mezclas asfálticas en caliente por la denominada metodología Marshall modificado por la universidad de Illinois de EE.UU. aplicado a mezclas asfálticas con emulsiones de granulometría cerrada o densa.

El método trata de desarrollar sus procedimientos de diseño con algún grado de normalización, donde se toma en consideración los parámetros y procedimientos, su disponibilidad de equipos y diferente uso del tipo de emulsiones y agregados del método normal de Marshall para mezclas en caliente adecuada a temperatura en templado, con la diferencia de las temperaturas en el preparado del agregado donde serán calentados a los 120°C donde la emulsión será calentada a una temperatura de 60°C por unos 5 minutos en el horno para luego extraerlo del horno y proceder a mezclarlo con los agregados teniendo una temperatura de mezclado entre los 115°C a 120°C para luego empezar a compactarlo en un molde a esa misma temperatura de mezclado.

Posteriormente se dejará enfriar aproximadamente unos 10 a 15 minutos para luego posteriormente desmoldar las briquetas y dejarlo secar a temperatura ambiente.

Contenido de emulsión

Nos indica que para comenzar a hallar el contenido de emulsión debe estar en función del porcentaje de residuo asfáltico que tiene la emulsión haciendo variar cada 1% cuyo valor nos dará un porcentaje de emulsión porque al final cuando mezclamos con nuestros agregados el agua que tiene la emulsión se evapora y solo queda el residuo asfáltico el agua lo que hace es empezar a ocupar los espacios vacíos para luego hacer que la mezcla quede totalmente homogénea quedando así el residuo asfáltico en nuestra mezcla asfáltica teniendo en cuenta que no se debe dejar por mucho tiempo la emulsión en el horno debido a que pierde sus propiedades físicas que tiene la emulsión y si cumplimos con este procedimiento nos permitirá tener un mezclado adecuado a las condiciones de nuestro medio permitiendo trabajar con una mezcla asfáltica en templado y debemos tomar en cuenta tres condiciones para hallar el contenido óptimo de emulsión que estará en función del porcentaje de vacíos estabilidad y fluencia

Tabla 41. Resumen de la planilla Marshall convencional.

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACÍOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
6,6	2,19	7,87	17,70	55,52	2.835,54	10,89
8,0	2,23	4,97	17,18	71,09	3.235,38	11,15
9,0	2,25	2,76	17,32	84,08	3.486,42	11,42
11,0	2,26	1,17	18,01	93,49	3.534,61	12,20
12,0	2,24	0,70	19,62	96,45	3.413,16	12,99
14,0	2,19	1,59	22,26	92,88	2.656,11	13,91
X	11,01	6,60	9,50	9,50	10,98	9,50
Y máx	2,2602	7,8589	17,03	88,42	3.541,3570	11,67

Fuente: Elaboración propia.

Una vez encontrado el contenido óptimo de emulsión se procedió a trabajar con ese contenido óptimo del 10% de emulsión equivalente a 120ml, se procedió a hallar el contenido de polímero óptimo trabajándolos ambos al mismo tiempo en el mezclado por vía húmeda donde se trabajó desde el 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10% de polímero.

Tabla 42. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 1% PVC y PS.

	1% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	1% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	0,6	
Poliestireno PS (gr)	0,6	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	118,80	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 2% PVC y PS.

	2% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	2% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	1,2	
Poliestireno PS (gr)	1,2	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	117,60	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 3% PVC y PS.

	3% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	3% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	1,8	
Poliestireno PS (gr)	1,8	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	116,40	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 4% PVC y PS.

	4% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	4% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	2,4	
Poliestireno PS (gr)	2,4	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	115,20	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 5% PVC y PS.

	5% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	5% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	3	
Poliestireno PS (gr)	3	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	114	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 6% PVC y PS.

	6% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	6% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	3,6	
Poliestireno PS (gr)	3,6	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	112,80	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 7% PVC y PS.

	7% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	7% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	4,2	
Poliestireno PS (gr)	4,2	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	111,60	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 8% PVC y PS.

	8% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	8% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	4,8	
Poliestireno PS (gr)	4,8	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	110,4	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 9% PVC y PS

	9% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	9% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	5,4	
Poliestireno PS (gr)	5,4	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	109,20	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51. Contenidos de agregados y emulsión adicionando el 10% PVC y PS.

	10% de Polímero	
Porcentaje de emulsión	10,00%	120 ml
Porcentaje de agregados	90,00%	
Policloruro de Vinilo PVC	10% de la emulsión	
Poliestireno PS		
Policloruro de Vinilo PVC (gr)	6	
Poliestireno PS (gr)	6	
Peso de arena (gr)	540	
Peso de grava (gr)	324	
Peso de gravilla (gr)	216	
Emulsión (gr)	108	
Peso total de la briqueta	1200	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52. Resumen de la planilla Marshall con polímeros.

CONTENIDO DE POLÍMERO PVC Y PS (%)	CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (%)	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACÍOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
1,00	9,90	2,20	4,64	19,48	76,16	3771,23	12,60
2,00	9,80	2,21	4,24	19,01	77,68	3809,51	13,12
3,00	9,70	2,22	3,87	18,55	79,16	3862,48	13,25
4,00	9,60	2,23	3,53	18,13	80,53	3908,18	13,78
5,00	9,50	2,24	3,09	17,62	82,45	3929,02	14,70
6,00	9,40	2,25	2,90	17,32	83,25	3910,31	15,22
7,00	9,30	2,26	2,69	17,00	84,17	3887,07	15,88
8,00	9,20	2,26	2,54	16,73	84,80	3818,05	16,40
9,00	9,10	2,27	2,48	16,53	85,03	3745,15	17,19
10,00	9,00	2,26	2,65	16,54	84,01	3656,86	18,50
Cálculos en función a la ecuación	X	9,00	1,00	1,00	9,00	5,00	10,00
	Y _{máx}	2,2656	4,7150	19,54	84,63	3.918,3500	18,29

Fuente: Elaboración propia.

Se pudo hallar el contenido óptimo de polímero al 6% trabajando por vía húmeda que consiste en mezclar la emulsión con los polímeros al mismo tiempo creando una emulsión polimérica a una temperatura de 60°C para luego proceder a mezclarlos con los agregados.

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.

Preparación de las muestras de mezcla

Equipo y materiales utilizados:

- ✓ Balanza A±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 asfaltos de la U.A.J.M.S, en donde se realizarán seis puntos de contenidos de emulsión que variarán en un valor de 1% en función del residuo para cada punto y ello nos dará la cantidad de emulsión necesaria, para ello se ha tomado de base el contenido óptimo de emulsión obtenido del manual básico de emulsiones asfálticas para tener una base de cuanto debería salir nuestro valor de contenido óptimo.

Primeramente, se realizó el pesaje de las cantidades de grava, gravilla 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 130. 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 131. Pesando la cantidad de emulsión.

Fuente: Elaboración propia.

Mientras se 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 y junto a ello se introduce los polímeros junto con la emulsión, 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

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

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

Figura 132. Realizando el colocado a las briquetas.



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.

3.10.1 Resumen de los datos obtenidos en el ensayo Marshall

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las 18 briquetas con los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica, para la determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en la presente investigación como también del contenido óptimo de polímero.

Tabla 53. Lectura de los datos del ensayo Marshall para la obtención del contenido óptimo de emulsión asfáltica.

