

CAPITULO I

DISEÑO TEÓRICO-METODOLÓGICO

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad debido al constante desarrollo de vías de comunicación, y causa del mayor tráfico vehicular en las redes viales, es decir incremento de cargas vehiculares actuantes, como también cambios bruscos de temperatura durante una misma época del año, surgen problemas de deterioro de las mismas, ocasionando perjuicios a los usuarios, ya sea de comodidad o de tiempo de viaje.

Es por este motivo que la ingeniería se debe dar a la tarea de experimentar con nuevos materiales y plantear nuevas alternativas que permitan cumplir con las rigurosas exigencias de vida útil, así como también de rendimiento ante cargas y agentes climáticos.

Es en este sentido que se ha optado por modificar las propiedades de las mezclas asfálticas, con el fin de mejorar sus características mecánicas con respecto a las mezclas convencionales, y es por ello que mediante esta investigación se pretende implementar de la forma más conveniente otro material en la mezcla que colabore estructuralmente con el problema, y sea amigable con el medio ambiente. Para ello se optó por utilizar un material presente en las botellas plásticas denominado Tereftalato de Polietileno (PET) por sus siglas en inglés, que servirá como agente modificador de las mezclas asfálticas.

La alternativa de propuesta de mezcla asfáltica por la cual se optó respecto al tema ambiental que se trata, fue la de una Mezcla Asfáltica en Frio (MAF) o mezcla con emulsión asfáltica trabajada a temperatura ambiente denominada también hoy en día como mezclas asfálticas ecológicas, en nuestro medio este tipo de mezclas no son muy usuales, ya que en la construcción de calles y carreteras, generalmente se utilizan Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC), pero es importante tener conocimiento acerca de Mezclas Asfálticas en Frio (MAF), debido a que esta alternativa de diseño tiene ventajas en el ahorro en su costo de producción en comparación con las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC), además los resultados de durabilidad de la capa de rodadura construida con Mezclas Asfálticas en Frio (MAF) con emulsión asfáltica han presentado buenos

resultados en pavimentos de liviano y mediano tráfico según la información encontrada sobre proyectos construidos en países como Estados Unidos, España y Argentina entre otros.

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

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

La propuesta de una Mezcla Asfáltica en Frio (MAF) con la incorporación de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), 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, además de que con la modificación de una Mezcla Asfáltica en Frio (MAF) se busca la mejora en algunas de sus propiedades mecánicas con el fin de tener una mezcla con mejores características con respecto a una mezcla con emulsión asfáltica convencional.

En la actualidad los desechos plásticos ha ido en aumento debido a la creciente industria que existe en nuestro medio, así como también el uso del plástico que ha sustituido a diversos materiales hoy en día, pues la mayoría de estos plásticos al concluir su utilidad son llevados al relleno sanitario a cargo de municipios, pero generan excesiva contaminación al medio ambiente y cabe recalcar que no todas las botellas de Tereftalato de Polietileno (PET) son reciclables, por lo cual se considera pertinente reciclarlo y clasificarlo para lograr una disposición adecuada de los plásticos, es por ello que la propuesta de esta investigación se basa en el reciclaje de estos productos plásticos para

darles un uso técnico en el diseño de pavimentos, esta idea se constituye en una herramienta no solo novedosa en el campo de la Ingeniería Civil sino contribuiría a la mantención de nuestro ecosistema.

Al conocer ya los antecedentes mencionados en un principio, el autor del presente trabajo busca resolver estos problemas de carácter técnico, social y medio ambiental a través de la introducción de la limadura de material reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET) proveniente de la trituración continua de las botellas de plástico en moliendas, y así incorporarlo como parte de la emulsión asfáltica con el fin de mejorar algunas de las propiedades mecánicas de la mezcla modificada con la nueva emulsión, siendo este el principal interés de esta investigación y dando un cumplimiento en la reducción de los residuos sólidos e innovando la utilización de este material en mezclas con emulsiones asfálticas para contribuir con el medio ambiente y el desarrollo vial.

Todos los ingenieros civiles que desempeñan sus funciones en el campo vial se podrían ver beneficiados por este proyecto ya que tipifican sus modelos de pavimentos de buenas características que debido al uso de material reciclado pueden resultar más económicos. Obteniendo resultados óptimos el beneficio de este proyecto podría sobrepasar los niveles locales alcanzando interés a nivel nacional.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En nuestro medio tanto pavimentos flexibles como rígidos, se ven afectados por los problemas típicos de deterioro por paso del tiempo y por uso vehicular constante como hundimientos, baches y grietas. Estos desperfectos además de ocasionar tráfico (embotellamiento vehicular), accidentes y averías vehiculares también impactan en las finanzas públicas, al requerir presupuestos mayores para trabajos de mantenimiento constante.

Las distintas quejas de la población son generadas debido a los problemas descritos, y tomando en cuenta que son el medio de comunicación principal del país se debe dar la suficiente importancia pues la alteración de su normal funcionamiento puede afectar seriamente la economía nacional.

Debido a estos problemas se ha introducido nuestro mercado el uso de polímeros que modifican directamente a las mezclas en su composición dándole mayor resistencia y mejorando sus características, pero así también incrementando considerablemente los costos de los proyectos. Por la motivo la propuesta de la investigación está basado en el uso de material reciclado, específicamente el uso de limadura de botellas plásticas correspondientes a Tereftalato de Polietileno (PET) como componente adicional de la mezcla que actué de la forma más conveniente obteniendo resultados favorables en su uso con respecto a una mezcla convencional.

Para ello se desglosa puntos a continuación que justifican el uso de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en las mezclas con emulsión asfáltica.

1.2.1. Justificación tecnológica

Parte de conocer nuevas tendencias en la construcción de pavimentos en frío, mejorando a emulsión asfáltica a través de las propiedades que nos brinda el Tereftalato de polietileno (PET), y así mejorar las propiedades mecánicas de este tipo de pavimentos dándole solución a los problemas típicos de deterioro en nuestras vías.

1.2.2. Justificación ambiental

Reducir la contaminación ambiental promoviendo al reciclado del material contaminante que es la botella plástica (PET), y exhortando a las personas al uso de la emulsiones asfálticas para el diseño de mezclas en frío que no dañan la capa de ozono debido a su fabricación a temperatura ambiente y a que no expelen gases tóxicos, además que teniendo un mejoramiento de algunas de las propiedades de la mezcla se reflejaría una mejor calidad del pavimento.

1.2.3. Justificación social

Brindar un aporte al diseño de nuevos tipos de pavimentos modificados con emulsiones asfálticas, ya que al conocer la influencia que tiene la incorporación de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en sus propiedades se puede obtener un producto de mejor calidad a partir de material reciclado además de contribuir a la descontaminación del ambiente, a lo largo del tiempo.

Además de tener carreteras de mayor resistencia libres de baches y grietas.

1.2.4. Justificación económica

Mantener las vías (carreteras) libres de baches grietas y fisuras con el diseño de un pavimento de mayor resistencia a base de emulsión asfáltica modificada con Tereftalato de Polietileno (PET), incrementaría el comercio entre ciudades de manera más rápida y eficiente, y se tendría una mejora en la producción debido a un más rápido traslado por lo cual mejora la calidad de vida.

Además teniendo pavimentos de mayor resistencia a un menor costo mejoraría tanto como propuesta económica, así como el costo de mantenimiento reducido de los mismos.

En resumen se puede decir que el estudio de este proyecto contribuye enormemente a la salida de mucha cantidad de desechos perjudiciales dándoles un uso eficaz estrechamente ligado a la mejora de uno de los pilares del desarrollo del país como son las vías terrestres.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

El problema principal que se tiene es en que las calles de nuestra ciudad son afectadas por varios factores como ser el paso del tiempo y paso constante de vehículos, los desperfectos comunes en nuestras calles son tales como ser: baches, grietas, fisuras, etc. ocasionando un presupuesto mayor para el mantenimiento de las mismas.

Para solucionar tales desperfectos de las calles se emplean en la actualidad materiales a base de polímeros tanto en las emulsiones como en las mezclas como ser: geo membranas, geo sintéticos para mejorar la resistencia, pero esto a su vez como ya se mencionó incrementa considerablemente el costo.

Otro problema que se pudo observar fue el de carácter ambiental que se ha venido presentando en los últimos años con respecto al gran volumen de desechos plásticos generados en nuestro país, que según datos actuales en Bolivia se genera anualmente 1,7 millones de toneladas de residuos sólidos, el cual 22,1% corresponden a desechos reciclables de botellas de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET), y considerando al plástico como un residuo que afecta el medio ambiente al no ser biodegradable, y teniendo a su vez una baja cultura ciudadana del reciclaje y gran uso a nivel mundial del mismo,

surge la idea del reciclaje de los residuos plásticos tipo PET convirtiéndolos en limadura a agregándolos como parte de la emulsión actuando como polímeros para la elaboración de mezclas con emulsión asfáltica con el fin de minimizar nuestro problema principal con la inclusión de un material reciclable de bajo costo, disminuyendo la contaminación ambiental generada por este tipo de plástico y a su vez contribuir con el desarrollo sostenible del medio ambiente.

A nivel Nacional:

Así mismo cabe recalcar que a nivel nacional en Bolivia los pavimentos flexibles están conformados por una capa asfáltica, la cual es el producto obtenido de la adición y mezclado uniforme de un cemento asfáltico en un agregado granular. Estas mezclas son conocidas como mezclas asfálticas y según el procedimiento de mezclado se pueden clasificar en mezclas densas en caliente y mezclas densas en frío.

Por lo anterior, y por muchas otras causas la cantidad de vías en excelente estado del territorio boliviano son muy pocas, debido a que los pavimentos muchas veces trabajan en condiciones extremas de diseño, y terminan por hacer fallar el pavimento antes del periodo para el cual se diseñó. Por consiguiente, para solucionar estos problemas se han realizado diversas investigaciones que buscan mejorar las capacidades mecánicas de las mezclas asfálticas, adicionado a su composición polímeros o materiales de reciclaje, como lo pueden ser: cauchos, cueros, plásticos, escoria, PVC, entre otros. Y que estos aumenten sus capacidades de resistencia y durabilidad, y sean amigables con el medio ambiente.

A nivel Regional:

En la ciudad de Tarija existen muchos trabajos de investigación y evaluación de pavimentos flexibles proporcionados por la Universidad Juan Misael Saracho que constatan el daño que sufren calles pavimentadas en la ciudad, e incluso pistas pavimentadas recientemente que se siguen rajando y, por ello, tendrían que volver a ser parchadas.

Por dichas razones para la ciudad de Tarija se busca incorporar la elaboración de un asfalto ecológico que no daña el medio ambiente y se recurre a la elaboración de mezclas con emulsiones asfálticas que compone de (emulsificante, agua y diluyente) y agregados

pétreos (grava y arena) extraídos del lugar, incorporando a su vez de la forma más conveniente la limadura de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET) como porcentaje de la mezcla con emulsión asfáltica y se pretende que mejore relativamente algunas de sus propiedades con respecto a una mezcla con emulsión asfáltica convencional a un costo reducido, y que brinde un beneficio extra al medio ambiente, exhortando a la gente al reciclaje.

1.3.1.2. Determinación del problema

Los problemas e inquietudes ya mencionadas nos conducen a hacernos una pregunta

¿Se podrá mejorar algunas de las propiedades mecánicas de una mezcla con emulsión asfáltica en frío, con la incorporación de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Analizar el efecto que causa la utilización de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en una mezcla con emulsión asfáltica en frío, de tal manera que nos permita evaluar el comportamiento de algunas de las propiedades mecánicas de la mezcla modificada.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Analizar los aspectos generales sobre las mezclas con emulsiones asfálticas modificadas con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), desde su conceptualización, componentes, características y procedimientos de elaboración.
- ✓ Cuantificar algunas de las propiedades tanto de la mezcla con emulsión asfáltica convencional, como de la modificada con limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) como polímero en la emulsión, mediante el ensayo de Marshall.
- ✓ Analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas las cuales son el peso volumétrico, densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad y fluencia de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con la incorporación de polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), en comparativa mezcla con emulsión asfáltica convencional.

- ✓ Establecer pruebas de confianza y validación de cada uno de los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas de la densidad, porcentaje de vacíos en la mezcla, estabilidad y fluencia de nuestra mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros.
- ✓ Evaluar desde la parte técnica, económica y ambiental el uso de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en la modificación de mezclas con emulsión asfáltica.

1.5. HIPÓTESIS

Si se incorpora limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en distintos porcentajes a una mezcla con emulsión asfáltica convencional para modificarlas, entonces se mejorara algunas de las propiedades mecánicas de la misma.

1.5.1. Hipótesis gráfica



1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Identificación de variables

1.6.1.1. Variables independientes

X_i = Porcentaje de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) a adicionar en la mezcla con emulsión asfáltica.

1.6.1.2. Variables dependientes

Y_i = Mejoramiento de algunas de las propiedades de la mezclas con emulsión asfáltica modificada.

Y_1 = Densidad

Y_2 = Porcentaje de vacíos

Y_3 = Estabilidad

Y_4 = Fluencia

1.6.2. Definición conceptual de variables

Objeto de investigación

1.6.2.1. Mezcla con emulsión asfáltica

Una mezcla con emulsión asfáltica o mezcla asfáltica en frío es la combinación de agregado pétreo con o sin relleno mineral y asfalto emulsionado o rebajado proceso que se lleva a cabo a temperatura ambiente.

Porcentaje de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET):

Obteniendo la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) de botellas plásticas se busca hacer variar distintos porcentajes de PET que se añadirán a la mezcla con emulsión asfáltica convencional, y a si hallar el porcentaje óptimo de este material para que la mezcla mejore sus propiedades y por ende su desempeño.

1.6.2.2. Método de Marshall modificado

Basado en el común Método de Marshall para mezclas asfálticas en caliente que a través de sus laboratorios en la Universidad de Illinois – EEUU, ha fijado parámetros de manejo en agregados y emulsión, así también las temperaturas de mezcla para el uso del Marshall con emulsiones, para proveer de información sobre las propiedades estabilidad y flujo de las mezclas con emulsión asfáltica, y establecer densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la producción del pavimento.

Mejoramiento de las propiedades en la mezcla con emulsión asfáltica modificada:

Las propiedades estabilidad, flujo, densidad, vacíos son esenciales al momento de establecer el rendimiento y durabilidad de una mezcla con emulsión asfáltica modificada.

1.6.3. Operacionalización de las variables

Tabla 1.2. Operacionalización de la variable dependiente.

	Variable Dependiente	Indicador	Conceptualización	Medición	Rango de variabilidad
Yi	Propiedades de la mezcla con emulsión asfáltica modificada	Densidad	Peso del volumen específico de la mezcla	g/cm ³ o Kg/m ³	-
		Porcentaje de vacíos	Espacio de aire pequeño presente en el agregado revestido en la mezcla compacta final	%	3-5%
		Estabilidad	Capacidad de soportar el desplazamiento y la deformación debido a las cargas de tráfico	Pulgadas	> 1800 Lb.
		Fluencia	Deformación máxima	mm	8-16 pulg.