N° Briqueta	Alturas				Diámetros		Peso			Lectura del dial	
	H1	H2	H3	H4	D1	D2	Seco	SSS	Sumergido	Estabilidad	Fluencia
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	gr	gr	gr	pulg.	mm
1	6,31	6,33	6,29	6,29	10,15	10,12	1136,90	1153,50	634,50	932	260
2	6,31	6,31	6,29	6,28	10,11	10,12	1138,60	1174,40	648,60	1077	280
3	6,31	6,29	6,33	6,31	10,03	10,11	1133,40	1160,60	651,60	1132	290
4	6,29	6,25	6,26	6,32	10,13	10,11	1131,40	1144,70	641,30	1183	280
5	6,30	6,30	6,25	6,24	10,04	10,13	1134,50	1155,50	643,50	1174	290
6	6,24	6,27	6,26	6,23	10,13	10,14	1132,30	1149,80	642,30	1189	280
7	6,18	6,20	6,21	6,18	10,15	10,14	1128,00	1138,00	636,50	1259	300
8	6,23	6,22	6,24	6,23	10,14	10,11	1129,00	1134,10	631,40	1247	280
9	6,23	6,22	6,18	6,15	10,15	10,13	1129,90	1132,50	632,40	1255	290
10	6,24	6,23	6,23	6,23	10,11	10,12	1123,90	1135,80	636,80	1263	300
11	6,25	6,24	6,25	6,26	10,12	10,12	1122,60	1131,20	635,40	1291	310
12	6,27	6,22	6,27	6,20	10,10	10,10	1121,20	1130,90	633,40	1292	320
13	6,24	6,27	6,25	6,25	10,11	10,13	1124,30	1129,80	625,60	1257	320
14	6,25	6,24	6,27	6,20	10,13	10,01	1125,80	1126,80	624,60	1255	330
15	6,27	6,30	6,25	6,24	10,11	10,12	1124,80	1125,10	622,70	1253	340
16	6,27	6,23	6,30	6,29	10,14	10,13	1123,50	1127,30	612,30	1010	350
17	6,30	6,31	6,27	6,24	10,11	10,19	1122,80	1129,80	615,60	985	340
18	6,33	6,32	6,25	6,24	10,14	10,12	1112,40	1120,30	613,80	930	370

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54. Lectura de los datos del ensayo Marshall para la obtención del contenido óptimo de polímero.

N°	Alturas				Diámetros		Peso			Lectura del dial		
	Briqueta	H1	H2	H3	H4	D1	D2	Seco	SSS	Sumergido	Estabilidad	Fluencia
		cm	cm	cm	cm	cm	cm	gr	gr	gr	pulg.	mm
1	6,24	6,27	6,20	6,22	10,13	10,12	1125,60	1134,00	621,50	1325	310	
2	6,19	6,23	6,26	6,24	10,12	10,14	1139,65	1141,60	623,60	1415	320	
3	6,20	6,21	6,22	6,20	10,07	10,13	1129,60	1138,60	625,40	1345	330	
4	6,23	6,22	6,20	6,25	10,11	10,12	1136,20	1143,60	629,40	1282	330	
5	6,27	6,24	6,20	6,25	10,10	10,13	1132,50	1143,60	631,50	1405	330	
6	6,24	6,24	6,21	6,21	10,14	10,13	1134,20	1143,60	630,50	1450	340	
7	6,27	6,19	6,24	6,27	10,09	10,12	1135,60	1148,60	632,60	1415	330	
8	6,28	6,24	6,25	6,26	10,13	10,13	1142,30	1146,20	634,60	1390	340	
9	6,19	6,25	6,25	6,19	10,12	10,10	1130,20	1138,10	631,40	1385	340	
10	6,21	6,23	6,21	6,20	10,15	10,12	1143,60	1149,00	635,70	1380	350	
11	6,21	6,22	6,27	6,26	10,13	10,14	1141,00	1148,80	638,60	1415	360	
12	6,27	6,22	6,20	6,26	10,15	10,12	1137,20	1145,00	634,90	1435	340	
13	6,29	6,22	6,25	6,21	10,12	10,13	1139,50	1145,60	638,30	1410	360	
14	6,21	6,24	6,27	6,21	10,12	10,11	1148,80	1154,90	636,70	1355	370	
15	6,29	6,25	6,24	6,28	10,04	10,12	1126,20	1132,60	635,90	1517	390	
16	6,22	6,23	6,23	6,25	10,13	10,08	1128,00	1131,60	637,30	1471	390	
17	6,27	6,29	6,21	6,20	10,12	10,10	1137,20	1141,30	634,90	1365	380	
18	6,23	6,23	6,22	6,22	10,12	10,12	1145,50	1148,80	633,40	1425	390	
19	6,28	6,23	6,24	6,24	10,14	10,02	1137,60	1141,90	640,30	1384	380	
20	6,29	6,22	6,26	6,24	10,08	10,12	1132,10	1139,60	638,50	1478	410	
21	6,28	6,21	6,29	6,28	10,12	10,09	1142,50	1147,00	637,90	1383	420	
22	6,24	6,23	6,28	6,28	10,12	10,08	1150,00	1158,60	644,60	1368	430	
23	6,27	6,30	6,30	6,25	10,01	10,10	1127,30	1136,00	645,30	1395	420	
24	6,28	6,27	6,24	6,23	10,07	10,15	1139,10	1150,20	644,70	1418	400	
25	6,29	6,28	6,30	6,30	10,13	10,14	1150,60	1160,30	647,50	1385	400	
26	6,24	6,34	6,29	6,29	10,08	10,12	1158,30	1169,20	652,30	1397	460	
27	6,28	6,30	6,30	6,27	10,10	10,14	1142,30	1151,80	658,30	1345	450	
28	6,28	6,30	6,30	6,32	10,05	10,14	1149,60	1160,00	654,20	1355	450	
29	6,32	6,32	6,29	6,28	10,13	10,09	1153,60	1166,30	653,40	1305	490	
30	6,31	6,31	6,27	6,27	10,08	10,11	1146,00	1159,20	654,80	1378	470	

Fuente: Elaboración propia.

3.10.2 Cálculos y resultados de las muestras

Identificación

Las briquetas 1, 2 y 3 serán las que analizaremos para la demostración.

Altura de la briketa

Tabla 55. Altura de la briketa.

Identificación de briketa	H1 cm	H1 cm	H1 cm	H1 cm	Altura promedio cm
1	6,31	6,33	6,29	6,29	6,31
2	6,31	6,31	6,29	6,28	6,30
3	6,31	6,29	6,33	6,31	6,31

Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de emulsión

Base de la mezcla: Se toma el valor del porcentaje de asfalto residual para elaborar las 3 briketas.

$$\% \text{ de emulsión} = \frac{\% \text{ del asfalto residual} * 100}{\text{Peso específico del ligante o densidad relativa}}$$

$$\% \text{ de emulsión} = \frac{4,5\% * 100}{68,5}$$

$$\% \text{ de emulsión} = 6,6\%$$

Peso de la briketa al aire

Tabla 56. Peso de la briketa.

Identificación de briketa	Peso de la briketa al aire (gr)
1	1136,90
2	1138,60
3	1133,40

Fuente: Elaboración propia.

Peso de la briketa en el aire saturada superficialmente seco (SSS)

El peso de la briketa SSS se lo mide saturando la briketa en el agua durante 30 minutos a 25°C y secándola superficialmente.

Tabla 57. Peso de la briqueta saturada superficialmente seco.

Identificación de briqueta	Peso de la briqueta SSS (gr)
1	1153,50
2	1174,40
3	1160,60

Fuente: Elaboración propia.

Peso de la briqueta sumergida en agua

El peso sumergido se lo mide cuando se sumerge la briqueta en el agua a 25°C por 30 minutos.

Tabla 58. Peso de la briqueta sumergido.

Identificación de briqueta	Peso de la briqueta sumergido (gr)
1	634,50
2	648,60
3	651,60

Fuente: Elaboración propia.

Volumen de la briqueta

Cálculo realizado para la briqueta identificada como “1”

$$\text{Vol. briqueta} = \text{Peso S. S. S.} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Vol. briqueta} = 1153,5 - 634,5$$

$$\text{Vol. briqueta} = 519 \text{ cm}^3$$

Densidad de la briqueta

➤ Densidad real

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en el aire}}{\text{Volumen de la briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1136,90}{519}$$

$$\text{Densidad real} = 2,19 \text{ Kg/cm}^3$$

➤ Densidad máxima teórica de la briqueta

$$D_{\text{maxTeorica}} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{asfalto res.}}{\text{Peso esp. asf. res.}}\right) + \left(\frac{100 - \% \text{asf.}}{\text{Peso esp. agr. grueso}}\right)}$$

$$D_{\text{maxTeorica}} = \frac{100}{\left(\frac{4,5}{1,005}\right) + \left(\frac{100 - 4,5}{2,55}\right)}$$

$$D_{\text{maxTeorica}} = 2,38 \text{ Kg/cm}^3$$

Porcentaje de vacíos

➤ **Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)**

$$Vv = \left(\frac{D_{max. Teo.} - Dens. prom.}{D_{max. Teo.}} \right) * 100$$

$$Vv = \left(\frac{2,38 - 2,19}{2,38} \right) * 100$$

$$Vv = 7,87\%$$

➤ **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)**

$$VAM = \left(\frac{\% de asf * Dens. prom.}{Peso esp. del asf.} \right) + Vv$$

$$VAM = \left(\frac{4,5 * 2,19}{1,005} \right) + 7,87\%$$

$$VAM = 17,70\%$$

➤ **Porcentaje de vacíos llenos de asfalto residual (RBV)**

$$RVM = \left(\frac{VAM - Vv}{VAM} \right) * 100$$

$$RVM = \left(\frac{17,70 - 7,87}{17,70} \right) * 100$$

$$RVM = 55,52\%$$

Estabilidad y fluencia

Tabla 59. Lectura del dial, obtenidas del ensayo Marshall.

Identificación de briqueta	Lectura del dial	
	Estabilidad	Fluencia
	mm	
1	932,00	260,00
2	1077,00	280,00
3	1132,00	290,00

Fuente: Elaboración propia.

Corrección por calibración del equipo Marshall

$$Carga = (0,012x - 0,0812) * 102 * 2,2$$

Remplazando el valor número 1 en la ecuación anterior, se tiene

$$Carga = (0,012 * 932 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$Carga = 2491,47$$

Corrección por altura de briqueta número 1

Tabla 60. Factores de corrección.

Identificación de briqueta	Altura promedio (cm)	Factor de corrección por altura
1	6,31	1,01
2	6,30	1,01
3	6,31	1,01

Fuente: Elaboración propia.

Corrección por calibración de Marshall, para espécimen número 1

$$\text{Estabilidad corregida} = 2491,47 * 1,01$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 2523,86 \text{ lb}$$

Tabla 61. Valores reales del ensayo Marshall corregido.

Identificación de briqueta	Estabilidad corregida (lb)
1	2523,86
2	2919,39
3	3063,36

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Estabilidad promedio} = 2835,54 \text{ lb}$$

Corrección de fluencia

$$\text{Fluencia corregida} = \frac{\left(\frac{\text{Lectura dial fluencia}}{100}\right)}{(25,4)}$$

$$\text{Fluencia corregida} = \frac{(2,60)}{(25,4)}$$

$$\text{Fluencia corregida} = 0,1024$$

Tabla 62. Fluencia corregida.

Identificación de briqueta	Lectura del dial	
	Fluencia	Fluencia corregida
	-	1/100
1	260,00	0,1024
2	280,00	0,1102
3	290,00	0,1142
Promedio		0,1089

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Fluencia promedio} = 0,1089 * 100$$

$$\text{Fluencia promedio} = 10,89$$

3.10.3 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 133. Midiendo las alturas de las briquetas con un vernier.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 134. Determinando el peso de las briquetas.

Fuente: Elaboración propia.

3.11 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 135. Rotura de briquetas.

Fuente: Elaboración propia.

3.12 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

3.12.1 Evaluación del peso volumétrico

Al igual que el peso volumétrico se hizo seis grupos de briquetas para el contenido de emulsión, haciendo tres briquetas por punto de emulsión, para la identificación de las briquetas de estabilidad se las enumero como: 1, 2, 3, para 78,83 gr; 4, 5, 6, para 96,35 gr; 7, 8, 9, para 113,87 gr; 10, 11, 12, para 131,39 gr; 13, 14, 15, para 148,91 gr y 16, 17, 18, para 166,42 gr.

Y de la misma forma se hizo diez grupos de briquetas y por cada contenido de polímero, haciendo tres briquetas por punto de emulsión donde se trabajó con la emulsión optima de 120 ml donde se le disminuyo el peso del material adiconantes, para la identificación de

las briquetas se las enumero 1, 2, 3, para 1% de polímero; 4, 5, 6, para 2% de polímero; 7, 8, 9 para 3% de polímero; 10, 11, 12, para 4% de polímero; 13, 14, 15, para 5% de polímero; 16, 17, 18, para 6% de polímero; 19, 20, 21, para 7% de polímero; 22, 23, 24, para 8% de polímero; 25, 26, 27, para 9% de polímero y 28, 29, 30, para 10% de polímero. 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.

Se midieron las alturas de cada biqueta en cuatro puntos, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, para un contenido de 120 ml de Emulsión Convencional sus alturas correspondientes son las siguientes:

Altura de las briquetas

Se midieron las alturas de cada biqueta en cuatro puntos, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, para un contenido de 78,83 ml de emulsión convencional sus alturas correspondientes son las siguientes:

Tabla 63. Datos de alturas medidas de cada biqueta.

Contenido de emulsión	Identificación	Alturas (cm)
78,83 ml	1	6,31
		6,33
		6,29
		6,29
	2	6,31
		6,31
		6,33
		6,31
	3	6,31
		6,29
		6,33
		6,31

Fuente: Elaboración propia.

Calculo

$$hs = \frac{6,31 + 6,33 + 6,29 + 6,29}{4}$$

$$hs = 6,20cm$$

Tabla 64. Resultados de alturas promedios de cada briqueta.

Contenido de emulsión	Identificación	Altura promedio (cm)
78,83 ml	1	6,20
	2	6.14
	3	6,18

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 78,83 ml de emulsión convencional sus diámetros correspondientes son las siguientes:

Tabla 65. Datos de diámetros medidos de cada briqueta.

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetros (cm)
78,83 ml	1	10,15
		10,12
	2	10,11
		10,12
	3	10,03
		10,11

Fuente: Elaboración propia.

Calculo

$$Ds = \frac{10,15 + 10,12}{2}$$

$$Ds = 10,14 \text{ cm}$$

Tabla 66. Resultados de diámetros promedios de cada briqueta.

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetro Promedio (cm)
78,83 ml	1	10,14
	2	10,12
	3	10,07

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 briketa.

Tabla 67. Datos promedios de cada briketa.

Contenido de emulsión	Identificación	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)
78,83 ml	1	10,14	6,31
	2	10,12	6,30
	3	10,07	6,31

Fuente: Elaboración propia.

Peso de las briquetas

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

Tabla 68. Datos de pesos de cada briketa.

Contenido de emulsión	Identificación	Peso (gr)
78,83 ml	1	1136,9
	2	1138,6
	3	1133,4

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 briketa, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 69. Datos de pesos y volúmenes de cada briketa.

Contenido de emulsión	Identificación	Peso (gr)	Volumen (cm ³)
78,83 ml	1	1136,9	519,0
	2	1138,6	525,8
	3	1133,4	509,0

Fuente: Elaboración propia.

Calculo

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

$$\text{Peso volumétrico}_s = \frac{\text{Peso}_s}{\text{Volumen}_s}$$

$$\text{Peso volumétrico} = \frac{1136,9}{519,0}$$

$$\text{Peso volumétrico} = 2,19 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 70. Resultados de peso volumétrico de cada briqueta.

Contenido de emulsión	Identificación	Peso volumétrico ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)
78,83 ml	1	2,19
	2	2,17
	3	2,23

Fuente: Elaboración propia.

Una vez teniendo los resultados de pesos volumétricos de las tres briquetas para un contenido de emulsión de 78,83 ml, se procede a calcular el promedio de esos resultados.

Calculo

$$\text{Peso volumétrico}_{78,83 \text{ ml}} = \frac{\text{PV}_{10} + \text{PV}_{11} + \text{PV}_{12}}{3}$$

$$\text{Peso volumétrico}_{78,83 \text{ ml}} = \frac{2,19 + 2,17 + 2,23}{3}$$

$$\text{Peso volumétrico}_{78,83 \text{ ml}} = 2,194 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 71. Resultado de peso volumétrico para un contenido de 78,83 ml de emulsión convencional.

Contenido de emulsión	Peso volumétrico ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)
78,83 ml	2,194

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 72. Resultados del peso volumétrico de emulsión convencional.

Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso Volumétrico
78,83 ml	6,6	2,194
96,35 ml	8	2,231
113,87 ml	9	2,251
131,39 ml	11	2,257
148,91 ml	12	2,237
166,42 ml	14	2,187

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 73. Resultados del peso volumétrico de mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.

Contenido de polímero	% Polímero	Contenido de emulsión	% Emulsión	Peso volumétrico
1,20 gr	1	120 ml	10	2,199
2,40 gr	2	120 ml	10	2,211
3,60 gr	3	120 ml	10	2,221
4,80 gr	4	120 ml	10	2,231
6,00 gr	5	120 ml	10	2,243
7,20 gr	6	120 ml	10	2,250
8,40 gr	7	120 ml	10	2,257
9,60 gr	8	120 ml	10	2,263
10,80 gr	9	120 ml	10	2,266
12,00 gr	10	120 ml	10	2,265

Fuente: Elaboración propia.