Fuente: Elaboración propia.

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidades de estudio y decisión muestral

Unidades de estudio o muestreo:

Mezclas con emulsión asfáltica.

Población:

Ensayos de mezclas con emulsión asfáltica en frío.

Muestra:

Ensayos de mezclas con emulsión asfáltica en frío, modificadas con la incorporación de limadura de Tereftalato de polietileno por vía húmeda, en porcentajes entre 1,0% y 10,0% como parte de la emulsión. Cantidad en porcentaje de limadura de PET empleado para diseñar mezclas asfálticas en frío.

Muestreo:

En la realización de esta investigación se tendrá un total de 286 pruebas para los 18 ensayos para toda la investigación, partiendo de 34 pruebas en total para la caracterización a través de 6 ensayos del Agregado tanto grueso como fino, 15 pruebas en total para los 5 ensayos de la emulsión asfáltica, 1 prueba para el ensayo de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), y 48 briquetas de ensayo en total para el Marshall modificado, de las cuales 18 son para la mezcla con emulsión asfáltica convencional y 30 para la mezcla con emulsión asfáltica modificada. Lo siguiente será detallado en la *Tabla 1.2.* a continuación tanto para etapa de recopilación, como de resultados.

Tabla 1.2. *Tabla de actividades de número de ensayos.*

Actividades	Tipo	Nº de pruebas
Etapas de recopilación		
Caracterización del agregado		
Granulometría de agregados	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Peso específico y absorción de agregado	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Abrasión de agregado grueso máquina de los Ángeles	Grava	1
	Gravilla	1
Peso unitario y vacío de agregados	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Equivalente de arena	Arena	3
Porcentaje de caras fracturadas	Grava	1
	Gravilla	1
Caracterización de la emulsión		
Viscosidad Saybolt-Furol	CMS-2H	3
Destilación de la emulsión	CMS-2H	3
Ductilidad	CMS-2H	3
Densidad relativa	CMS-2H	3
Penetración	CMS-2H	3
Caracterización del polímero		
Granulometría de limadura de Tereftalato de Polietileno	PET	1
Etapas de resultados		
Estabilidad	-	48
Fluencia	-	48
Porcentaje de vacíos	-	48
Densidad	-	48
Peso volumétrico	-	48
Total		286

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de resultados se tomara en cuenta según la norma ASTM D-1559, así como la norma AASHTO T-245 determina la elaboración y posterior ensayo de tres briquetas por cada porcentaje de asfalto y limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), por lo que en el presente trabajo experimental, los ensayos se realizarán de la siguiente manera:

Tres briquetas para cada porcentaje de emulsión asfáltica en la mezcla convencional con agregado pétreo. Esta para hallar el contenido óptimo de emulsión y tener una mezcla patrón.

Los porcentajes varían en 1,0% con valores de 4,5%; 5,5%; 6,5%; 7,5%; 8,5% y 9,5%. de cemento asfáltico residual, el total de emulsión se tendrá en función al ensayo de destilación de la ficha técnica (valor más fiable para el diseño).

Tres briquetas para cada porcentaje de limadura de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET), incorporada por vía húmeda como polímero a la emulsión para el diseño de la mezcla con emulsión asfáltica modificada.

Los porcentajes de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), varían de entre 1,0% a 10,0% con respecto a la emulsión, porcentajes que se toman en cuenta, ello debido a la experiencia tenida ya en una revista colombiana regida por varias tesis e investigaciones recopiladas de mezclas modificadas.

Se hará variar el porcentaje de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), cada 1,0%. Solo para tránsito pesado el más solicitado 75 golpes por cara.

Obteniendo un total de 48 briquetas las cuales permitirán obtener resultados confiables para el estudio.

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.

Mediante la interpretación de cada método se propuso el uso del método general inductivo para el análisis de la utilización de limadura de Tereftalato de polietileno (PET), en mezclas con emulsión asfáltica y saber si mediante la realización de las pruebas de laboratorio y de los resultados que se obtengan se podrá establecer conclusiones factibles de la investigación.

1.7.2.2. Técnicas de muestreo

Para la realización de esta investigación las técnicas de muestreo a aplicarse serán analítico y estadístico descriptivo.

Con la técnica analítica se observaran las características de estabilidad y flujo de la mezcla mediante la realización de briquetas.

Y se aplicaran el método estadístico el cual nos permitirá evaluar estadísticamente los resultados que se obtendrá mediante los Ensayos Marshall modificado de las briquetas a realizar en el laboratorio.

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

a) Guía de documentos

Para poder llevar acabo la recolección de información, se utilizó procedimientos especificados en manuales y normas nacionales del Manual de Carreteras y Asfaltos de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y normas internacionales basados en la normativa (ASTM Y AASHTO), como el Manuales Técnicos de Emulsiones Asfálticas de Colombia, Ecuador y Brasil, y el Manual Básico de emulsiones asfálticas N° 19 de EEUU como base para los ensayos de emulsiones en laboratorio y su uso adecuado.

b) Para la extracción y preparación de agregado pétreo**Pala:**

Empleada para la extracción de agregado pétreo de un banco de préstamos normado según la ABC en Tarija

Bolsa o sacos:

Usada para el transporte de materiales pétreos al “Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Juan Misael Saracho”, el cual cuenta con equipos necesarios para la realización de los ensayos descritos a continuación.

c) Para la caracterización de la calidad de los componentes de la mezcla**Horno eléctrico de tamaño adecuado:**

Es utilizado para el secado de agregados y debe contar con una temperatura constante de 100°C a 110°C.

Balanza:

Es utilizado para obtener distintos pesos requeridos en la investigación, con una sensibilidad de 0.1 gr.

Juego de Tamices:

Se utilizara el juego de tamices para la obtención de la granulometría y la separación de agregados finos y gruesos en función a la variación de su diámetro. El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, la cual contienen los tamices 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8”, N°4, N°10, N°40, N° 200, tapa y fondo.

Canastillas metálicas:

Dispuestos como recipientes para las muestras en las pesadas sumergidas. Se dispondrá de dos tipos de canastillas metálicas, de aproximadamente igual base y altura, fabricadas con armazón de suficiente rigidez y paredes de tela metálica con malla de 3mm. Para agregados con tamaño máximo inferior a 38 mm (1 1/2") se utilizarán canastillas con capacidades de 4 a 7 dm³ y para tamaños superiores canastillas con capacidades de 8 a 16 dm³ (litros).

Dispositivo de suspensión:

Se utilizará cualquier dispositivo que permita suspender las canastillas de la balanza, una vez sumergida.

Estufa:

La cual pueda mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Varilla compactadora de acero:

Es cilíndrica, de 16 mm (5/8") de diámetro, con una longitud aproximada de 600 mm (24"). Un extremo debe ser semiesférico y de 8 mm de radio (5/16").

Recipientes:

De medida, metálicos, cilíndricos, preferiblemente provistos de agarraderas, a prueba de agua, con el fondo y bordes superiores pulidos, planos y suficientemente rígidos, para no deformarse bajo duras condiciones de trabajo. Los recipientes de 15 a 30 litros deben ir reforzados en su boca con una banda de acero de 40 mm de ancho.

d) Para dosificación y diseño de briquetas**Moldes de compactación Marshall:**

En estos moldes se vaciara la mezcla convencional y la mezcla modificada añadiendo la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), creando briquetas con distintos porcentajes de emulsión asfáltica y PET.

Compactador para moldes Marshall:

Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

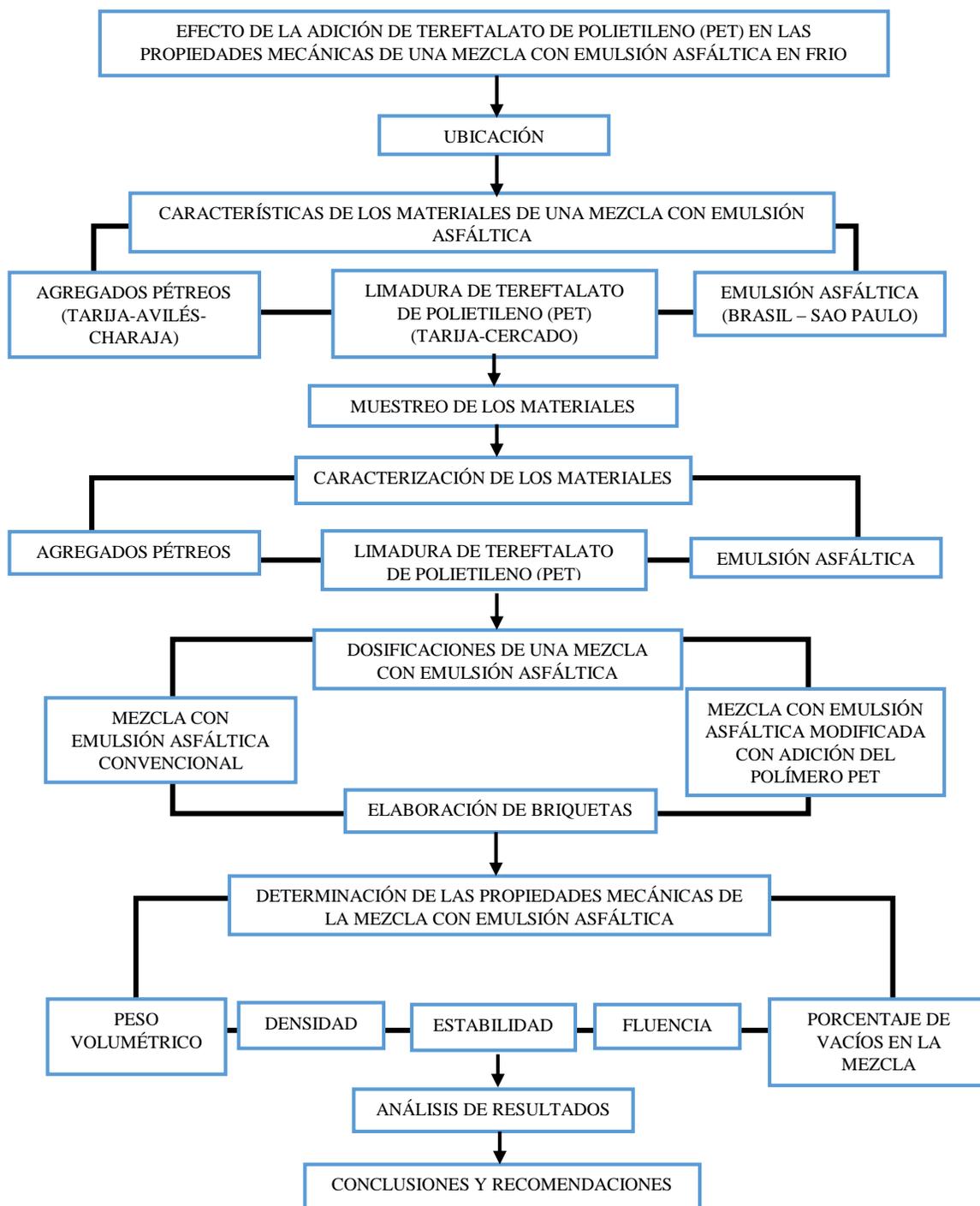
e) Para los ensayos de resistencia técnica**Marco de carga multiplex Marshall:**

Este marco sirve para disponer en el los distintos cabezales según las pruebas que se requiera.

Cabezal de rotura Marshall:

Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizar los ensayos de estabilidad y fluencia en briquetas para el análisis.

1.7.2.4. Procedimientos de aplicación



a) Extracción de las muestras de Tereftalato de Polietileno (PET)

Se procede al reciclado del Tereftalato de Polietileno (PET) de los distintos productos como ser envases de gaseosas o de agua.

Una vez obtenido una cantidad importante de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), se procedió a su limpieza y trituración consecutiva del material por medio de recicladora o molienda CAPITAL INDUSTRIAL que forma parte de la empresa tarijeña FORMAS PLÁSTICAS ubicada en el Km. 8 carretera a bermejo, se introdujo a las moliendas hasta obtener la limadura de PET tras 3 a 5 moliendas y por medio del tamizado de la misma, este polímero debe incorporarse a la emulsión por vía húmeda y para ello el proceso se realizara en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Juan Misael Saracho.

Para determinar la calidad de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) se procederá a la siguiente prueba:

Análisis granulométrico.

b) Selección de la emulsión asfáltica

Para el presente proyecto la emulsión asfáltica a utilizar es la emulsión catiónica de rotura media (CMS-2H), por ser la más usada en Bolivia para mezclas en frio y la de más fácil obtención para la misma se deberá obtener a través de la Normativa regida por la AASHTO el porcentaje óptimo para utilizar en todas las briquetas de prueba.

c) Caracterización de la emulsión asfáltica

Para determinar la calidad de la Emulsión y para cumplir sus características técnicas se realizaran los siguientes ensayos.

Destilación de emulsión asfáltica. (ASTM D-6997).

Ductilidad del cemento asfaltico residual. (ASTM D-133; AASHTO T51-00).

Densidad relativa del cemento asfaltico residual (AASHTO T229-97).

Penetración del cemento asfaltico residual. (ASTM D-5; AASHTO T 49-97).

Viscosidad Saybolt Furol. (ASTM D-244).

d) Caracterización de los agregados

Para determinar la calidad de los agregados se llevaran a cabo las siguientes pruebas según el Manual de la ABC.

Análisis granulométrico de agregado fino y grueso (ASTM C-27).

Porcentajes de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95).

Peso específico y absorción de agregados finos (ASTM D-128).

Peso específico y absorción de agregados gruesos (ASTM D-127).

Abrasión del agregado grueso maquina los Ángeles (ASTM C-131).

Peso unitario y vacíos de los agregados. (ASTM C-129).

Equivalente de arena (ASTM D-2419).

e) Dosificación y diseño de briquetas

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le añadirá el porcentajes variados de emulsión asfáltica como se indicó anteriormente hasta obtener el óptimo de emulsión asfáltica, una vez obtenido el contenido óptimo de emulsión se alterar el mismo incluyendo la limadura de Tereftalato de polietileno, como polímero siendo este último variable en su porcentaje de 1,0% hasta 10,0% del total de la emulsión .

De tal manera se obtendrán briquetas con 10 porcentajes de emulsión con PET para someterlos luego a pruebas de resistencia técnica.

Es necesario recalcar que para el diseño de las briquetas se seguirá el método Marshall modificado.

f) Ensayos de resistencia técnica

Para los ensayos de resistencia técnica, se debe tener las briquetas lista con su respectiva enumeración, para luego someterlas a pruebas de Densidad, Vacíos, Estabilidad y Fluencia, además de Peso Volumétrico que servirá como comparativa, todo esto se registrá mediante el método Marshall Modificado para mezclas en frio.

1.7.2.5. Preparación previa para la aplicación de instrumentos

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de la obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita de manera organizada el fácil desarrollo de actividades o acciones a realizar.