En el peso volumétrico se pudo evidenciar que si hubo un aumento en peso por parte de la adición del PVC y PS lo cual comprobaría que el peso volumétrico aumentaría significativamente.

3.12.2 Evaluación de la estabilidad

Al igual que el peso volumétrico se hizo siete 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: 1, 2, 3, para 78,83 gr; 4, 5, 6, para 96,35 gr; 7, 8, 9, para 113,87 gr; 10, 11, 12, para 131,39 gr; 13, 14, 15, para 148,91 gr y 16, 17, 18, para 166,42 gr.

Y de la misma forma se hizo diez grupos de briquetas para encontrar el contenido óptimo de polímero, haciendo tres briquetas por punto de emulsión donde se trabajó con la emulsión opima de 126 ml donde se le disminuyo el peso del material adiconantes, para la identificación de las briquetas se las enumero 1, 2, 3, para 1% de polímero; 4, 5, 6, para 2% de polímero; 7, 8, 9 para 3% de polímero; 10, 11, 12, para 4% de polímero; 13, 14, 15, para 5% de polímero; 16, 17, 18, para 6% de polímero; 19, 20, 21, para 7% de polímero; 22, 23, 24, para 8% de polímero; 25, 26, 27, para 9% de polímero y 28, 29, 30, para 10% de polímero.

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 74 Resultados de estabilidad de emulsión convencional.

Contenido de emulsión	% Emulsión	Estabilidad (lb)
78,83 ml	6,6	2835,54
96,35 ml	8	3235,38
113,87 ml	9	3486,42
131,39 ml	11	3534,61
148,91 ml	12	3413,16
166,42 ml	14	2656,11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75. Estabilidad de una mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.

Contenido de polímero	% Polímero	Estabilidad (lb)
1,20 gr	1	3771,23
2,40 gr	2	3809,51
3,60 gr	3	3862,48
4,80 gr	4	3908,18
6,00 gr	5	3929,02
7,20 gr	6	3910,31
8,40 gr	7	3887,07
9,60 gr	8	3818,05
10,80 gr	9	3745,15
12,00 gr	10	3656,86

Fuente: Elaboración propia.

3.12.3 Evaluación de la fluencia

Al igual que el peso volumétrico se hizo seis grupos de briquetas para hallar el contenido de emulsión óptimo, haciendo tres briquetas por punto de emulsión, para la identificación de las briquetas de estabilidad se las enumero como: 1, 2, 3, para 78,83 gr; 4, 5, 6, para 96,35 gr; 7, 8, 9, para 113,87 gr; 10, 11, 12, para 131,39 gr; 13, 14, 15, para 148,91 gr y 16, 17, 18, para 166,42 gr.

Y de la misma forma se hizo diez grupos de briquetas para encontrar el contenido óptimo de polímero, haciendo tres briquetas por punto de emulsión donde se trabajó con la emulsión opima de 126 ml donde se le disminuyo el peso del material adiconantes, para la identificación de las briquetas se las enumero 1, 2, 3, para 1% de polímero; 4, 5, 6, para 2% de polímero; 7, 8, 9 para 3% de polímero; 10, 11, 12, para 4% de polímero; 13, 14, 15, para 5% de polímero; 16, 17, 18, para 6% de polímero; 19, 20, 21, para 7% de polímero; 22, 23, 24, para 8% de polímero; 25, 26, 27, para 9% de polímero y 28, 29, 30, para 10% de polímero.

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 76. Resultados de fluencia de emulsión convencional.

Contenido de emulsión	% Emulsión	Fluencia (0,01 plg.)
78,83 ml	6,6	10,89
96,35 ml	8	11,15
113,87 ml	9	11,42
131,39 ml	11	12,20
148,91 ml	12	12,99
166,42 ml	14	13,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77. Fluencia de una mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.

Contenido de polímero	% Polímero	Fluencia (0,01 plg.)
1,20 gr	1	12,60
2,40 gr	2	13,12
3,60 gr	3	13,25
4,80 gr	4	13,78
6,00 gr	5	14,70
7,20 gr	6	15,22
8,40 gr	7	15,88
9,60 gr	8	16,40
10,80 gr	9	17,19
12,00 gr	10	18,5

Fuente: Elaboración propia.

3.13 Análisis de resultados

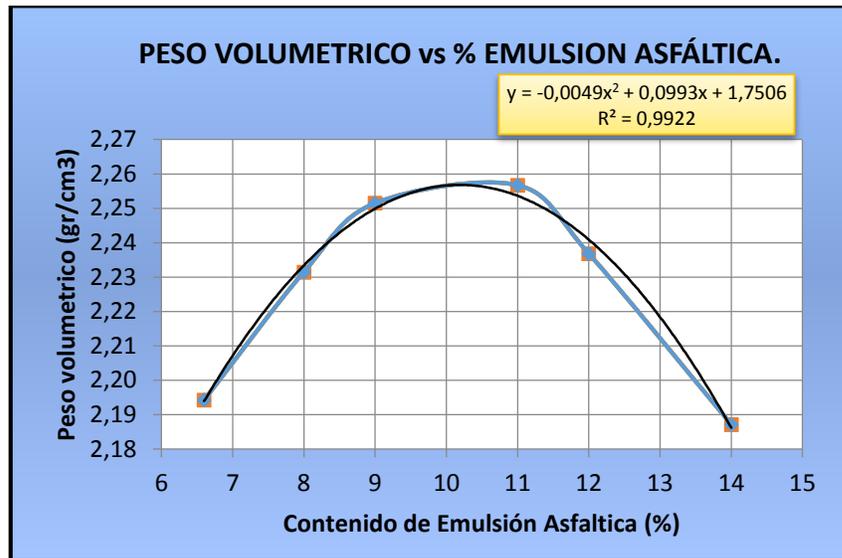
3.13.1 Análisis de resultados de las propiedades mecánicas

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 (MAT) con emulsión y adicionando el PVC y PS.

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.

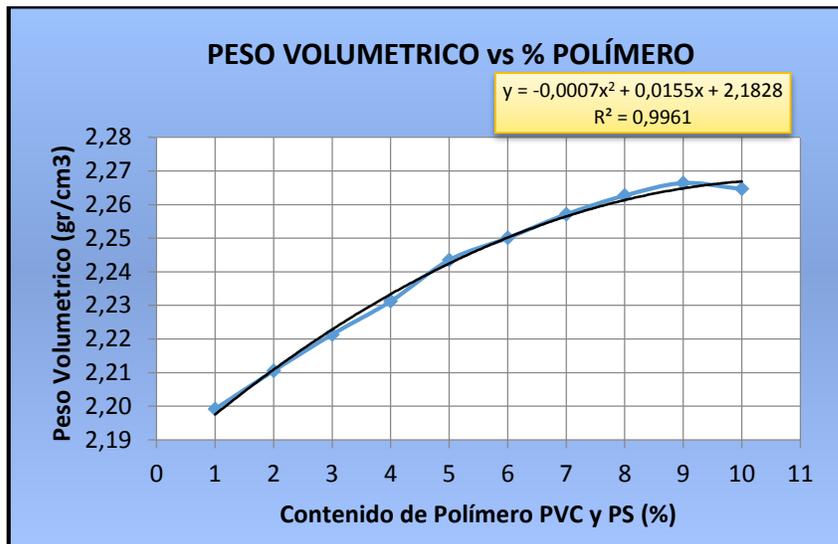
Gráfico 6. Análisis curva peso volumétrico vs. % emulsión convencional.



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 6,6 y 14% donde tienen una variación del peso volumétrico de 2,194 a 2,187 gr/cm³, con una línea de tendencia polinómica el cual nos demuestra que el peso va bajando debido a que la emulsión pierde una cierta cantidad en su mezclado y porque también va perdiendo en el proceso de calentamiento quedando partículas en el recipiente de mezclado.

Gráfico 7. Análisis curva peso volumétrico vs. % mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.



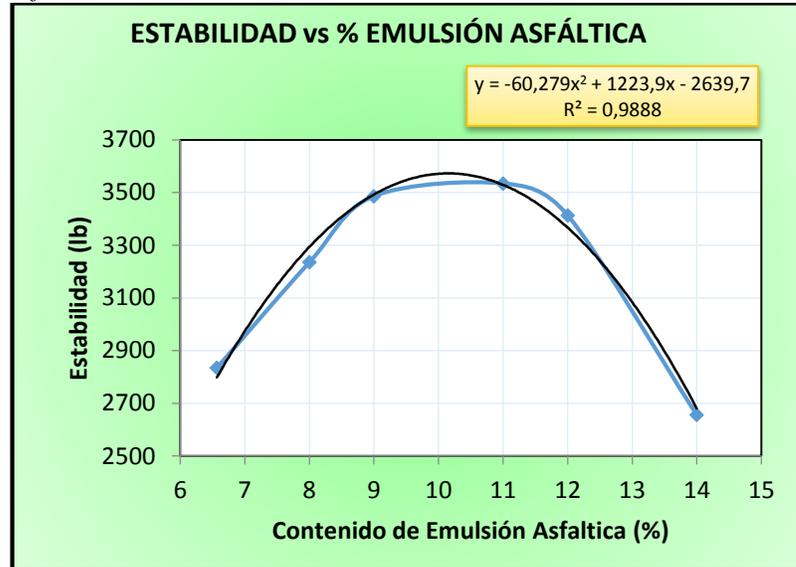
Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del porcentaje de polímero 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 polímero entre 1 y 10 % donde tienen una variación del peso volumétrico de 2,199 a 2,265 gr/cm³, con una línea de tendencia polinómica en donde se puede observar que el peso baja debido a que el polímero al ser un material plastomero tiende a bajar debido a que se añade mayor cantidad de polímero y esto hace que en el proceso de compactado y calentado sea mas liviana que una que contiene menor cantidad de polímero haciendo que baje en el 10% de polímero.

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.

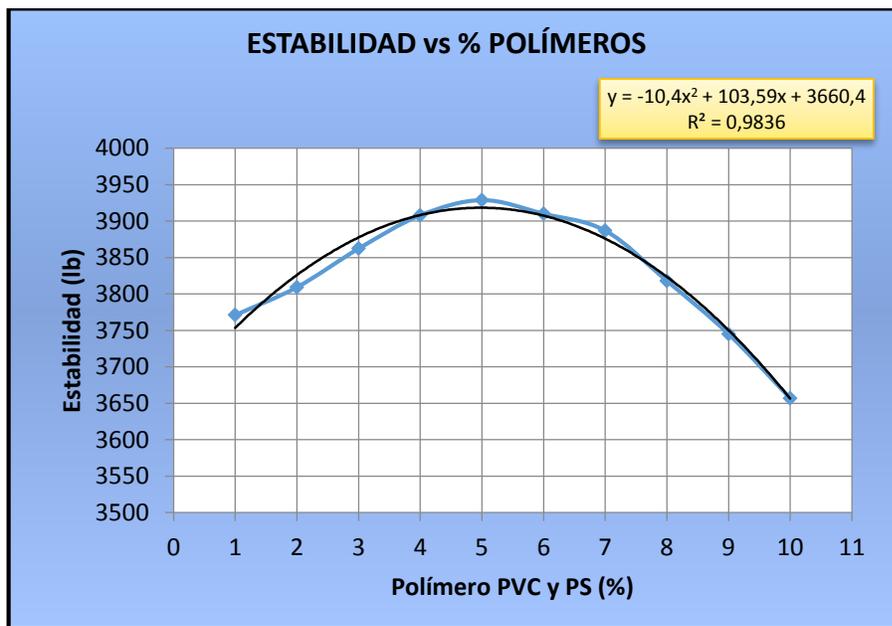
Gráfico 8. Análisis curva estabilidad vs. % emulsión convencional.



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 6,6 y 14 cuyas estabilidades nos marcan desde 2835,54 lb hasta 2656,11 lb, siendo el mayor valor de 3541,357 lb que se obtiene al contenido de emulsión de 10,98% con una línea de tendencia polinómica, en esta grafica además podemos destacar que según investigaciones realizadas la emulsión da mucho mejores valores de estabilidad que un cemento asfáltico quedando comprobado con esta investigación y además porque la temperatura a la que fue preparada esta mezcla fue en templado una nueva innovación que a dado muy buenos resultados en otros países.

Gráfico 9. Análisis curva estabilidad vs. % mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.



Fuente: Elaboración propia.

En esta grafica se puede observar claramente el aumento de la estabilidad dando un valor máximo de 3918,35 lb superior a la de una mezcla convencional y dando como valor mínimo de 3656,86 lb.

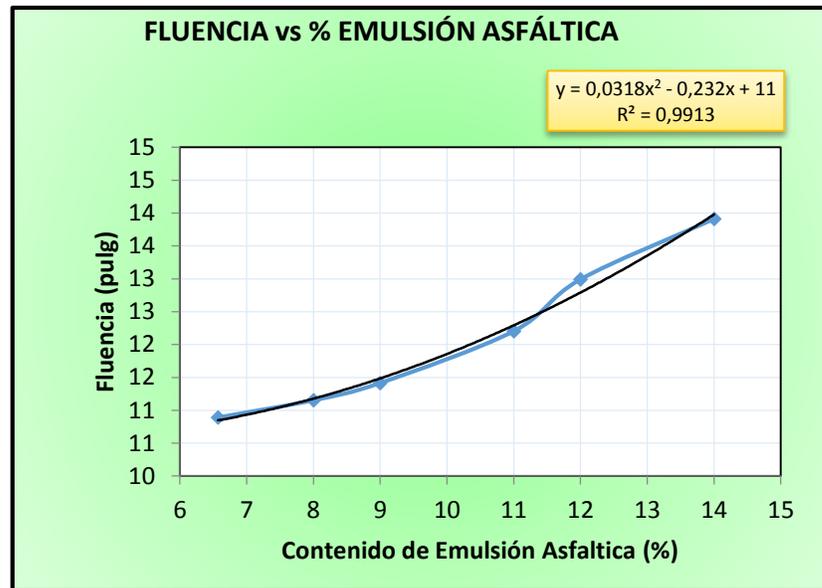
Comparándola con una mezcla convencional se pudo evidenciar que si mejoraron las propiedades mecánicas al adicionar PVC y PS, según investigaciones realizadas en otras universidades se pudo evidenciar que el valor obtenido fue de 3250 lb a 4100 lb dando por hecho de mis valores si lograron estar dentro de ese rango y también se puede evidenciar que al 6% de polímero añadido por vía húmeda en la mezcla será el valor óptimo añadido a la mezcla y nos dará una estabilidad mayor y según esas investigaciones se recomienda hacerlo por vía húmeda porque nos dará mejores valores de estabilidad.

Además, el polímero añadido es un material plástico que al ser un ligante tiende a trabajar mejor con una emulsión asfáltica por tener una buena capacidad de resistir el desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito y por tener una mejor estabilidad que una mezcla convencional.

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 y de cada porcentaje de PVC y PS.

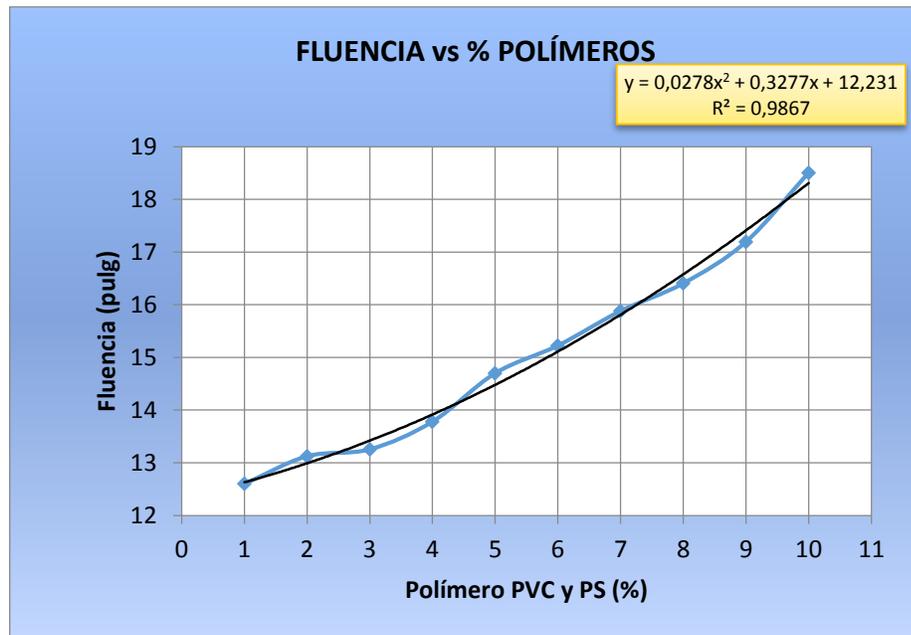
Gráfico 10. Análisis curva fluencia vs. % emulsión convencional.