1.7.2.6. Procedimiento para análisis y la interpretación de la información

El presente trabajo es un estudio de investigación y experimental, se tiene además un tamaño de muestras aproximado de 30 briquetas por mezcla modificada y 18 para la convencional, las cuales serán sometidas al ensayo de resistencia Marshall.

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y las pruebas de resistencia técnica de las briquetas, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización determinamos el cumplimiento de los requisitos mínimos según las normas, que deben tener tanto de emulsión asfáltica, los agregados y los porcentajes de PET.

Con los ensayos de resistencia técnica determinamos las siguientes curvas:

Porcentaje de polímero PET vs Densidad

Porcentaje de polímero PET vs Estabilidad

Porcentaje de polímero PET vs Flujo

Porcentaje de polímero PET vs Porcentaje de Vacíos de la Mezcla

Porcentaje de polímero PET vs Vacíos de Agregado Mineral (VAM)

Porcentaje de polímero PET vs Relación Betúmen Vacíos (RBV)

Porcentaje de polímero PET vs Peso Volumétrico

De todas las curvas obtenidas en la investigación se analizará las curvas más relevantes y de mayor incidencia las cuales son: densidad, porcentaje de vacíos de la mezcla, estabilidad y fluencia; pues las demás servirán para ver el comportamiento y de apoyo.

De cada curva se selecciona el valor de porcentaje de Tereftalato de Polietileno (PET) más adecuado con previo análisis. El valor más aproximado del porcentaje óptimo de PET para la mezcla, es el promedio de los valores seleccionados. Con este porcentaje promedio aproximado, finalmente se define el porcentaje óptimo de PET, sin embargo como se trata de optimizar recursos, se debe elegir un valor donde la resistencia sea tolerable, es decir, mayor a la resistencia mínima de la mezcla convencional.

1.8. ALCANCE

El alcance de investigación para esta tesis se refleja en un trabajo netamente de laboratorio ya que se busca saber si existe una mejora en algunas de las propiedades mecánicas de las mezclas con emulsión asfáltica en frío modificadas con la incorporación de la limadura de Tereftalato de polietileno (PET). El estudio se centra principalmente en las propiedades mecánicas de densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad y fluencia.

En el presente estudio se realizará una introducción del tema central, el porqué de esta investigación se detallará en el siguiente punto a través de las justificaciones, luego se procederá a la situación problemática que será la base del desempeño del trabajo de investigación puesto que en él se plasmarán los puntos que a nuestro juicio son de vital importancia para el desarrollo de trabajos relacionados y que hasta el momento no tienen una solución completamente satisfactoria, luego se mencionará 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 realizará 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.

De manera posterior se establecerán los aspectos generales de las mezclas asfálticas, plasmado en cuatro partes, donde en primera instancia se evocará al marco conceptual

denotando la definición, clasificación y aspectos generales de cada uno de los componentes de una mezcla con emulsión asfáltica, estableciendo también el empleo, cuidados y control que se debe tener con las emulsiones asfálticas, agregado pétreo y el polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET); así como también el diseño de una mezcla con emulsión asfáltica en frío a través de método Marshall modificado, y el procedimiento de incorporación del polímero PET para la fabricación de una mezcla con emulsión asfáltica modificada, para luego pasar a una segunda parte denominada marco normativo que está plasmado a mostrar cada una de las normas empleadas y en las cuales se basarán cada uno de los componentes de la mezcla, posteriormente en tercera instancia estará el marco referencial donde se mencionará cada una de las revistas y textos de apoyo empleados para el diseño de la mezcla con emulsión asfáltica modificada, y como punto final la parte de análisis y tendencias que hará hincapié al procedimiento a seguir en base a la información teórica recolectada hasta ese punto.

De manera siguiente se establece el relevamiento de datos, por lo que en un inicio se mostrará la ubicación de cada uno de los materiales, el porqué de los materiales se detallará en el siguiente punto a través de las características de los materiales, donde se presentará la característica del banco de materiales, la característica de la emulsión y la característica y obtención del polímero PET, luego se hará el muestreo de los materiales, posteriormente se hará la caracterización de los materiales por medio de cada uno de los ensayos de laboratorio que se harán a los agregados que se utilizarán en la mezcla, otros tipos de ensayos se harán a la emulsión asfáltica, y otro ensayo realizado a la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Luego se procederá a realizar el diseño de la mezcla con emulsión asfáltica convencional y la modificada, donde se partirá de la dosificación de la mezcla en donde se presentan la determinación de proporciones de agregados y de la emulsión asfáltica, así como también la incorporación de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) mediante vía húmeda; es decir, como polímero a la emulsión asfáltica, así de manera posterior se hará la preparación de las muestras de mezcla, y elaborar nuestras briquetas con las cuales se determinará y evaluará el comportamiento de las propiedades mecánicas, luego se presentarán los análisis de resultados de la mezcla y finalmente se hará un tratamiento

estadístico de cada una de las variables, la prueba de hipótesis, además de un análisis comparativo de precios unitarios.

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.

CAPITULO II

BASE TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Asfalto – emulsión

2.1.1.1. Asfalto

Los asfaltos son aquellas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción, cuyas cualidades y propiedades físicas y químicas los hacen óptimos para un gran número de aplicaciones.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas de agregado en pavimentos.

2.1.1.2. Origen y naturaleza¹

A veces existe confusión acerca del origen del asfalto, pero en general, el asfalto es un cementante que ha sido utilizado desde hace muchos siglos en actividades de obras civiles, entre estos la construcción de carreteras.

Al respecto, arqueólogos han documentado el uso de asfaltos como un adhesivo o material impermeabilizante en el Valle de Éufrates, cuatro mil años antes de Cristo, el uso del mismo en Babilonia durante el reinado de Nabucodonosor; es por ello que en épocas pasadas el asfalto que se utilizó fue el natural; el cual se encuentra en la naturaleza en forma de yacimientos que pueden explotarse sin dificultad y cuyo empleo no requiere de operaciones industriales de ningún tipo para su preparación.

¹ Tesis de grado. “Diseño de mezclas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la universidad de Illinois”. El Salvador.

Estos yacimientos se han producido a partir del petróleo por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles dejando las asfálticas. A este asfalto se le llama frecuentemente asfalto de lago.

Los yacimientos más importantes de asfaltos naturales se encuentran en los lagos de Trinidad (como se puede observar en la *imagen 2.1*), en la isla de Trinidad en la costa norte de Venezuela.

Casi siempre se encuentran en las rocas asfálticas, que son rocas porosas saturadas de asfalto.

Imagen 2.1. Lago de asfalto Trinidad.



Fuente: <https://sobreturismo.es/2012/09/24/el-increible-lago-de-la-brea-en-trinidad-y-tobago/>.

Sin embargo, se puede obtener artificialmente como producto de la refinación, donde las cantidades de asfalto residual varían según las características del crudo; pudiendo oscilar entre el 10 y el 70%. Este asfalto se produce en una variedad de tipos y grados que van desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos.

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad.

Refinación del petróleo:

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. Como puede verse en la *imagen 2.2.*, las diferentes fracciones se separan a diferentes temperaturas.

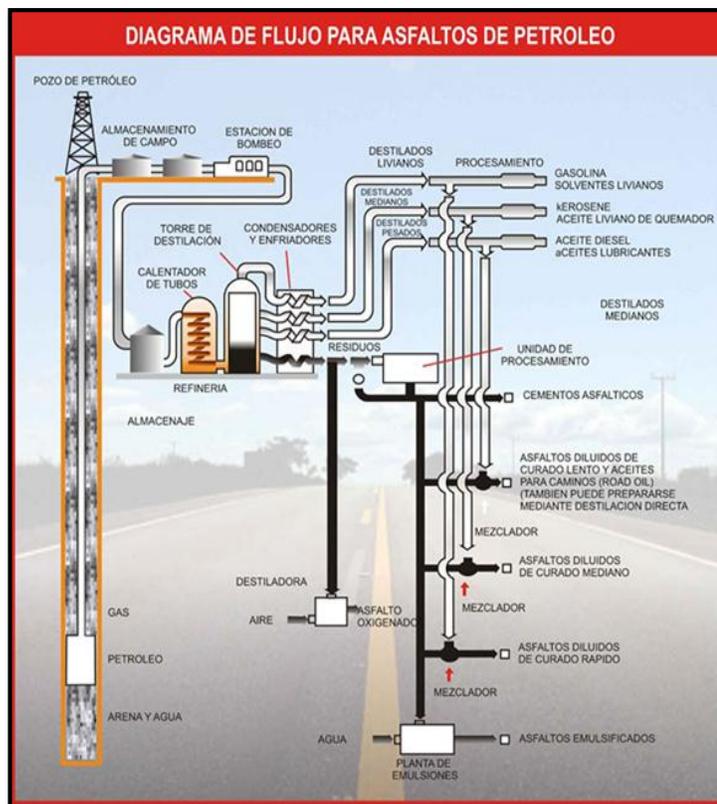
Imagen 2.2. Productos y temperaturas típicas de destilación.

Fuente: Trabajo de grado “Guía Básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador”.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Como se indica en la *imagen 2.2*, el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo del petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

En la *imagen 2.3.*, se muestra una ilustración esquemática de una refinería típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación.

Imagen 2.3. Refinación del petróleo.



Fuente: <http://asfalto en obras civil.blogspot.com/2012/07/5-obtencion-del-asfalto-en-refinerias.html>.

Refinación del Asfalto:

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto.

Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos.

Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleos antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido el asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes.

Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solventes, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto.

Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen para producir asfalto con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudo de petróleos. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.

2.1.1.3. Propiedades del asfalto

Propiedades Químicas:

Básicamente el asfalto está formado por diferentes hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno y carbono) y algunas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. El asfalto disuelto en un solvente como el heptano, se puede dividir en dos partes principales: los asfaltenos y los maltenos.

Propiedades Físicas:

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

2.1.1.4. Clasificación y grados del asfalto

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

Cemento asfáltico

Asfalto diluido (o cortado)

Asfalto emulsionado

Los asfaltos diluidos y los emulsificadores son usados, casi por completo, en mezclas en frío y en riegos. Los cementos asfálticos, por el contrario, en mezclas en caliente y no se discutirán más por no ser tema de estudio para la presente tesis. (**Guevara Palma Marlon Rodolfo, 2010**)

2.1.1.5. Emulsiones asfálticas

En general, una emulsión es una dispersión de dos elementos insolubles uno en el otro.

La emulsión asfáltica es un producto conseguido por la dispersión de una fase asfáltica en una base acuosa, donde las partículas quedan electrizadas, por lo tanto los líquidos que la forman se constituyen en dos partes que se forman constituyen dos partes que se denominan:

Fase dispersa o discontinua.

Fase dispersante o continua.

Imagen 2.4. Esquema de una emulsión.

Fuente: Urgiles G., Luis (2011), Diseño y evaluación de micropavimentos con emulsión asfáltica modificada. Tesis profesional, Sangolquí.

Existen dos tipos de emulsiones según la concentración de cada una de las fases: una emulsión directa es aquella en la que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa; en la inversa, la fase acuosa está dispersa en la parte hidrocarbonada. Las de primer tipo son las que más se emplean en la industria caminera.

Es preferible el empleo de las emulsiones directas por su baja viscosidad a temperatura ambiente, esto favorece el mojado, repartición y cohesión con el material pétreo.

2.1.1.6. Elaboración de la emulsión²

El equipo y producción para la fabricación de emulsiones es muy simple y fácil de conseguir en el mercado. El problema está en la formulación de las emulsiones que deben adaptarse a los materiales pétreos. Los requerimientos para la fabricación de las emulsiones asfálticas son sencillos, como se detalla a continuación en la *imagen 2.5*.

Imagen 2.5. Esquema para la fabricación de emulsiones asfálticas.

Fuente: Documento Técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Oro, 2001.

2.1.1.7. Composición de las emulsiones asfálticas³

Para comprender porque las emulsiones asfálticas poseen un buen desempeño para elaborar mezclas asfálticas en frío, es esencial examinar el papel de los principales constituyentes (asfalto, agua y emulsivos).

Son tres los componentes básicos de una emulsión asfáltica: cemento asfáltico, agua y un agente emulsivo. También podrían ser parte de estos componentes aditivos, como estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento, o agentes de control de rotura.

² Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

³ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Mezclar agua y asfalto es una tarea similar a la del mecánico que intenta lavar, sólo con agua, sus manos engrasadas. Sólo con detergente o con un agente jabonoso la grasa puede ser exitosamente removida. Las partículas de jabón rodean a los glóbulos de grasa, rompen la tensión superficial que los mantiene unidos y permiten que sean eliminados. Se aplican principios similares para la formulación y producción de las emulsiones asfálticas.

El objetivo es lograr la dispersión estable del cemento asfáltico en el agua suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezclada. Más aún, la emulsión deberá romper rápidamente tras entrar en contacto con el agregado en el mezclado, rotura se entiende por la separación del agua del asfalto.

2.1.1.8. Componentes de las emulsiones asfálticas⁴

Las emulsiones asfálticas están compuestas por las siguientes partes:

2.1.1.8.1. Asfalto

La emulsión asfáltica está compuesta entre un 50% y un 75% de asfalto, y aun siendo el elemento predominante en la emulsión, ninguna de sus propiedades afecta la estabilidad de la misma. Sin embargo, la caracterización del asfalto es necesaria para determinar su desempeño posterior a la colocación de la emulsión, la mayor parte de las emulsiones se hacen con asfaltos situados dentro de un intervalo de penetración de 100 a 250. Según el clima, condiciones de tránsito esperado y el tipo de aplicación escogida, la propiedad que requiere mayor atención es la dureza del asfalto.

2.1.1.8.2. Agua

Ciertos minerales y algunos químicos en el agua utilizada durante la elaboración de las emulsiones, pueden afectar la estabilidad y las condiciones de almacenamiento de la emulsión asfáltica. La presencia de iones de calcio y magnesio en el agua retrasan el rompimiento de los enlaces catiónicos en emulsiones con carga positiva, contrariamente,

⁴ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

cuando se presentan carbonatos o partículas en suspensión, se produce una pérdida de estabilidad en la emulsión debido a un prematuro rompimiento.

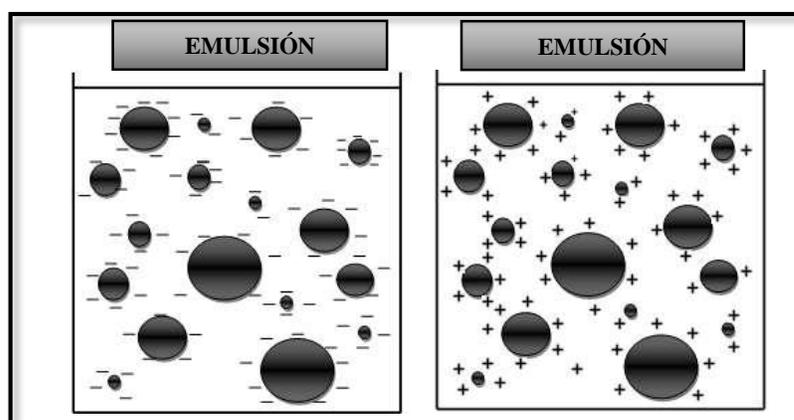
El agua usada para preparar emulsiones deberá ser razonablemente pura y libre de materias extrañas.