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 6,6 y 14 donde tienen una variación de la fluencia de 10,89 a 13,91 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor de 13,91 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de emulsión de 9% con una línea de tendencia polinómica, el cual representa la deformación de la briqueta cuya deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de briqueta.

Gráfico 11. Análisis curva fluencia vs. % mezcla asfáltica con emulsión y adición de PVC y PS.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del porcentaje de polímero 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 9,90 y 9,00 donde tienen una variación de la fluencia de 12,60 a 18,50 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor de 18,50 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de emulsión de 9% con una línea de tendencia polinómica, donde se puede constatar que hay un incremento de la fluencia con respecto de la mezcla convencional debido a que el polímero al ser añadido hace que la briqueta tienda a subir su fluencia demostrando que nuestra mezcla tienda a deformarse un poco más que la convencional y demostrado que también mejoro la propiedad mecánica de fluencia significativamente.

Análisis de que ahorra en energía y costo en la producción respecto a mezclas convencionales con respecto de una mezcla templada con emulsión y adición de PVC y PS.

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 78. Producción de mezcla asfáltica en caliente.

Temperaturas de mezclado (T°)	Cantidad de mezcla (Tn/h)	Energía combustible diésel (Lt/h)	Costo del diésel (Bs)
150	90	800	2976

Fuente: Planta de asfalto de la alcaldía municipal de Tarija.

Tabla 79. Producción de mezcla asfáltica templada.

Temperaturas de mezclado (T°)	Cantidad de mezcla (Tn/h)	Energía combustible diésel (Lt/h)	Costo del diésel (Bs)
150	90	650	2418

Fuente: Planta de asfalto de la alcaldía municipal de Tarija.

$$\Delta \text{Energía} = \frac{800 - 650}{800} * 100$$

$$\Delta \text{Energía} = 18,75\%$$

El ahorro de energía debido a las bajas temperaturas de producción de mezclas asfálticas templadas respecto a mezclas asfálticas en caliente es del 18,75 % por hora

$$\Delta \text{Costo} = \frac{2976 - 2418}{2976} * 100$$

$$\Delta \text{Costo} = 18,75\%$$

La reducción en costo para la producción de mezclas asfálticas templadas respecto a mezclas asfálticas en caliente es del 18.75 % por hora

3.13.2 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 80. Clasificación técnica de carreteras.

Categoría	TPD (Tráfico Promedio Diario)
Autopista	> 10000
Autoruta	> 5000
Primario	1500-3000
Colector	> 500
Local	-
Desarrollo	-

Fuente: Manual de la 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 frío, y en nuestro caso el proyecto obedece solo al estudio de la mezcla asfáltica templada.

La utilización de la emulsión con adición de PVC y PS 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 autopistas, 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.

3.13.3 Análisis de definir la ventajas y desventajas

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.
- Poder reciclar y evitar la contaminación del medio ambiente usando estos desechos de PVC y PS como aditivos de una mezcla asfáltica.

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.
- Las menores temperaturas de fabricación pueden generar que el secado del agregado pétreo no sea suficiente produciendo pérdida de adherencia en la mezcla.

Análisis comparativo de la mezcla asfáltica templada con emulsión convencional versus mezcla asfáltica templada con emulsión y adición de PVC y PS en costo

Tabla 81. Precios unitarios de mezcla asfáltica templada con emulsión convencional.

Item: Carpeta de rodadura							Unidad: M3
Nº	A	MATERIALES	Und.	Cant.	Precio Unitario.	Precio Total (Bs)	
1	-	Diesel	lt	18,00	3,72	66,96	
2	-	Arena clasificada	m ³	0,42	145,00	60,90	
3	-	Emulsion convencional	lt	105,00	5,53	580,65	
4	-	Grava triturada	m ³	0,15	152,00	22,80	
5	-	Gravilla triturada	m ³	0,26	162,00	42,12	
>	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	773,43	
	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 equipo	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% de	(E) =	37,07	
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(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	350,00	28,00	
2	-	Cargador frontal de ruedas	hr	0,00	420,70	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 de calentamiento de asfalto	hr	0,09	964,97	86,85	
6	-	Rodillo neumatico TPS 10000	hr	0,08	332,33	26,59	
7	-	Volqueta 12 m ³	hr	0,03	227,85	6,84	
	H	Herramientas menores		6,00% de	(G) =	6,15	
>	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	168,72	
>	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	1.044,63	
	L	Gastos grales. y administrativ		10,00% de	(J) =	104,46	
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	114,91	
>	N	PARCIAL			(J+L+M) =	1.264,00	
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	39,06	
>	Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(N+P) =	1.303,05	
>		PRECIO ADOPTADO:				1.303,05	
		Son: mil trescientos tres y siete con 05/100 bolivianos					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 82. Precios unitarios de mezcla asfáltica templada con emulsión y adición del PVC y PS.

Fuente: Elaboración propia.

3.14 COMPARACIÓN DE COSTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS CON REFERENCIA CON REFERENCIA AL COSTO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Comparando de acuerdo a los valores en los análisis de precios unitarios desarrollados en el apartado anterior que se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 83. Costo unitario de las mezclas asfálticas.

Material	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica adicionada con PVC y PS
Costo bs 1/m ³	1303,05	1415,69
Diferencia en bolivianos	-	111,95
Diferencia en (%)	-	1,1195

Fuente: Elaboración propia.

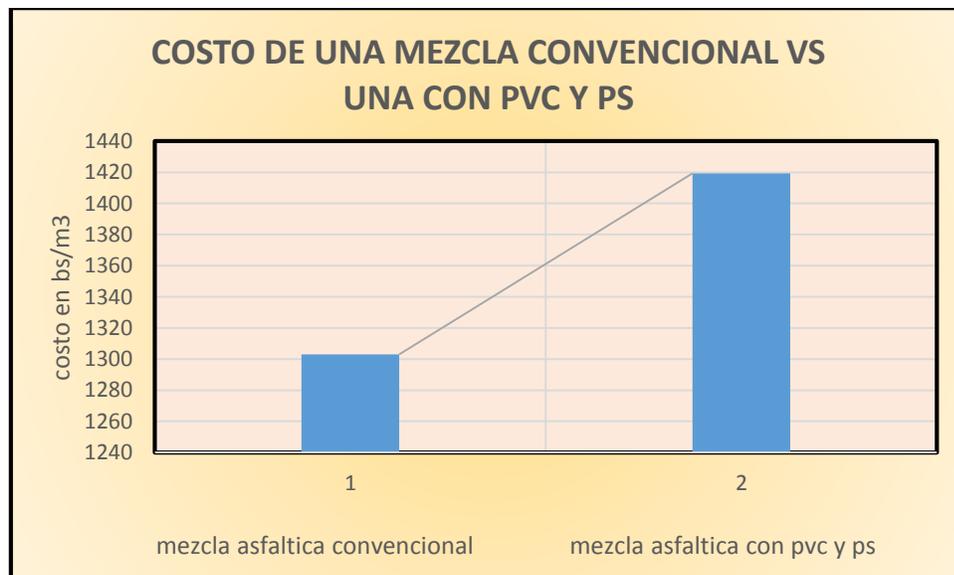
En la tabla 25 se aprecia los costos de los dos tipos de mezclas que se desarrollaron en la investigación.

De acuerdo a este precio se puede interpretar la diferencia que existe entre los precios definidos en esta investigación para cada una de las mezclas asfálticas desarrolladas.

La mezcla asfáltica desarrollada con desecho de tuberías de PVC y PS presenta una diferencia de costo de 111,95 bs/m³ esto significa un aumento del 1,11% referente al costo de la mezcla convencional.

Las mezclas asfálticas añadiendo material reciclado redujeron la cantidad de emulsión, pero fueron más elevados en comparación con la convencional debido a que las recicladoras cobran un costo por kilogramo de material reciclado.

Gráfico 12. Comparación de costo de una mezcla convencional y una adicionada con PVC y PS.



Fuente: Elaboración propia.