2.1.1.8.3. Agentes emulsificantes

Las propiedades de emulsiones de las mezclas asfálticas que dependen de gran medida en los agentes utilizados como emulsivos. EL emulsivo es un agente de tensión - activo o surfactante de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300 g/mol). El agente emulsivo mantiene las gotitas de asfalto en suspensión estable y controla el tiempo de rotura. Es también el factor determinante en la clasificación de las emulsiones como aniónicas, catiónicas o no-iónicas.

Los emulsificantes están compuestos generalmente por un radical alkilo R el cual es hidrofóbico y un componente hidrofílico, que se encuentran unidos y con el contacto con el agua se disocian, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. En la *imagen 2.6*, se muestra una representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica:

Imagen 2.6. Representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica.



Fuente: Documento técnico No. 23 "Emulsiones asfálticas". Sanfandila, Qro, 2001. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (SCT). Instituto mexicano del transporte.

2.1.1.9. Clasificación de las emulsiones asfálticas.⁵

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónicas, catiónica y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Las no iónicas pueden ganar en importancia a medida que la tecnología de emulsiones avance. Las denominaciones aniónicas y catiónica se refina las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad básica - las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un líquido en la que están sumergidos dos polos (un ánodo y un cátodo). El ánodo se carga positivamente y el cátodo se carga negativamente. Si una corriente eléctrica pasa a través de una emulsión que contiene partículas de asfalto cargadas negativamente, estas migraran al ánodo. De aquí el nombre de emulsión **aniónicas**.

A la inversa, en el caso de emulsiones con partículas de asfalto cargadas positivamente, dichas partículas migraran hacia el cátodo; se trata de una emulsión **catiónica**.

En el caso de emulsiones **no iónicas**, las partículas de asfalto son eléctricamente neutrales, y no emigran a polo alguno.

2.1.1.10. Requisitos para la calidad de las emulsiones

Las emulsiones asfálticas deben de satisfacer los requisitos de calidad que se indican a continuación:

Las emulsiones asfálticas aniónicas, según su clasificación, deben de cumplir con todos los requisitos establecidos en función a la norma AASHTO M 140 mostrada en la *tabla 2.1*.

⁵ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

Tabla 2.1. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas aniónicas.

Emulsiones asfálticas aniónicas AASHTO M 140, LNV 30-84														
Tipo	Quiebre rápido				Quiebre medio						Quiebre lento			
Nomenclatura	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h		SS-1		SS-1h	
Grado	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mín .	Má x.	Mí n.	Má x.
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg)	20	100	-	-	20	100	100	-	100	-	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg)	-	-	75	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml,0,02 N Ca, (%):(a)	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensayo carga de partícula (b)	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Ensayo de mezcla con cemento (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
Ensayo de tamizado (%)	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Residuo de destilación (%)	55	-	63	-	55	-	65	-	65	-	57	-	57	-
Ensayos en el residuo de destilación														
Penetración, 25 °C, 100 g. 5 seg. (0,1 mm)	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	40	90
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, (cm)	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97, 5	-	97, 5	-	97, 5	-	97, 5	-	97, 5	-	97,5	-	97,5	-
Ensayo de la mancha en solvente Heptano-Xilol, 25% Xilol	Negativo para todos los grados													

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

Las emulsiones asfálticas catiónicas, según su clasificación, deben de cumplir con todos los requisitos establecidos por la AASHTO M 208 en la *tabla 2.2*.

Tabla 2.2. *Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.*

Emulsiones asfálticas catiónicas AASHTO M 208, LNV 31-84												
Tipo	Quiebre rápido				Quiebre medio				Quiebre lento			
Nomenclatura	CRS-1		CRS-2		CMS-1		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
Grado	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg)	-	-	-	-	-	-	-	-	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg)	20	100	100	400	50	450	50	450	-	-	-	-
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml, 0,02 N Ca, (%);(a)	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensayo carga de partícula (b)	Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo	
Ensayo de mezcla con cemento (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
Ensayo de tamizado (%)	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Residuo de destilación (%)	55	-	63	-	55	-	-	-	57	-	57	-
Ensayos en el residuo de destilación												
Penetración, 25 °C, 100 g. 5 seg. (0,1 mm)	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, (cm)	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensayo de la mancha en solvente Heptano-Xilol, 25% Xilol	Negativo para todos los grados											

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

2.1.1.11. Rotura y curado de la emulsión⁶

2.1.1.11.1. Rotura

Para que la emulsión asfáltica cumpla su objetivo final, esto es, actúe como ligante con propiedades cementantes e impermeabilizantes, el agua debe separarse de la fase asfáltica

⁶ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

y evaporarse. Esta separación se denomina “rotura” (*breaking*). Para tratamientos superficiales y sellos, se formulan las emulsiones para romper una vez entren en contacto con una sustancia extraña tal como un agregado o la superficie de un pavimento. Para mezclas densas, se requiere más tiempo para permitir el mezclado y fraguado. En consecuencia, las emulsiones usadas para mezclas se formulan para rotura retardada. La coalescencia del asfalto se conoce como rotura o fraguado. La velocidad a la cual los glóbulos de asfalto se separan de la fase acuosa se identifica como tiempo de rotura o fraguado. Por ejemplo, una emulsión de rotura rápida romperá entre uno a cinco minutos después de ser aplicada, mientras que una emulsión de rotura media o lenta puede tomar un tiempo mayor.

La velocidad de rotura es controlada primeramente por el tipo específico y concentración del agente emulsificante usado, así como por las condiciones atmosféricas.

La rotura está también vinculada a las características relativas de absorción del agregado usado. Aquellos con altas tasas de absorción tienden a acelerar la rotura de la emulsión por motivo de una remoción más rápida del agua emulsionante.

En mezclas, emulsión agregado, la gradación y área superficial del agregado son también factores significativos en la velocidad de la rotura. Al cambiar el área superficial, las características de rotura del medio también cambian debido a la alteración de la absorción. (Acumulación en la superficie) del agente emulsificante por el agregado. Con miras a obtener óptimos resultados, es necesario controlar el tamaño del agregado o ajustar la formulación de la emulsión para cumplir los requisitos del agregado.

Imagen 2.7. Rotura de la emulsión asfáltica en contacto con el agregado.

2.1.1.11.2. Curado

Para usos en pavimentación, tanto las emulsiones aniónicas como las catiónicas dependen de la evaporación del agua para el desarrollo de sus características de curado y adherencia. El desplazamiento del agua puede ser bastante rápido bajo condiciones favorables del tiempo; pero, pueden interferir con un curado apropiado una alta humedad, baja temperatura o lluvia, poco tiempo después de la aplicación. A pesar de que las condiciones superficiales y atmosféricas son menos críticas para las catiónicas que para las aniónicas, aún dependen algo de las condiciones climáticas para lograr óptimos resultados. Quizás la principal ventaja de las catiónicas es su tendencia a dejar el agua un poco más rápidamente.

2.1.1.12. Factores que afectan la rotura y el curado de la emulsión

Algunos de los factores que afectan las velocidades de rotura y curado de las emulsiones asfálticas son:

Absorción de agua:

Un agregado de textura áspera, poroso, acelera el tiempo de rotura al absorber agua de la emulsión.

Contenido de humedad de los agregados:

Si bien los agregados húmedos pueden facilitar el recubrimiento, tienden a hacer más lento el proceso de curado al incrementar el tiempo necesario para la evaporación.

Condiciones climáticas:

La temperatura, la humedad, y la velocidad del viento tienen influencia en la velocidad de evaporación del agua, en la migración del emulsivo y en las características de liberación del agua. Usualmente, pero no siempre, la rotura ocurre de manera más rápida en tiempos cálidos. Las altas temperaturas pueden originar la formación de “piel” en tratamientos superficiales (chips seals) atrapando el agua y retardando el curado. Recientemente se han desarrollado formulaciones químicas para romper rápidamente a bajas temperaturas.

Fuerzas mecánicas:

La presión de los rodillos y, hasta cierto punto, el tráfico a baja velocidad, desalojan el agua de la mezcla y ayudan a lograr la cohesión, el curado y la estabilidad de la mezcla.

Superficie específica:

Una mayor superficie específica de los agregados, particularmente finos en exceso o agregado sucio, acelera la rotura de la emulsión.

Química de superficies:

La intensidad de la carga de la superficie del agregado, en combinación con la intensidad de la carga del agente emulsivo, puede influir marcadamente en la velocidad de rotura, en particular en el caso de emulsiones catiónicas. Iones de calcio y de magnesio presentes en la superficie del agregado pueden reaccionar con -y desestabilizar a – ciertos emulsivos aniónicos, acelerando la rotura.

Temperatura de la emulsión y el agregado:

La rotura se demora cuando las temperaturas de la emulsión y el agregado son bajas. Esto es particularmente evidente en el caso de micro-aglomerados.

Tipo y cantidad de emulsivo:

El surfactante empleado en la elaboración de la emulsión determina las características de rotura de los grados de emulsiones para sellados y para mezclas.

Estos factores deben ser considerados en la determinación del tiempo de trabajo luego de que la emulsión ha sido distribuida o ha sido mezclada con el agregado en la obra. La mejor fuente de información es el proveedor de la emulsión.

2.1.1.13. Nomenclatura adoptada para emulsiones asfálticas

Las emulsiones se clasifican también en base a qué tan rápidamente el asfalto puede sufrir coalescencia: es decir: velocidad de rotura con la cual vuelve a ser cemento asfáltico. Los términos RS, MS y SS han sido adoptados para simplificar y normalizar esta clasificación. Son sólo términos relativos y significan rotura rápida (*rapid-setting*), rotura media (*medium-setting*) y rotura lenta (*slow-setting*). La tendencia está estrechamente relacionada con la capacidad de mezcla de una emulsión. Una emulsión RS tiene escasa o ninguna habilidad para mezclar con un agregado, y una emulsión MS se espera que mezcle con agregados gruesos pero no con finos, y una emulsión SS está diseñada para mezclar con agregados finos.

Las emulsiones se subdividen adicionalmente según secuencias de números relacionados con la viscosidad de las emulsiones y dureza de los cementos asfálticos de base. La letra “C” al frente del tipo de emulsión significa catiónica. La ausencia de la “C” significa aniónica o no iónica. Por ejemplo RS-1 es aniónica o no iónica y CRS-1 es catiónica.

Se han adicionado a las normas ASTM, tres grados de emulsión aniónica de alta flotación y rotura media, que se denomina HFMS. Estos grados se utilizan principalmente en mezclas en planta frías y calientes, riegos de sellado de agregados gruesos y mezclas en vía. Las emulsiones de alta flotación tienen una cualidad específica que permite películas de cubrimiento más gruesas sin riesgos de escurrimiento.

Se ha desarrollado un tipo de emulsión de rotura veloz (QS) para las lechadas asfálticas. Su uso está creciendo rápidamente debido a que la exclusiva característica de rotura veloz soluciona uno de los mayores problemas asociados con el uso de las lechadas asfálticas.

2.1.1.14. Uso de las emulsiones asfálticas según tiempo de rotura⁷

2.1.1.14.1. Emulsiones de Rotura Rápida (RS)

Los grados de rotura rápida se han diseñado para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir de la condición de emulsión a la de asfalto. Se usan principalmente para aplicaciones de riego, como tratamientos superficiales, sellados con arena y tratamientos de superficie. Los grados de emulsión de rotura rápida más usados que hay y su aplicación son los siguientes RS-0 (Aplicado a riegos en negro, de curado y en tratamientos superficiales), RS-1 (usado en tratamientos superficiales así también en riego de liga), RS-2 (Tratamientos superficiales) son de alta viscosidad para evitar el escurrimiento.

2.1.1.14.2. Emulsiones de Rotura Media (MS)

Las emulsiones de rotura media se diseñan para ser mezcladas con agregados graduados de preferencia con bajo contenido de árido fino. Debido a que estos grados de emulsiones se formulan para no romper inmediatamente después del contacto con el agregado, ellos se pueden utilizar para recibir una amplia variedad de agregados graduados. Las mezclas

⁷ <http://www.asfaltostrinidad.com/index.php/productos/emulsiones-asfalticas/cationicas-convnecionales>

con emulsiones de rotura media pueden mantenerse trabajables para lapsos que van de algunos minutos a varios meses según la formulación.

Los grados de emulsión de rotura media más usados que hay y su aplicación son los siguientes MS-1(usados en tratamientos superficiales con áridos sucios, también en algunos casos para mezclas abiertas almacenables para bacheo, tiempo de almacenamiento de 48 horas), MS-2 (De baja viscosidad usado en distintos tipos de mezcla, ideal para mezclas abiertas en frío y es almacenable por periodos extensos)

2.1.1.14.3. Emulsiones de Rotura Lenta (SS)

Los grados de rotura lenta se diseñan para lograr mezclas estables. Se emplean con granulometrías cerradas con alto porcentaje de finos. A los grados de rotura lenta corresponden prolongados periodos de trabajabilidad para asegurar una buena mezcla con agregados de granulometría cerrada. Todos los grados de rotura lenta tienen baja viscosidad, que puede ser más reducida con la incorporación de agua. Diluidos, estos grados pueden también ser usados para sellos de liga, riego pulverizado y come paliativos de polvo.

Los grados de emulsión de rotura lenta más usados que hay y su aplicación son los siguientes: SS (Aplicado a mezclas densas en frío, riegos antipolvo, grava emulsión y estabilización de suelos).

También hay otros tipos de emulsión con sus descripciones citadas a continuación.

Emulsiones para impregnación (CI):

Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.

Los grados de emulsión para impregnación más usados que hay y su aplicación son los siguientes: Emulsiones catiónicas de imprimación CI (Aplicada para riegos de imprimación y riegos de liga), Emulsión de imprimación reforzada EIR (Aplicada para todos aquellos riegos difíciles de impregnar logrando penetraciones similares a la de los asfaltos diluidos)

Emulsiones Súper Estables (RSE):

Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos.

Los grados de Emulsiones Súper Estables más usados que hay y su aplicación son los siguientes: CRC (Emulsión catiónica de rotura controlada aplicada la elaboración de Microaglomerados en frío, que permite habilitar el tránsito en 2 horas), RS (De rotura Súper Estable aplicada a mezclas densas en frío, grava emulsión, riegos anti polvo, lechadas asfálticas convencionales, mezclas recicladas en frío).

Además **Emulsiones catiónicas de Reciclado en Frío** CRF que no se profundizaran debido a que no serán aplicadas dentro de este estudio.

Tabla 2.3. Clasificación de las emulsiones según la separación del asfalto respecto del agua.