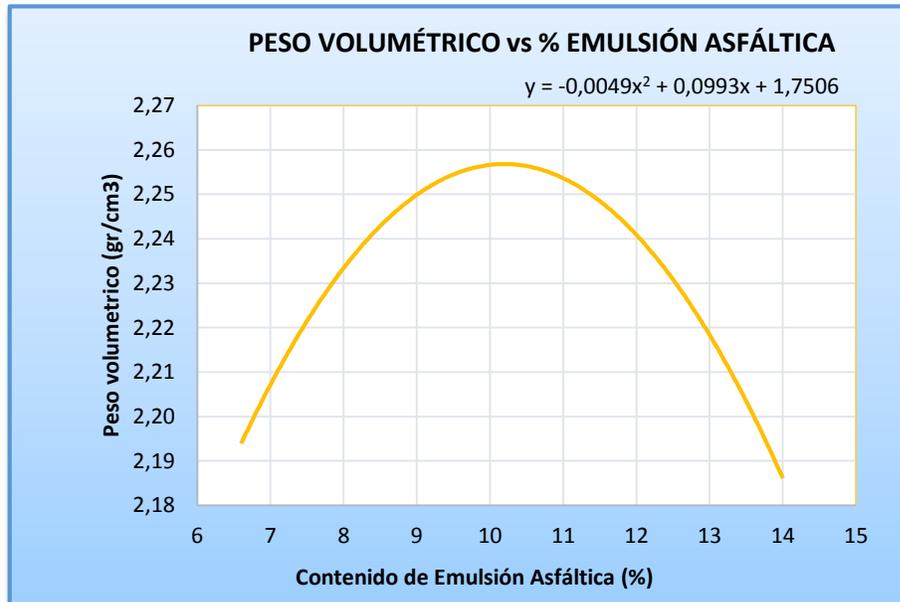
3.15 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

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 y junto a eso se trabajara con el 6 % de polímero, a su vez la emulsión también equivale a 100 Lt/m³.

Peso Volumétrico de la ecuación

Valor: 10 %→120 ml

Gráfico 13. Validación de curva peso volumétrico vs. % emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de curva peso volumétrico vs. % emulsión convencional

$$y = -0,0049 * X^2 + 0,0993 * X + 1,7506$$

Calculo

$$X = 10 \%$$

Y=?

$$y = -0,0049 * X^2 + 0,0993 * X + 1,7506$$

$$y = -0,0049 * (10)^2 + 0,0993 * 10 + 1,7506$$

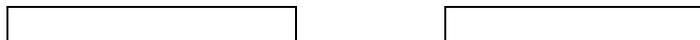
$$y = 2,253 \text{ gr/cm}^3$$

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 numero como: A, B, C, 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 84. Resultado de peso volumétrico para un contenido de 120 ml de Emulsión convencional.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Peso volumétrico (gr/cm ³)
120	10	2,290



Fuente: Elaboración propia.

Validación de peso volumétrico

Se puede observar que el resultado obtenido de 2,253 gr/cm^3 de peso volumétrico de la ecuación con el resultado obtenido de 2,290 gr/cm^3 de peso volumétrico de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,62 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

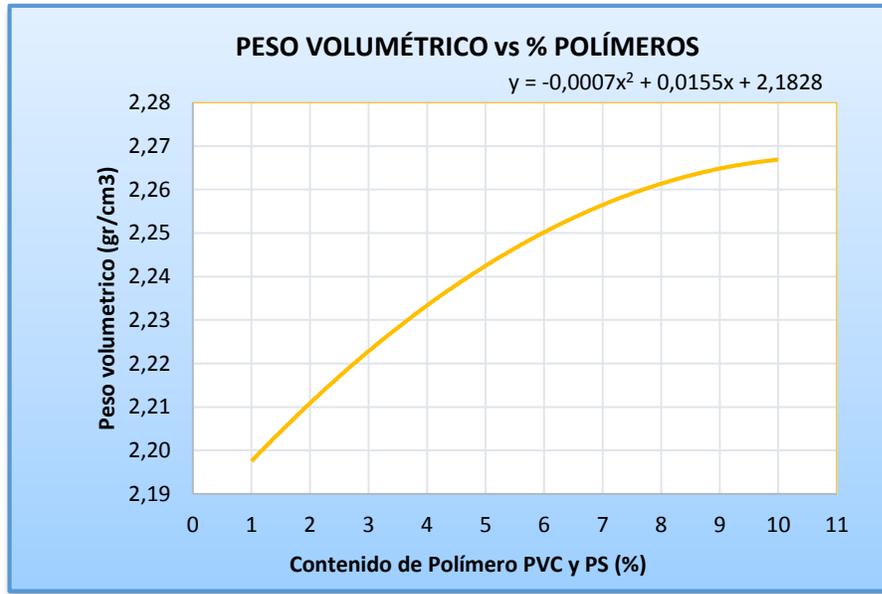
Tabla 85. Validación peso volumétrico de emulsión convencional.

Forma	Peso volumétrico (gr/cm³)	Validación
Ecuación	2,253	Cumple
Briquetas	2,290	

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 14. Validación de curva peso volumétrico vs. % polímeros.



Fuente: Elaboración propia.

Peso volumétrico de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 2,265 \text{ lb}$$

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 del peso volumétrico se las enumeró como: D, E, F, 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 86. Resultado de peso volumétrico para un contenido de 120 ml de emulsión con adición de los polímeros.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Peso volumétrico (gr/cm3)
120	10	2,300

Fuente: Elaboración propia.

Validación de peso volumétrico

Se puede observar que el resultado obtenido de 2,265 gr/cm³ de peso volumétrico de la ecuación, con el resultado obtenido de 2,300 gr/cm³ de peso volumétrico de las

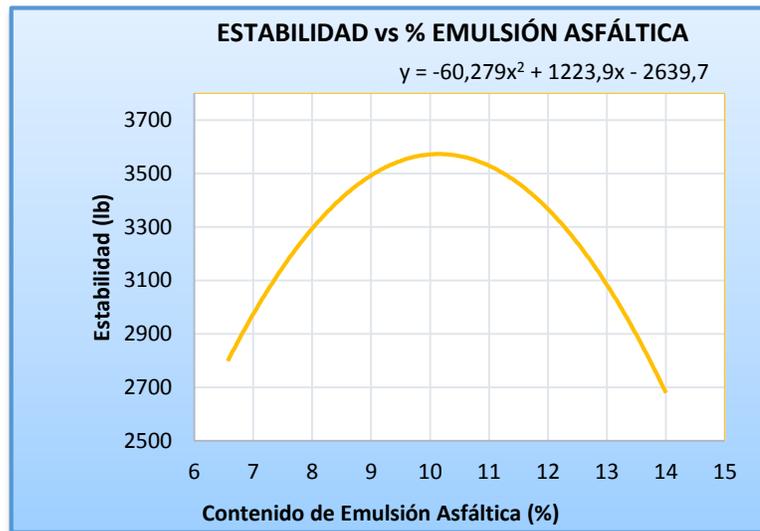
briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,55 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 87. Validación peso volumétrico en función de los polímeros.

Forma	Peso volumétrico (gr/cm ³)	Validación
Ecuación	2,265	Cumple
Briquetas	2,300	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15. Validación de la estabilidad vs. % emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 3541,357 \text{ lb}$$

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 la estabilidad se las enumeró como: A, B, C, 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 88. Resultado de estabilidad para un contenido de 120 ml de emulsión.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Estabilidad (Lb)
120	10	3545,102

Fuente: Elaboración propia.

Validación de estabilidad

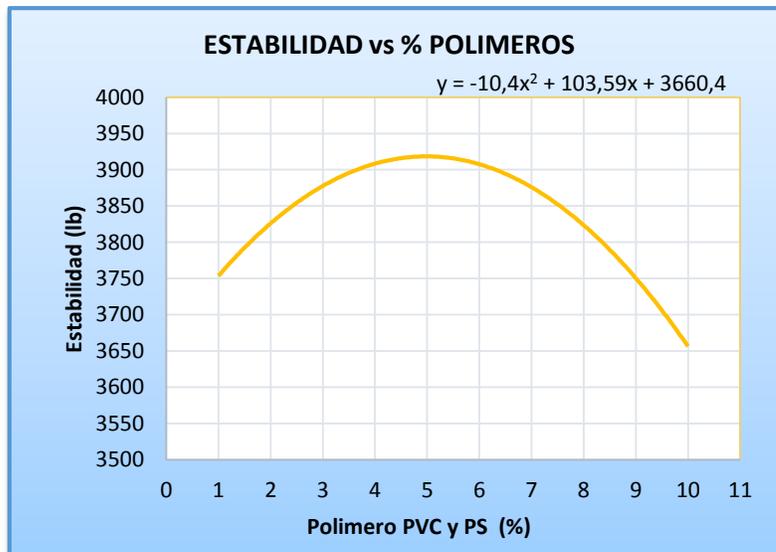
Se puede observar que el resultado obtenido de 3541,357 lb de estabilidad de la ecuación, con el resultado obtenido de 3545,102 lb de estabilidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,05 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 89. Validación estabilidad en función de la emulsión.