Tipo de rompimiento	Características	Tiempo de descarga (min.)	Kg. De emulsificante por Ton. de emulsión	% de cemento asfáltico	PH de la solución jabonosa	Aplicación
Rápido	Gran carga efectiva	De 0 a 10	2,0 - 3,5	63 - 65	2,0 - 3,5	Riego de gravilla y de liga
	Poca sedimentación					
	Gran adhesividad					
Medio	Carga efectiva	De 15 a 25	4,0 - 7,0	60 - 62	1,8 - 2,5	Mezclas asfálticas
	Poca sedimentación					
	Buena adhesividad					
Lento	Poca carga efectiva	De 30 a 60	8,0 - 10,0	60 - 52	1,8 - 2,5	Mezclas asfálticas
	Buena adhesividad					
	Sedimentación alta					
Estable	Asentamiento considerable	De 60 a 24 horas	10,0 - 18,0	60 - 62	1,8 - 2,5	Mezclas asfálticas
						Slurry Seal
						Microsuperficies

Fuente: Manual de Emulsiones Asfálticas – QUIMKAO Cia. Ltda.

2.1.1.15. Ensayos realizados a las emulsiones asfálticas

Los ensayos de laboratorio se realizan para medir ya sea el desempeño u otras características de composición, consistencia y estabilidad del material. El propósito de los ensayos es proveer datos para establecer los requisitos de especificación, también para controlar la calidad y uniformidad del producto durante la fabricación y uso, finalmente para predecir y controlar el manejo, el almacenamiento y las propiedades de desempeño en campo de las emulsiones. Las emulsiones asfálticas se clasifican en catiónicas y aniónicas. Los ensayos están diseñados para medir distintas propiedades a las emulsiones y residuos de la emulsión (asfalto residual).

2.1.1.15.1. Viscosidad Saybolt Furol

La viscosidad es la resistencia al flujo de los fluidos y es una propiedad que afecta la trabajabilidad de la emulsión. La viscosidad se mide con el viscosímetro de Saybolt Furol, el resultado de ensayo se reporta en segundos. Además el ensayo se realiza a dos temperaturas: 25°C y 50°C. El método estándar está descrito en AASHTO T 59 o ASTM D 244 “Métodos de ensayo estándares para emulsiones asfálticas”.

2.1.1.15.2. Estabilidad al almacenamiento

El ensayo indica la habilidad de la emulsión para mantenerse como una dispersión uniforme durante el almacenaje. Se detecta la tendencia de los glóbulos a asentarse en un periodo de tiempo de 24 horas. Se coloca un volumen establecido de emulsión en una probeta y se deja reposar, luego se toman muestras de la parte superior e inferior de la probeta. Se calcula el porcentaje de la diferencia del residuo de la parte superior e inferior. También se puede realizar el ensayo para un periodo de tiempo de 5 días. El ensayo se describe en el método AASHTO T 59 o ASTM D 244.

2.1.1.15.3. Demulsibilidad

El ensayo indica la tasa relativa a la cual los glóbulos coloidales de asfalto en la emulsión romperán cuando se esparce en una película delgada alrededor de los agregados o suelo. Así se determina si romperá rápido (RS, rapid setting) o de manera lenta (MS, medium setting). Esto se logra utilizando una disolución de dioctil sulfosucinato de sodio para emulsiones catiónicas o una disolución de cloruro de calcio para emulsiones aniónicas.

2.1.1.15.4. Recubrimiento y resistencia al agua

Este ensayo tiene tres propósitos, pues determina la capacidad de la emulsión para:

Recubrir el agregado totalmente.

Resistir la acción del mezclado mientras se mantiene como una película en el agregado.

Resistir la acción de lavado con agua luego de que se termina el proceso de mezclado

Este ensayo se usa principalmente en emulsiones de rompimiento medio y para determinar un adecuado mezclado con agregados de tipo calcáreo, no se realiza en emulsiones de rompimiento rápido o lento. Se trata de un ensayo de inspección visual de recubrimiento luego de los tratamientos: mezclado con agregado seco, antes y después del lavado y agregado húmedo, antes y después del lavado.

2.1.1.15.5. Mezclado de la emulsión asfáltica

Es un ensayo de mezclado para identificar o clasificar emulsiones de rompimiento lento. Una muestra de emulsión es mezclada con cemento Portland Tipo III y la mezcla es lavada en un tamiz de 1.40 mm (N°14), se indica la capacidad de la emulsión para mezclarse con materiales de una mayor área superficial sin romperse.

2.1.1.15.6. Ensayo del tamiz

Este ensayo también es una medida de calidad y estabilidad de la emulsión. Una muestra de emulsión se hace pasar a través de un tamiz de 850 m (N° 20) y se mide la cantidad de partículas de asfalto u otros materiales retenidos. Por ejemplo, una cantidad excesiva de partículas puede indicar problemas en el manejo y aplicación de la emulsión.

2.1.1.15.7. Destilación del residuo y aceite

La destilación se utiliza para separar el agua del asfalto. Si el asfalto contiene aceite, este se separará junto con el agua. Se pueden medir las proporciones relativas de ligante asfáltico, agua y aceite. Como el asfalto se recupera se le pueden hacer ensayos adicionales al residuo para determinar las propiedades físicas.

La destilación se realiza aumentando la temperatura hasta llegar a 260°C la cual debe mantenerse durante 15 minutos, es importante mencionar que la emulsión casi nunca se trabaja a esta temperatura por lo que es recomendable cambiar la temperatura y el tiempo

del ensayo, pues se puede envejecer alterando las propiedades físicas del residuo de asfalto.

2.1.1.15.8. Ensayos al residuo de asfalto

Al residuo de asfalto se le realizan varias pruebas que también se le realizan al asfalto original, como el ensayo de **gravedad específica** AASHTO T 288 o ASTM D 70, de este ensayo resulta un dato que se utiliza para realizar correcciones a las medidas volumétricas a distintas temperaturas.

Otro ensayo es la medición de la **penetración** AASHTO T 49 o ASTM D 5, que es una medida de la dureza del residuo de asfalto a 25°C, en la muestra del residuo se introduce una aguja con un peso estándar de 100 g durante 5 segundos. La penetración es la distancia que la aguja penetró en la muestra

El ensayo de **ductilidad** AASHTO T 51 o ASTM D 113, mide la capacidad del asfalto para ser estirado hasta un hilo muy delgado. Se moldea una probeta y en un baño se lleva a la temperatura de ensayo, luego se estira a una velocidad constante, la elongación a la cual se corta el hilo es la ductilidad.

La **solubilidad en tricloroetileno** AASHTO T 49 o ASTM D 2042, es un ensayo que mide la porción bituminosa del residuo de asfalto. La parte soluble es la porción de ligante asfáltico mientras que la parte insoluble representa los contaminantes inorgánicos. El ensayo consiste en disolver el residuo, y las partes soluble e insoluble se separan por medio de filtración.

Finalmente, el ensayo de **flotabilidad** AASHTO T 50 o ASTM D 139 se realiza para determinar la resistencia al flujo del residuo a altas temperaturas. Se mide el tiempo que dura el tapón de asfalto en romperse dentro del molde, cuando el agua del baño pasa a través de él.

2.1.1.16. Ventajas de las emulsiones asfálticas

En esta sección se detallan las ventajas que tienen las emulsiones asfálticas sobre los asfaltos rebajados y las mezclas asfálticas en fundido (en caliente).

Es un ligante asfáltico que no es contaminante ni es peligroso, ya que contiene del 35% al 40% de agua como solvente.

Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.

Tiene un límite de almacenamiento y es muy amplio, ya que puede ser almacenado por semanas o meses, debido entre otras cosas a la proximidad que existe en la igualdad de las densidades de sus componentes.

Tiene una gran adhesión con cualquier agregado pétreo, a pesar de condiciones de humedad adversas debido a la enorme dispersión de las partículas de asfalto de tamaño muy pequeño y al uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.

Se aplica en un lapso muy corto de tiempo, lo que permite la pronta funcionalidad de la obra en que se esté usando.

Presenta un bajo costo de la fase dispersante, que es el agua.

Se emplean materiales pétreos locales, lo que elimina la transportación de este tipo de materiales por grandes distancias.

El equipo de aplicación es mucho más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente.

Por su aplicación en frío, ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases tóxicos a la atmosfera.

El empleo del agua como solvente no crea problema de su desperdicio, ya que es recuperable.

2.1.1.17. Uso de las emulsiones asfálticas catiónicas

El asfalto es un importante material termoplástico que es ampliamente usado en la construcción y sus usos se hacen extensivos a las emulsiones asfálticas catiónicas, entre los que destacan:

Usos generales.

Juntas para pavimentos hidráulicos.

Adhesivos.

Selladores.

Impermeabilizantes.

Recubrimiento de tubería especial.

Para tratamientos superficiales, para pavimentos asfálticos, en carreteras y aeropistas:

Riegos de impregnación.

Riegos de imprimación o penetración.

Riegos negros con emulsión diluida.

Riegos de liga

Riegos de sello con arena o gravilla seleccionada.

Morteros asfálticos (slurry seal).

Bacheo.

En la masa o mezcla asfáltica, para carreteras y aeropistas.

2.1.1.18. Consideraciones en el almacenamiento de emulsiones asfálticas⁸

La emulsión asfáltica, una dispersión de finas gotitas de cemento asfáltico en agua, tiene las ventajas y desventajas propias del medio de dispersión, el agua. Cuando se almacena emulsiones asfálticas:

SI almacene la emulsión como almacenaría agua líquida –entre 10°C (50°F) y 85°C

(185°F), dependiendo del uso buscado y el producto en cuestión.

SI almacene la emulsión a la temperatura especificada para el grado y aplicación particulares. La *Tabla 2.7.* muestra los rangos de temperaturas normales para almacenamiento.

NO permita que la emulsión asfáltica sea calentada por encima de los 85°C (185°F). Las temperaturas elevadas evapora el agua, modificando las características de la emulsión asfáltica

NO permita que la emulsión asfáltica se congele. Esto produce la rotura de la emulsión, separando el asfalto del agua. El resultado será dos capas – una de asfalto, otra de agua –

⁸ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

en el tanque, ninguna de las cuales será adecuado para el uso deseado; además será difícil vaciar al tanque.

NO permita que la temperatura de la superficie de calentamiento exceda los 100°C (212°F). De suceder esto, se producirá la rotura prematura de la emulsión sobre aquella.

NO use aire a presión para agitar la emulsión. Puede causar la rotura de la emulsión. Los tanques de almacenamiento deberían estar aislados térmicamente, para proteger la emulsión contra el congelamiento y para un mejor aprovechamiento del calor. En la superficie de las emulsiones expuestas al aire se puede formar una piel (*skin*) de asfalto.

Consecuentemente, es mejor utilizar tanques verticales de gran altura, en los que se expone al aire la menor superficie de emulsión asfáltica. Los tanques fijos de almacenamiento, en su mayoría son verticales, pero para almacenamiento de corto plazo en el campo a menudo se emplean tanques horizontales llenos, minimizando así el área expuesta al aire.

Tabla 2.4. Temperaturas de almacenamiento para emulsiones asfálticas.

Temperaturas de almacenamiento para emulsiones asfálticas		
Grado	Temperatura °C	
	Mínimo	Máximo
RS-1	20°	60°
RS-2, CRS-1, CRS-2, HFRS-2	50°	85°
SS-1, SS-1h, CSS-1, CSS-1h, MS-1, HFMS-1	10°	60°
CMS-2, CMS-2h, MS-2, MS-2h, HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s	50°	85°
Nota: RS: rotura rápida; CRS: catiónica de rotura rápida; HFRS: rotura rápida de alta flotación; SS: rotura lenta; CSS: catiónica de rotura lenta; MS: rotura media; HFMS: rotura media de alta flotación; CMS: catiónica de rotura media.		

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 19 (MS-19).

2.1.1.19. Variables que afectan la calidad y el rendimiento de la emulsión⁹

Hay muchos factores que afectan la producción, almacenamiento, uso, y rendimiento de una emulsión asfáltica. Sería difícil identificar uno solo de ellos como el más significativo.

Entre las variables de importancia tenemos:

Propiedades químicas de la base de cemento asfáltico.

Dureza y porcentaje de la base de cemento asfáltico.

Tamaño de las partículas de asfalto en la emulsión.

Tipo y concentración del agente emulsivo.

Condiciones de elaboración, tales como temperatura, presión, y esfuerzo para separar las partículas de asfalto.

Carga iónica en las partículas de emulsión.

Orden en que se agregan los elementos.

Tipo de equipo empleado en la elaboración de la emulsión.

Propiedades del agente emulsivo.

Adición de modificadores químicos o de polímeros.

Calidad del agua (dureza del agua).

2.1.2. Agregados pétreos

2.1.2.1. Definición

Un agregado pétreo se define como cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos y que forma parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente o en frío. Conocido también como material granular o agregado mineral.

2.1.2.2. Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño¹⁰

Los agregados pétreos que se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica se clasifican de la siguiente forma:

⁹ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

¹⁰ Tesis de grado. "Diseño de mezclas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la universidad de Illinois". El Salvador.

2.1.2.2.1. Agregado grueso

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4.

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca que varían en su tamaño entre 2 mm y 7,62 cm de diámetro. Si estas son acarreadas por las aguas, tienen forma redondeada. Suele encontrarse en forma suelta en los lechos, en los márgenes y conos de deyección de los ríos, también en depresiones de terreno rellenos conocidas como canteras.

2.1.2.2.2. Agregado fino

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200.

Están formadas por granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 0.05 mm y 2 mm de diámetro. El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Las arenas estando limpias no sufren contracciones al secarse, no son plásticas y al aplicárseles carga se comprimen casi instantáneamente.

El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento. (Guevara Palma Marlon Rodolfo, 2010)

2.1.2.2.3. Polvo mineral (Filler)

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200.

El filler o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mastico para mezclas asfálticas.

2.1.2.3. Propiedades de los agregados pétreos¹¹

Las propiedades de los pétreos, sean estas físicas o mecánicas, varían con su graduación, su contenido de humedad, su posición vertical con relación a la superficie y su localización geográfica. Los agregados pétreos deben cumplir las siguientes propiedades para ser considerado apropiado para una mezcla asfáltica

2.1.2.3.1. Gradación y tamaño máximo de partícula

Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones. Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se somete a cargas directas.

2.1.2.3.2. Limpieza

En los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Dentro de estos se tienen vegetación, arcilla esquistosa, terrones de arcilla, materia orgánica, etc.

2.1.2.3.3. Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento.

2.1.2.3.4. Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla, la cantidad de fuerza necesaria para compactarla y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas irregulares y angulares proporcionan las mejores características.

¹¹ Tesis de grado. "Diseño de mezclas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la universidad de Illinois". El Salvador.

2.1.2.3.5. Textura de la superficie

Es un factor que determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla y las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Según la textura, los agregados pueden ser rugosos o lisos.