Forma	Estabilidad (Lb)	Validación
Ecuación	3541,357	Cumple
Briquetas	3545,102	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16. Validación de estabilidad vs. % polímeros.



Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad de la ecuación

$$X= 10 \%$$

$$y=3918,350 \text{ lb}$$

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 la estabilidad se las enumero como: D, E, F, 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 90. Resultado de la estabilidad para un contenido de 120 ml de emulsión en función del contenido de polímeros.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Estabilidad (Lb)
120	10	3955,520

Fuente: Elaboración propia.

Validación de estabilidad

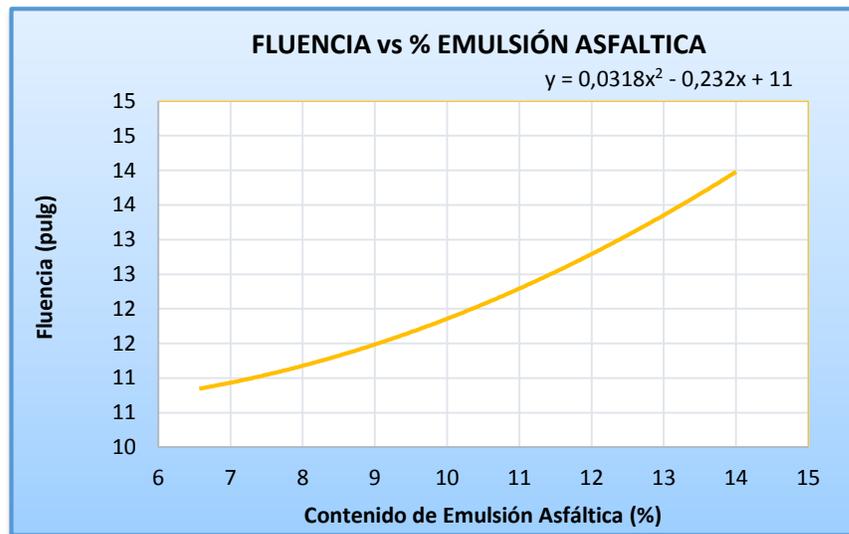
Se puede observar que el resultado obtenido de 3918,350 lb de estabilidad de la ecuación, con el resultado obtenido de 3955,520 lb de estabilidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 0.94 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 91. Validación de la estabilidad en función de la emulsión y el porcentaje de polímero.

Forma	Estabilidad (Lb)	Validación
Ecuación	3918,350	Cumple
Briquetas	3955,520	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 17. Validación de la fluencia vs. % emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Fluencia de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 13,91 \text{ pulg}$$

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 la fluencia se las enumeró como: A, B, C, 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 92. Resultado de fluencia para un contenido de 120 ml de emulsión.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Fluencia (pulg)
120	10	14,03

Fuente: Elaboración propia.

Validación de fluencia

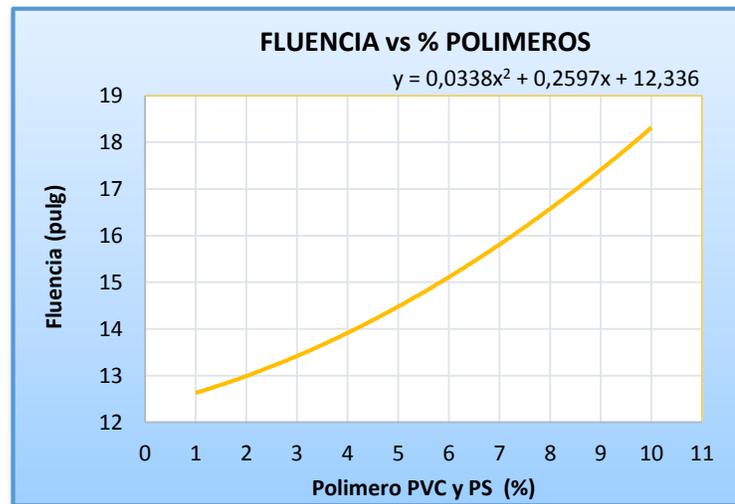
Se puede observar que el resultado obtenido de 13,91 pulg de fluencia de la ecuación, con el resultado obtenido de 14,03 pulg de fluencia de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 0,85 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 93. Validación de la fluencia en función de la emulsión.

Forma	Fluencia (pulg)	Validación
Ecuación	13,91	Cumple
Briquetas	14,03	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 18. Validación de la fluencia vs. % polímeros.



Fuente: Elaboración propia.

Fluencia de la ecuación

$$X = 10 \%$$

$$y = 18,50 \text{ pulg}$$

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 la fluencia se las enumeró como: D, E, F, 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 94. Resultado de la fluencia para un contenido de 120 ml de emulsión en función del porcentaje de polímeros.

Contenido de emulsión	% de emulsión	Fluencia (pulg)
120	10	18,83

Fuente: Elaboración propia.

Validación de fluencia

Se puede observar que el resultado obtenido de 18,50 pulg de fluencia de la ecuación, con el resultado obtenido de 18,83 pulg de fluencia de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,75 % menor que el 5 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 95. Validación de la fluencia en función de la emulsión.

Forma	Fluencia (pulg)	Validación
Ecuación	18,50	Cumple
Briquetas	18,83	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1. Conclusiones

- Para el diseño de una mezcla asfáltica se debe verificar que la caracterización de los agregados y la emulsión asfáltica cumple con las normas y especificaciones técnicas para el diseño de una mezcla asfáltica en templado.

- Para la mezcla asfáltica convencional se realizó la dosificación y la compactación de las briquetas variando porcentajes de 6,6% al 14% de emulsión asfáltica aumentando cada 1% de residuo para hallar su valor de contenido de emulsión, para obtener el porcentaje óptimo de contenido de emulsión cuyo valor es 10,0% para una mezcla convencional para posteriormente usar este porcentaje óptimo de emulsión en la mezcla asfáltica adicionando los materiales reciclados como el desecho de PVC y el PS.

- Por otra parte, tomando en cuenta las propiedades Marshall según el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en cada grupo de trabajo, se puede resaltar que el uso del desecho de PVC Y PS triturado para aporta mayores beneficios a la mezcla asfáltica si es añadido en porcentajes comprendidos entre el 1% a 10%, siendo el 6% el porcentaje óptimo de polímero triturado a ser agregada en una mezcla asfáltica, ya que con este porcentaje presenta principalmente una mayor estabilidad, seguido de una mejor fluencia, y peso volumétrico.

- El desecho de PVC y PS adicionado al 6% a la mezcla Marshall en la emulsión por vía húmeda produjo un aumento de las propiedades mecánica de estabilidad fluencia y peso volumétrico

- En cuanto al diseño Marshall que se realizó se pudo evidenciar en el análisis de resultados que hay un incremento en las propiedades mecánicas estudiadas de peso volumétrico y estabilidad y fluencia.

4.1.2. Recomendaciones

- Luego de finalizada la investigación, se recomienda el cuidado que se debe tener al momento de tratar con materiales reciclados, puesto que muchas veces al encontrarse en desuso, rotas o quebradas, constituyen un cuidado para la salud de las personas; en el caso del PVC que es un material que generalmente son materiales de tuberías utilizadas para el uso de instalaciones sanitarias que contienen gérmenes deben ser utilizados con cuidado y algún utensilio para limpiarlos y proceder a su trituración.
- Procurar, además, que los agregados utilizados provengan de fuentes con buena calidad, ya que cualquier mezcla asfáltica depende casi en su totalidad de las propiedades que ostentan los agregados pétreos.
- Además, debido a que la investigación presentada ha permitido ofrecer una solución eficiente a las problemáticas planteadas por la generación de residuos y que a pesar de haber definido un camino muy concreto de valorización del residuo de desechos de plástico, también se han abierto nuevas alternativas que pueden marcar futuras líneas de investigación en torno al tema.