2.1.2.3.6. Capacidad de absorción

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información, pues un agregado poroso requiere mayores cantidades de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

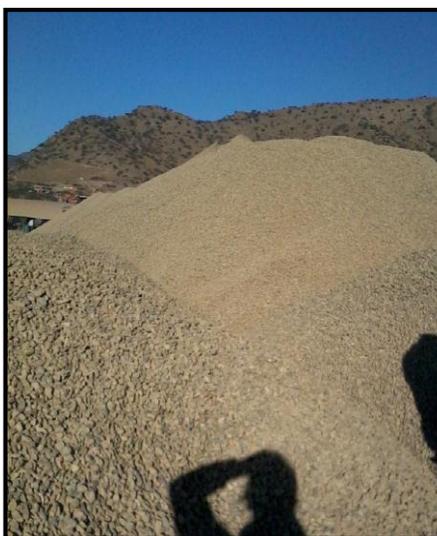
2.1.2.3.7. Afinidad con el cemento asfáltico

Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

2.1.2.4. Características y selección de materiales pétreos

Los materiales pétreos para construir mezclas asfálticas son de suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos de depósitos naturales denominados minas o rocas, los cuales, por lo general requieren cribados y triturados para mejorar ciertas características de comportamiento.

Imagen 2.8. Agregados, lavados, triturados y separados por tamaños.



Fuente: Elaboración propia

Analizando las propiedades antes vistas los agregados de textura rugosa, equidimensionales, proporcionan más resistencia interna que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte masa de material.

Para la selección de las muestras se tendrá en cuenta que cumpla con las condiciones exigidas en normas. La muestra se extrajo cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en el manual de ensayos de suelos y materiales * asfaltos (método para extraer muestras ASTM C75 o AASTHO T2-92). El mismo que consiste extraer del acopio porciones de áridos en distintos niveles y ubicaciones redondeando el acopio, evitando sacar materiales de las zonas inferior y superior del mismo.

Imagen 2.9. Tipos de agregados.

Agregado redondeado

Agregado angular

Fuente: Elaboración propia.

Las características más importantes que se deben tomar en cuenta para los agregados para diseñar mezclas asfálticas son: la granulometría, desgaste en la máquina de Los Ángeles, peso específico del agregado grueso y fino, equivalente de arena, con el fin de garantizar la calidad del pavimento.

Todos estos ensayos son de mucha importancia y deben satisfacer las normas correspondientes, pues como los materiales pétreos se cubren por completo con el asfalto, si la granulometría cambia, también cambia la superficie a cubrir. Ya que la superficie a revestir resulta más afectada al aumentar o disminuir los finos que cuando hay un cambio en las partículas gruesas.

2.1.2.5. Pruebas realizadas a los agregados para el diseño

Véase en marco normativo 2.2.

2.1.3. Mezclas asfálticas

2.1.3.1. Definición

Las mezclas asfálticas, que también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado. Se producen en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y compactan.

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

Están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Estos 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.

En nuestro medio el método comúnmente utilizado es el método Marshall. Y para mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados se ha introducido una normativa Estadounidense de la Universidad de Illinois denominada ensayo método Marshall modificado.

2.1.3.2. Clasificación de las mezclas asfálticas

2.1.3.2.1. Por la temperatura puesta en obra

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

Mezclas Asfálticas en Frío (Cold Mixes):

Se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 60°C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan bien emulsiones, o bien betún espumado.

Mezclas Asfálticas Semi-Templadas (Half Warm Mix Asphalt):

Este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.

Mezclas Asfálticas Templadas (Warm Mix Asphalt):

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

Mezclas Asfálticas en Calientes (Hot Mix Asphalt):

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

En la *imagen 2.10*, que se muestra a continuación es posible visualizar los tipos de mezclas asfálticas en función a su temperatura.

Imagen 2.10. Clasificación de las mezclas asfálticas por su temperatura puesta en obra.

2.1.3.2.2. Por fracciones de agregado pétreo empleado¹²

Masilla asfáltica:

Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico:

Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico:

Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico:

Agregado grueso más ligante asfáltico.

2.1.3.2.3. Por porción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

Mezclas Cerradas o Densas:

La proporción de vacíos no supera el 6%.

Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:

La proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.

Mezclas Abiertas:

La proporción de vacíos supera el 12%.

Mezclas Porosas o Drenantes:

La proporción de vacíos es superior al 20%.

2.1.3.2.4. Por tamaño máximo de agregado pétreo

Mezclas Gruesas:

Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

¹² Recopilación de investigaciones Tesina “Análisis a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas” Cap. 3 Mezclas Asfálticas Pág. 45

Mezclas Finas:

Son mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

2.1.3.2.5. Por la estructura del agregado pétreo**Mezclas con esqueleto mineral:**

Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos.

Mezclas sin esqueleto mineral:

No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.1.3.2.6. 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. (Rodríguez, 2004, pág. 45.)

2.1.3.3. Características de la mezcla asfáltica

Se puede analizar una muestra del pavimento preparado en el laboratorio para determinar su posible desempeño que tendrá en la estructura del pavimento. El análisis se centra en las cuatro características de la mezcla y su efecto sobre el comportamiento de la mezcla.

Las cuatro características son:

2.1.3.3.1. Densidad

La densidad de una mezcla prensada se define como su gravedad específica (el peso del volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante, ya

que es importante tener una alta densidad en el revestimiento terminado para obtener un buen rendimiento.

2.1.3.3.2. Vacíos de aire

Un vacío de aire es un espacio de aire pequeño presente en el agregado revestido en la mezcla compacta final. Todas las mezclas altamente densas deben tener un cierto porcentaje de vacíos para permitir cierta compresión dependiendo del tráfico y proporcionar espacio para que fluya el asfalto durante esta compresión adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestra de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

2.1.3.3.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas en la mezcla de pavimento compactado, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

VAM es un espacio disponible para acomodar un volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción en el agregado)

Y la cantidad de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto más VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Hay valores mínimos para VAM, que se recomiendan y especifican según el tamaño de la unidad. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa es la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más fuerte será la mezcla.

2.1.3.3.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe determinarse con precisión en el laboratorio y controlarse con precisión en el trabajo. El contenido de asfalto de una mezcla en particular se establece utilizando los criterios determinados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de la mezcla dependerá en gran medida de la naturaleza del agregado, como el tamaño de partícula y la absorbencia.

Las medidas del tamaño de partícula de los aglomerados están directamente relacionadas con el contenido óptimo del asfalto. Cuanto más fina sea la escala de la mezcla, mayor será el área de superficie total y mayor será la cantidad de asfalto necesario para cubrir todas las partículas de manera uniforme. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) requieren menos asfalto debido a la menor superficie total.

2.1.3.4. Propiedades físicas de las mezclas asfálticas¹³

La construcción de la mezcla de asfalto consiste básicamente en la elección del tipo y la granulometría del agregado utilizado, así como la elección del tipo y el contenido del asfalto.

Estas se rigen en las correspondientes propiedades de una mezcla asfáltica:

Estabilidad:

La estabilidad del asfalto es la capacidad de soportar el desplazamiento y la deformación en las cargas de tráfico. La forma estable del pavimento y la suavidad se pueden mantener bajo cargas repetidas. Los caminos pavimentados inestables tienen otros signos que indican un cambio en la forma de estructuras rugosas onduladas y mixtas.

Durabilidad:

Esta es una medida en que el asfalto puede mantener las propiedades originales cuando se expone a procesos normales de envejecimiento y degradación.

Flexibilidad:

Esta es la capacidad del pavimento de asfalto para adaptarse a los movimientos y asentamientos de la base sin sufrir ninguna grieta.

Resistencia a la fatiga:

Esta es la capacidad del pavimento de resistir los esfuerzos asociados con el tránsito en pases repetidos ("Vida útil").

¹³ Tesis de Grado "Evaluación del desempeño del Hormigón Asfáltico con plástico polietileno para vías de segundo orden" Pag. 8

Resistencia al deslizamiento:

Es una cualidad que debe presentar un pavimento especialmente mojado para ofrecer resistencia al patinaje o a la posibilidad de hidropneumático.

Trabajabilidad:

Es la propiedad que hace a la mezcla fácil de manejarla, colocarla y darle acabado. (Cañar, 2018, pág. 8)

2.1.4. Mezclas con emulsiones asfálticas**2.1.4.1. Mezcla asfáltica en frío (MAF)**

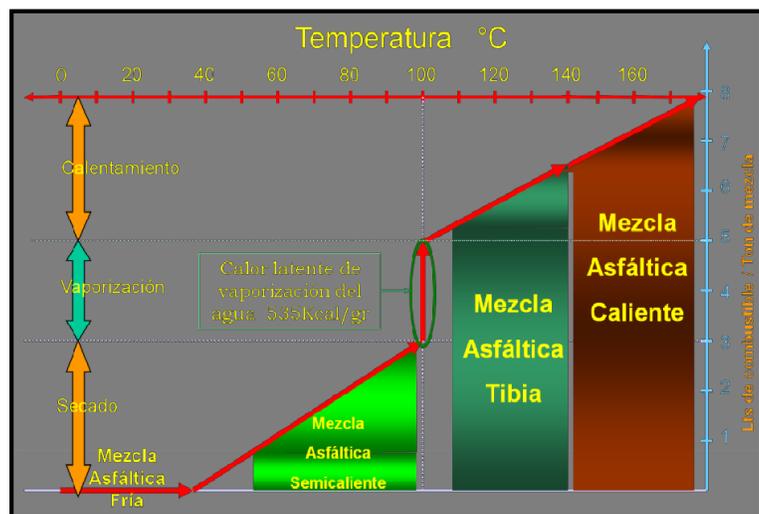
Son las mezclas constituidas por la combinación de uno o más agregados pétreos, con una emulsión asfáltica (que no es más que asfalto emulsionado en agua antes de ser mezclado con el agregado) y, eventualmente, en agua. En este estado de emulsión el asfalto es menos viscoso y la mezcla es más fácil de compactar y trabajar. La emulsión romperá luego de que suficiente agua se haya evaporado y la mezcla en frío comienza a tener buena resistencia. Estas mezclas se afectan con asfaltos líquidos y sin recurrir al calentamiento de los agregados. Se utilizan comúnmente para material de bacheo y rutas de bajo tránsito.

Esas mezclas poseen capacidad portante por esta razón es que se considera su aporte en el paquete estructural. Los agregados gruesos son exclusivamente provenientes de trituración. Los agregados finos, conviene que provengan de la mezcla de arenas trituración, que ofrecen la trabazón necesaria, y arenas silíceas naturales que le otorgan la trabajabilidad a la mezcla.

Son ideales para pavimentación urbana de arterias que sean sometidas a bajos volúmenes de tránsito y donde ese tránsito sea exclusivamente de automóviles. Se recomienda su puesta en obra a temperaturas no inferiores a los 20°C ni superiores a los 40°C.

En la siguiente *imagen 2.11*. se muestran los rangos de temperatura que deben considerarse para la producción de mezclas asfálticas.

Imagen 2.11. Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas.



Fuente: (Medina, 2012, pág. 18)

Se muestra un resumen de la recomendación del uso de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados para la fabricación de los distintos tipos de mezclas en frío en la *Tabla 2.9*. Véase en el marco normativo.

Las emulsiones asfálticas contienen pequeñas cantidades de solventes que generalmente producen el mejor resultado para las mezclas en frío, utilizadas para bacheo. La mezcla se rigidiza cuando el solvente se evapora. A la hora de dosificar el agua dentro de la mezcla se debe tomar en cuenta, el tiempo con el que se dispone para abrir el tránsito nuevamente.

2.1.4.2. Diseño de mezclas con emulsión asfáltica¹⁴

No hay un método universalmente aceptado para el diseño de mezclas en frío de emulsión asfáltica y agregados, sean aquellas de granulometría abierta o de granulometría cerrada. Sin embargo, casi todos los métodos para granulometría cerrada son modificadores del método de ensayo Hveem (ASTM D1560 Y 1561 o AASHTO T-246 y 247) o del método Marshall (ASTM D 1559 o AASHTO T-245).

¹⁴ Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

2.1.4.2.1. Método Marshall modificado aplicado a mezclas con emulsiones asfálticas

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

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, con la diferencia de las temperaturas en el preparado de agregado y previo al rompimiento de las briquetas ya que deberá ser a temperatura ambiente de entre mínimo 20°C a un máximo de 40°C

Preparación de especímenes para el ensayo:

Prepare tres o más lotes, para cada uno de ellos un mínimo de tres diferentes contenidos de emulsión, uno por encima del contenido de prueba y otro por debajo. Se debe tomar en cuenta que si la mezcla de prueba está muy seca se debe aumentar uno o dos porcentajes por encima, o al contrario si está muy rica, disminuir uno o dos porcentajes de emulsión para las mezclas restantes.

Una diferencia normal entre los contenidos de emulsión es de 1,0% o 0,65% en el contenido de residuo asfáltico claro esta para una emulsión de residuo de 65%.

Procedimiento de mezclado:

Pese en boles¹⁵ para mezcla adecuados, la correcta cantidad de agregado del proyecto en condición húmeda (cantidad corregida a peso seco), para obtener un espécimen compactado cuya altura es de $63,5 \pm 6$ mm ($2,5 \pm 0,25$ pulgadas), todo esto con cada pastón. La cantidad normalmente necesaria es alrededor de 1200 gramos de agregado seco. Debe ponerse cuidado en que el agregado para cada pastón¹⁶ sea representativo del agregado del proyecto. De ser necesario el agregado puede ser secado, separado en diferentes tamaños, y luego recombinado para el peso requerido para cada pastón.

¹⁵ **Boles:** Recipiente de forma hemisférica utilizado para mantener, mezclar o servir

¹⁶ **Pastón:** Referente a cantidad de masa en nuestro caso mezcla

Si se necesita agua de premezclado pese agregándola al agregado, la cantidad predeterminada realizando previamente el ensayo de recubrimiento de partículas y mezcle durante 10 segundos o hasta que la humedad este uniformemente distribuida. Esto debe realizarse inmediatamente antes de la adición y mezclado de la emulsión.

Pese, agregándola, la cantidad predeterminada de emulsión sobre el agregado con humedad ambiente y remueva vigorosamente durante 60 segundos o hasta que la emulsión se haya dispersado lo suficiente en la mezcla.

Procedimiento de compactación:

A menudo y previamente a la compactación es necesario secar o airear la mezcla. En el momento en el que el volumen de líquido total (emulsión + agua en el agregado) excede los vacíos en el agregado mineral VAM mas cualquier volumen de líquido absorbido, no se puede lograr una compactación adecuada. Esta condición puede ser detectada si el martillo del método Marshall rebota y/o el espécimen exuda líquido. Cuando esta condición se da, coloque la mezcla en una bandeja y utilice un ventilador y remueva ocasionalmente la mezcla para reducir el contenido de humedad de modo que pueda lograrse una compactación apropiada.

Limpie completamente el molde para el espécimen y la cara del martillo de compactación.

Coloque un disco papel en el fondo del molde antes de volcar la mezcla. Coloque la totalidad del pastón dentro del molde y con una espátula aplique vigorosamente 15 golpes alrededor del perímetro y 10 golpes en el interior del molde. Con la espátula alise la superficie de la mezcla dándole una forma ligeramente redondeada.

Coloque el molde sobre el pedestal trábelo y aplique 50 golpes con el martillo de compactación con una caída libre de 457,2 mm (18,0 pulgadas). Quite la base del molde y el collar e invierta el espécimen moldeado, re ensamblarlo en el molde. Aplique otros 50 golpes de compactación esta vez sobre la cara libre del espécimen invertido.

Retire la base, el collar y los discos de papel y coloque el molde con el espécimen compactado en su interior sobre sobre un estante perforado en una estufa de circulación forzada a 60°C (140°F) y durante 48 horas para algunas mezclas puede ser necesario

empujar el espécimen hacia abajo nivelándolo con el fondo del molde, de modo que este realice su curado a temperatura ambiente o en un horno no excediendo los 60°C. Deje enfriar el espécimen en el molde durante una hora como mínimo, previamente a su desmoldado para ser ensayado.

Ensayado de especímenes compactados:

Si se desea, partiendo de los especímenes compactados se puede determinar los valores aproximados de los parámetros volumétricos y de la estabilidad. Los parámetros volumétricos a menudo no son evaluados, se los calcula solo como aproximaciones debido a la posibilidad de que haya algo de humedad en los especímenes compactados y curados y el gran número para valores más exactos. Si se desean valores más precisos deben de tenerse en cuenta la humedad existente en los especímenes compactados y la máxima densidad teórica debe ser determinada con una mezcla suelta, libre de humedad.

Ensayo de estabilidad:

La estabilidad y fluencia en el ensayo de Marshall se la determinan siguiendo los procedimientos de ASTM D-1559 comenzando por el párrafo 5 (Procedente, procedimiento), con la excepción de que los especímenes compactados serán colocados en un baño al aire por un mínimo de 2 horas a la temperatura de ensayo, para luego en baño maría a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$.). Para la mayoría de los pavimentos con bajo a medianos volúmenes de tráfico, se ha encontrado que una estabilidad de 2224 N (500 libras) o mayor es satisfactoria. La experiencia local puede justificar un diferente valor mínimo de estabilidad.

2.1.4.3. Virtudes de las mezclas asfálticas en frío

Se fabrican y colocan a temperatura ambiente.

Se pueden almacenar a temperatura ambiente por periodos de 5 a 6 meses, dependiendo las condiciones de almacenamiento.

Tiene más vida útil, pues no se calienta. El asfalto entre más se calienta, menos vive.

Es seguro para los operarios que lo aplican, pues minimizan los riesgos operacionales.

No contaminan el medio ambiente, pues no emiten vapores al colocarlas.

Ahorra combustibles y energía, ya que se fabrica en frío completamente.

2.1.4.4. Uso principal de las mezclas con emulsiones asfálticas

Los progresos en la tecnología de emulsiones asfálticas hacen posible el empleo de mezclas con emulsiones con una amplia variedad de aplicaciones en construcción, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos. La tabla enumera los principales usos de las mezclas de emulsiones asfálticas:

Tabla 2.5. Usos principales de las mezclas con emulsiones asfálticas.

Uso de la mezcla.	Propósito del tratamiento con emulsión.
Como una ayuda constructiva.	Facilitar la construcción del pavimento y en algunos casos proveer una plataforma de trabajo
Mejoramiento del comportamiento de agregados marginales.	Mejorar el agregado, alcanzando la calidad de una buena base sin tratar.
Como una superficie de rodamiento temporaria.	Proveer una superficie que pueda ser utilizada hasta que se coloca, con carácter de pavimento permanente, una mezcla asfáltica en caliente o una mezcla con emulsión de alta calidad.
Reducir el espesor total del pavimento.	Incrementar la resistencia de los materiales del pavimento y reducir el espesor necesario de la estructura con respecto al espesor correspondiente a materiales sin tratar.
Mezclas abiertas para carpetas y bases	Producir una mezcla de alta calidad para tráfico muy intenso. Estas mezclas tienen buena flexibilidad y resistencia a la deformación permanente.
Superficie de rodamiento de granulometría cerrada.	Producir una mezcla para carpetas estables que no sufrirán ahuellamientos ni desplazamientos
Sub-base de pavimentos	Permitir el uso de agregados de menor calidad para la elaboración de sub-bases aceptables. Para esta aplicación, se pueden usar arenas, arenas limosas y arenas y gravas de pobre graduación.
Mezclas de mantenimiento de uso inmediato y para acopio	Proveer mezclas de bacheo trabajables que pueden ser diseñadas para almacenamiento inmediato o para almacenamiento a largo plazo

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

Para entender bien el comportamiento de una mezcla asfáltica emulsionada deberemos primero conocer las propiedades generales de las emulsiones asfálticas y sus usos.

2.1.4.5. Precauciones a considerar en el colocado de mezclas con emulsión asfáltica.

Las mezclas cerradas tienen normalmente buena resistencia al daño por agua durante construcción, sin embargo, si llueve antes del curado de la mezcla, el tráfico debería ser desviado hasta lograr el curado y la necesaria compactación.

El contenido de agua no debiera ser más que el necesario para dispersar adecuadamente la emulsión y lograr una buena trabajabilidad de la mezcla.

Los materiales deberían mezclarse solo lo suficiente para dispersar adecuadamente la emulsión. El exceso de mezclado puede causar la rotura prematura de la emulsión y el desprendimiento del asfalto del agregado.

Para un curado más rápido, colocar la mezcla en varias capas delgadas antes que en una capa gruesa.

Estas mezclas no deberían ser selladas demasiado pronto. Ya que el agua atrapada y destilados de petróleo pueden causar problemas.

Si el tráfico causa desprendimientos, el material suelto debería ser barrido tan pronto como fuese posible, para evitar un daño posterior a la superficie. Si el desprendimiento continuo, debería realizarse riego pulverizado sobre la superficie, con una ligera aplicación de una emulsión lenta (SS 6 CSS) diluida en agua. La distribución unitaria y la cantidad de agua para el diluido pueden variare según la necesidad para evitar el levantamiento del material por el tráfico. (Association)

2.1.5. Polímeros

2.1.5.1. Definición

El polímero es definido como la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones. Algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran significación comercial como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, proteína del pelo de las

ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de hevea y de los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción inter moleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

2.1.5.2. El plástico Tereftalato de Polietileno (PET)

Es una sustancia sintética de estructura macromolecular por su gran cantidad de moléculas de hidrocarburos, alcoholes y otros compuestos orgánicos. Fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J.T. Dicknson en 1941 y comenzó a ser utilizado a partir de 1955 para la producción de envases de líquidos y es totalmente reciclable, lo que le da un valor agregado.

El PET es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. Y se caracteriza por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y aroma de los alimentos, es una barrera contra los gases, reciclable 100% y con posibilidad de producir envases reutilizables, lo cual ha llevado a desplazar a otros materiales.

El PET es el material plástico con el cual se elaboran los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otras. Las botellas son desechables, por lo que su destino suele ser la bolsa de basura y, por extensión, los rellenos sanitarios.

2.1.5.2.1. Propiedades del plástico Tereftalato de Polietileno (PET)

En general los plásticos se caracterizan por alta resistencia respecto de su densidad, aislamiento térmico, aislamiento eléctrico, resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes, entre otros.

De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad.

Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y los de mayor peso molecular, grado ingeniería. Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas.

Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado.

Específicamente el Tereftalato de Polietileno (PET) presenta las siguientes características relevantes:

Buen comportamiento ante esfuerzos permanentes

Alta resistencia al desgaste

Buen coeficiente de deslizamiento

Buena resistencia química

Buenas propiedades térmicas

Con estos datos se puede asumir que el PET posee propiedades adecuadas para utilizarlo como material alternativo en una mezcla asfáltica.

Tabla 2.6. Datos técnicos del Tereftalato de Polietileno (PET).

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,34-1,39
Resistencia a la tensión	M/Pa	59-72
Resistencia a la compresión	M/Pa	76-128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0,01-0,04
Dureza	-	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15,2-24
Resistencia al calor	°C	80-120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780-15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	-	3,65
Absorción de agua (24 h)	%	0,02
Velocidad de combustión	Mm/min	Consumo Lento
Efecto luz solar	-	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	-	Excelente
Calidad óptica	-	Transparencia a opaco
Temperatura de fusión	°C	244-254

Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>.

2.1.5.2.2. Tipos de reciclaje del plástico Tereftalato de Polietileno (PET)

Reciclado químico:

Se define como la ruptura de los residuos plásticos en fracciones utilizables para su posterior transformación en monómeros u otros productos químicos.

Reciclado mecánico:

Este proceso es menos costoso que el reciclado químico, está dirigido a la recolección y separación de envases, trituración, lavado y extrusión del material polimérico. Con este proceso se obtienen hojuelas que mediante la acción del calor se utiliza para obtener nuevas piezas. Así mismo, estas hojuelas se emplean como agregado fino en concretos para disminuir costos en obra.

Recuperación energética:

Aquellos productos y materiales que no pueden ser reciclados de una forma económica y medio ambientalmente viable son generalmente incinerados bajo condiciones controladas para la obtención de energía.

2.1.5.2.3. Proceso de reciclado mecánico de plástico Tereftalato de Polietileno (PET)

El proceso de reciclaje mecánico es fundamentalmente el mismo para los distintos plásticos, y se definió el proceso en los siguientes pasos:

Acopio:

Las botellas de PET para reciclado proviene de programas de recolección y de acopiadores ambulantes, éstos contribuyen, a limpiar las calles y a reducir las cantidades de residuos que llegan al relleno sanitario. Idealmente, la separación de desechos se debe hacer por los consumidores, antes del recojo de desechos y una vez separados llevarlos a centros de acopio, a falta de una recolección diferenciada, el papel de los recolectores es fundamental.

Compactado:

El material se compacta para reducir su volumen y así facilitar su transporte y almacenamiento. Generalmente las dimensiones de estos bloques o pacas de PET es de 153 x 130 x 85 cm., donde cada una podría alcanzar un peso de 200 a 600 kg, según el grado de compactación o la eficiencia del prensado. Cuando se realiza el compactado, las pacas deben ser posteriormente abiertas y picadas tal como llegan a la planta, es decir con tapas y etiquetas. Sin embargo, cuando a la planta llegan botellas sueltas, el volumen es mayor, pero la posibilidad de realizar el desetiquetado y destapado permiten obtener un producto más fácil de tratar.

Molido:

Se realiza el molido (o picado) para facilitar la separación de los diferentes tipos de polímeros del material (si es que éste ha sido compactado) y la limpieza del material picado. En la reducción de tamaño del PET puede llegarse a obtener hojuelas de media, un cuarto de pulgada o finalmente polvo, según el diseño y el tipo de molino del que se disponga.

Separación:

La separación libera al PET de diferentes tipos de materiales, como otros tipos de polímeros, metales, vidrio o papel. Si existiesen familias de polímeros inmiscibles juntas, las unas crearían fases dentro de las otras y durante el procesado puede existir degradación o quemado, éstos perjudicarían el proceso de reciclaje; y si existiesen partículas metálicas afectarían la calidad del producto. La macro separación se hace destapando y desetiquetando la materia prima completa (botellas desechadas) manualmente. La micro separación se hace por una propiedad física específica como el tamaño, peso o densidad. La separación molecular, involucra procesar el plástico por disolución y luego separar los plásticos basados en temperatura. Otra alternativa es tener sistemas de flotación o burbujeo, en las tinas de flotación vibratorias con bandas transportadoras el PET con una densidad mayor cae al fondo y es recogido por un tornillo sinfín que lo transporta a la siguiente etapa.

Limpieza:

Las hojuelas o flakes de PET están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, aceite, solventes y en algunos casos pegamento. De ahí que tienen que ser limpiados en un baño que garantice la eliminación de contaminantes. El uso de hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado es una alternativa, el plástico contaminado es removido al ser ligero ya que flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan. Después del proceso de limpieza, se obtiene hojuelas limpias.

Secado:

Este proceso elimina el remanente de humedad del material. Pueden usarse secadores centrifugados o secadores de aire, ya sea caliente o frío, que circula entre el material molido, eliminando la humedad.

El granulado limpio y seco puede ser usado en diferentes industrias.

2.1.5.2.4. Costo del plástico Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado¹⁷

Entre otros materiales de reciclaje están las botellas PET (polietileno tereftalato) que involucran a envases de gaseosas, y el plástico sople, que son botes de lavandina, shampoo, alcohol. En cuanto a bolsas de plástico, solo se reciclan por el momento envolturas de las gaseosas. El kilo de botellas PET vale 1,3 bolivianos y por el kilo de plástico sople se paga 1 boliviano. (Alfaro, 2014)

2.1.6. Mezclas con emulsiones asfálticas modificadas¹⁸

2.1.6.1. Antecedentes de estudio

A lo largo de los últimos tiempos donde se hizo más habitual el uso de las emulsiones asfálticas, al igual que las mezclas en caliente se buscó la mejora de las propiedades mecánicas de las mezclas en frío, a través de la adición dentro de sus componentes de distintos materiales y aditivos volviendo a estas mezclas asfálticas modificadas.

En busca de la mejora de resultados en la mezcla se observó la modificación dentro del agregado con distintos componentes como ser fibra producto de desechos industriales, vidrio, poli estireno, polietileno en distintas clases, desechos de construcción, cal, cemento, limaduras metálicas y demás. Logrando en ocasiones obtener una mezcla con emulsión asfáltica más económica, ambiental y de seguridad.

Asi tambien se logró apreciar en estos últimos años la incorporación de polímeros en el asfalto o la emulsión dando mejores resultados en la mezcla asfáltica.

Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual.

Los asfaltos más ricos en fracciones aromáticas y resinas serán los más compatibles, ya que estas fracciones son las que permiten que el polímero se disuelva.

¹⁷ Dato extraído del periódico El País Tarija

¹⁸ Tesis de Grado “Evaluación del desempeño del Hormigón Asfáltico con plástico polietileno para vías de segundo orden”

Imagen 2.12. Compatibilidad asfalto-polímero.

Fuente: Conferencia: Introducción a la Química del asfalto por: Ing. German Garzón, Costa Rica 2004.

El comportamiento del asfalto depende básicamente de tres factores:

Temperatura

Envejecimiento

Tiempo de carga

A altas temperaturas y bajo cargas sostenidas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, es una mezcla plástica la cual provoca ahuellamiento. A bajas temperaturas y bajo cargas rápidas se vuelve frágil, ocasionando grietas transversales y agrietamiento térmico.

El objetivo perseguido con la adición de polímeros al asfalto es el de mejorar su reología, buscando:

Disminuir la susceptibilidad térmica. Disminuir la fragilidad en climas fríos y aumentar la cohesión en tiempos de calor.

Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de carga

Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempo de carga.

Mejorar la adherencia a los agregados.

2.1.6.2. Aplicación de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en mezclas con emulsiones asfálticas¹⁹

El plástico polietileno reciclado, puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como Proceso por Vía Húmeda y Proceso por Vía Seca.

En el proceso por vía Húmeda, el plástico polietileno actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que, en el proceso por vía seca, el plástico es usado como una porción del agregado.

A continuación, se muestra la terminología asociada al uso del tereftalato de polietileno reciclado en mezclas asfálticas:

2.1.6.2.1. Proceso vía húmeda

En este proceso, se unen el Tereftalato de polietileno (PET) reciclado con el cemento asfáltico para producir la mezcla modificada llamada Asfalto- Polietileno, que es usada de la misma manera que un ligante modificado. Este proceso se encuentra definido en la Norma ASTM D8-88.

La fabricación de asfalto-polietileno consiste en la mezcla del Tereftalato de polietileno reciclado, usualmente tamaño 2 a 4 mm o en lo posible menor para mejor incorporación del mismo, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición de plástico polietileno reciclado es entre 10% - 20% con respecto al peso del ligante.

Para promover la unión del asfalto y el polietileno, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 150°-200°C por 1 a 4 horas.

Dentro del proceso húmedo, se establece que el estanque agitador debe estar en terreno, ubicado junto a la planta asfáltica. Una vez que el asfalto-polietileno alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora, en un proceso continuo, al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos.

¹⁹ Tesis de Grado “Evaluación del desempeño del Hormigón Asfáltico con plástico polietileno para vías de segundo orden”

En el siguiente esquema, se muestra la fabricación de las mezclas asfalto-polietileno por proceso de vía húmeda.

Imagen 2.13. Esquema fabricación de las mezclas (Asfalto-Polietileno) por vía húmeda.



Fuente: Tomado de <http://rubberizedasphalt.org/how.htm>.

Una vez terminado el mezclado del asfalto-polietileno con los agregados pétreos, el concreto asfáltico obtenido se transporta al sitio de pavimentación y se coloca por medio de una finisher tradicional. Par la compactación, generalmente se utiliza un rodillo liso doble tambor.

En el caso de emulsiones asfálticas la mezcla polietileno-emulsión se la realiza de manera manual exponiendo la emulsión a temperatura constante en el horno a 140°C empleando un tiempo de 10 minutos hasta tener la reacción del cemento asfáltico residual donde posteriormente se vierte el polímero PET de manera homogénea, y se vuelve a dejar en el horno por otros 10 minutos no más debido a que el agua facilita la unión del polímero con la emulsión, y dejarlo por un tiempo prolongado se expone a una rotura prematura de la emulsión por la evaporación de su porcentaje de agua.

Usualmente el porcentaje de Tereftalato de polietileno empleado en mezclas con emulsiones asfálticas es hasta un 6% de emulsión, debido a que al incorporar el polímero a la emulsión a temperatura ambiente esta no se reduce ni disminuye su volumen.

2.1.6.2.2. Proceso por vía seca

El proceso por vía seca es el método mediante el cual el Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado es mezclado con los agregados, antes de adicionar el cemento asfáltico. En este proceso, se usa el PET reciclado como un agregado en la mezcla asfáltica, que se puede agregar como un árido más o como un sustituto de una pequeña porción del agregado fino, que puede estar entre el uno y el tres por ciento del peso total de los agregados de la mezcla.

Si bien los granos de polietileno son tratados como un árido, no pueden considerarse un material inerte, pues interacciona con el ligante de la mezcla asfáltica. Este proceso de digestión suele llamarse “digestión” del polietileno. Mediante este proceso, el polietileno pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante en la mezcla asfáltica.

La digestión es un proceso que prolifera desde la superficie de la partícula de polietileno hacia su interior, por lo que será más rápida cuanto más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio, la digestión puede simularse manteniendo la mezcla en horno, a una temperatura en un rango 150 - 170°C y un tiempo de una a dos horas, previamente a la compactación de la probeta.

Durante la digestión, no se producen reacciones importantes entre el polietileno y cemento asfáltico debido al corto tiempo de mezclado, donde este no es suficiente para que se produzca una reacción similar al proceso húmedo, por lo tanto, se asume que el efecto de la reacción polietileno-ligante en el proceso seco es menor y, así mismo, tiene un efecto limitado en el comportamiento de la mezcla.

Sin el tiempo de digestión, no podría obtenerse la interacción entre el ligante y el polietileno, provocando que este funcione como un árido elástico con granulometría muy concentrada, que por un lado crea aberturas y, por otro lado, evita la compactación debido a su componente elástico. Este tiempo de curado de la mezcla es fundamental porque si no se hace correctamente, la modificación del aglutinante no solo cambia, sino que es una mezcla de propiedades peores que la tradicional. Sin digestión existe el riesgo de un deterioro prematuro de la mezcla de asfalto en el campo. Se ha encontrado que el principal riesgo es el ataque de agua sobre la mezcla, lo que conduce a una descomposición gradual.

Para evitar esta situación, al diseñar la mezcla de asfalto, es necesario evaluar cuál será la temperatura y el tiempo mínimo de digestión para lograr una digestión suficiente, esto se puede hacer mediante la prueba de inmersión y compresión que mide el efecto del agua sobre la adhesión de mezclas de asfalto compactas.

En la siguiente figura se muestra la fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con polietileno a través del proceso seco:

Imagen 2.14. Esquema fabricación de las mezclas (Asfalto-Polietileno) por vía seca.



Fuente: Tomado de <http://rubberizedasphalt.org/how.htm>.

Este proceso de vía seca no es muy viable en la elaboración de mezclas con emulsiones asfálticas pues la unión del Tereftalato de Polietileno (PET) una vez ya incorporado al agregado requiere de calor para la unión del ligante a sus componentes de la mezcla, y al trabajar con emulsiones asfálticas ese proceso de mezcla falla, y en varias investigaciones no ha dado buenos resultados debido a su dificultad para mezclas y compactar a temperatura ambiente.

2.1.6.3. Características de las mezclas asfálticas modificadas con plástico polietileno

Una mezcla asfáltica a partir de plástico reciclado logra reducir el presupuesto de mantener las carreteras.

Además, se ha observado un mejor comportamiento técnico del material frente a las deformaciones plásticas y mejores prestaciones mecánicas, por lo que se trata de un

compuesto más duradero que el tradicional que verá reducidas las operaciones de mantenimiento y conservación de la vía.

2.1.6.4. Experiencias extranjeras utilizando plástico polietileno reciclado

España:

El Instituto Tecnológico del plástico (Aimplas), en colaboración con Acciona Infraestructuras, la Universidad de Cantabria y la Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid, ha logrado obtener una innovadora mezcla asfáltica a partir de residuos plásticos que ya se ha aplicado a lo largo de un tramo en los accesos de Alcalá de Henares, según ha informado la entidad en un comunicado. A lo largo de dos kilómetros del trazado se han extendido cuatro tipos de mezclas asfálticas modificadas con diferentes tipos de residuos, concretamente perchas de polipropileno, envases de polietileno y polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

Escocia:

El ingeniero Toby Maccartney, con la finalidad de solucionar dos problemas mundiales, como lo son, mejorar la calidad de las carreteras por la que transitamos, y la epidemia de desperdicios plásticos en todo el mundo, de la que somos testigos; decidió utilizar desperdicios plásticos en una mezcla de asfalto, para crear carreteras más fuertes y duraderas libres de baches. De esta manera creó su propio método industrial, en una granja a la cual llegan toneladas de residuos plásticos y son transformados en millones de gránulos que luego se mezclan con piedra y algo de asfalto; dando como resultado una mezcla lista para ser expandida.

México:

La Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, se realizaron estudios para crear asfaltos modificados con una estructura química de sus polímeros diferente.

El proyecto de la Facultad implica el análisis de la estructura química de algunos polímeros para transformarla y proponer un material que, al ser adicionado al asfalto, permita que la carpeta no se fracture.

“Cuando el pavimento tiene asfalto sin polímero, éste se reblandece a los 70°C y se forman ondas; a los 0°C se quiebra como si fuera vidrio. En cambio, cuando se utiliza asfalto

modificado, puede resistir un rango de temperaturas que va de los 100 a -20°C sin sufrir deformaciones permanentes. Además, el asfalto con polímero limita el paso del agua, una de las principales causas de la formación de hoyos”, indicó.

El especialista refirió que, si bien este tipo de asfalto es más costoso, los beneficios obtenidos son mayores, al reducirse la cantidad de carpeta asfáltica empleada y su tiempo de vida útil.

Un ejemplo concreto del uso de polímeros en la carpeta asfáltica fue el realizado en una vía de la Ciudad de México, donde se colocaron piezas prefabricadas utilizando un polímero - sellador elaborado a base de químicos - en el carril confinado.

De acuerdo con la Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal se inyectaron los polímeros, los cuales ayudaron a mejorar la calidad del suelo y del tendido asfáltico que soporta varias toneladas de peso. (Cañar, 2018, pág. 32)

2.2. MARCO NORMATIVO

A continuación y en función a la base teórica que se obtuvo en los anteriores puntos se describirá el empleo de las normas y metodología establecida para la caracterización y diseño para mezcla con emulsión asfáltica en esta investigación.

2.2.1. Caracterización de los agregados

Para la caracterización de nuestros agregados pétreos se empleara el uso del Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia de la ABC. El cual se encuentra regido por las normas ASTM Y AASHTO citadas a continuación para cada ensayo del agregado.

Tabla 2.7. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados.

Ensayo de laboratorio para agregados.	Norma	Propósito
Análisis granulométrico de agregado fino y grueso.	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de antemano que textura tendrá la carpeta.
Abrasión del agregado grueso máquina de los Ángeles.	AASHTO T 96 ASTM C 131	El objetivo es conocer la calidad del material pétreo desde un punto de vista de su desgaste, ya que por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica es esencial cuando el agregado va estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportara los agregados, bajo los efectos de abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Porcentaje de caras fracturadas.	ASTM D 5821-95	El propósito es maximizar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas con agregados, además de proporcionar estabilidad en los agregados debido al incremento en su fricción y textura, este ensayo proporciona el proceso de selección para determinar la aceptación del agregado grueso respecto a sus requisitos.
Equivalente de arena.	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados finos, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos.	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C 127 ASTM C 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyentes, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas las cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del máximo.
Peso unitario y vacío.	AASHTO T 19 ASTM 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezcla de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

2.2.2. Caracterización de la emulsión

Para la selección de la emulsión optamos por valernos de las tablas proporcionadas por el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19. Las cuales se encuentran en función al tipo de agregado que se tiene y su tipo de gradación y distribución de finos.

Tabla 2.8. Guía para el uso de productos derivados del asfalto en las mezclas en frío.

Tipo de construcción			Asfaltos emulsionados								Asfaltos rebajados								
			Aniónicos						Catiónicos		Curado medio			Curado lento					
			MS-2	HFMS-2	MS-2H	HFMS-2H	HFMS-2S	SS-1	SS-1H	CMS-2	CMS-2H	CCS-1	CCS-1H	70	250	800	3000	250	800
Mezclado en Bases y	Agregados con granulometría abierta		X	X					X	X									
	Agregados bien graduados				X	X	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Bacheo uso inmediato					X	X			X	X		X	X			X		
	Bacheo apilamiento												X	X		X	X		
Mezclado en sitio Bases y	Agregados con granulometrías abiertas		X	X					X	X				X	X		X	X	
	Agregados bien graduados				X	X	X			X	X		X	X		X	X		
	Arena				X	X	X			X	X	X	X	X					
	Suelos arenosos				X	X	X			X	X		X	X					
	Bacheo uso inmediato				X	X	X			X	X		X	X			X		

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

A partir de nuestra tabla se eligió la emulsión asfáltica catiónica de rotura media para el diseño de la mezcla en esta investigación.

Realizando la caracterización de la emulsión en función a la especificación técnica se tiene los siguientes ensayos normados por el empleo del uso del Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia de la ABC.

Tabla 2.9. Ensayos de laboratorio normalizados para la emulsión asfáltica.

Ensayo de laboratorio para la emulsión.	Norma	Propósito
Viscosidad Saybolt furol	ASTM D 244	Determina el estado de fluidez o viscosidad de 60 ml de emulsión a 25°C por medio de la medición en segundo que tarda en circular por el orificio furol hasta llenar una probeta.
Destilación	ASTM D 6997	El objetivo es conocer el peso restante de determinada porción de emulsión a través de un equipo sometido a 260 °C y así determinar el porcentaje restante que queda en la base tras eliminar toda el agua de la emulsión.
Ensayos al cemento asfáltico residual de la emulsión.		
Ductilidad	AASHTO T 151-00 ASTM D 133	Tiene por objeto someter al nuestro cemento asfáltico residual puesto en una probeta a tracción en condiciones determinadas de velocidad y temperatura dentro de agua de igual densidad, amostrando la distancia máxima a la que se estira la probeta antes de romperse.
Densidad relativa a 25°C	AASHTO T 229-97	Los valores de densidad son usados para realizar conversiones de unidades de volumen a masa y para realizar correcciones en las medidas de volumen cuando la temperatura de medida de ensayo difiere de la temperatura de ejecución del mismo.
Penetración	AASHTO T 49-97 ASTM D 5	Permite medir la dureza o consistencia del cemento asfáltico residual por medio de una aguja de penetración.

Fuente: Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

A partir de los rangos establecidos en la especificación o ficha técnica de la emulsión se evaluara en el capítulo 4 los valores obtenidos.

2.2.3. Diseño de mezclas con emulsión asfáltica

La metodología empleada para el diseño de las mezclas con emulsión asfáltica es el método Marshall modificado de la universidad de Illinois con el procedimiento descrito en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Manual Series N°19.

2.3. MARCO REFERENCIAL

Esta investigación se basó en el uso de revistas con normativa colombiana basada en INVIAS, tales como “Estado de conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia” que me sirvió como guía para establecer parámetros de adición de polímero a la emulsión y el comportamiento de la mezcla, así también como revistas de la normativa de Costa Rica como ser “mezclas asfálticas en frío en Costa Rica” que contribuyó a esta investigación a través conceptos ensayos y especificaciones a cerca de las emulsiones asfálticas con base en el manual básico de emulsiones de EEUU.

Con respecto a los procedimientos utilizados en la elaboración de la mezcla así como también conceptos teóricos de gran ayuda, se partió del aporte de documentos e investigaciones realizadas en Perú, Colombia, El Salvador y Ecuador. Acerca de mezclas modificadas con PVC, fibras de terlenka, polietileno. Y también propuestas del uso de mezclas densas y semidensas en frío.

2.4. ANÁLISIS Y TENDENCIAS

2.4.1. Análisis de la investigación

En base a la información teórica obtenida previa a este punto, se procede a un análisis descriptivo del desarrollo de esta tesis destacando, los materiales a utilizar y el procedimiento a seguir para la obtención de la mezcla tanto convencional y modificada con la incorporación de limadura de tereftalato de polietileno descrita a continuación:

Para empezar se trabajara con agregados normados en la ciudad de Tarija el cual se obtendrá de la chancadora de charaja, agregados los cuales usan el SEDECA, y se seguirá con el procedimiento indicado y tomando en cuenta los rangos que nos da el manual de la ABC, y un total de 6 ensayos que se encuentran descritos en el marco normativo.

Para el uso de la emulsión se optara por una emulsión catiónica de rotura media CMS-2H usado como indica la norma y la teoría, en mezclas semidensas y en Bolivia para tema de investigación adaptado a mezclas densas debido a que es de más fácil obtención que una emulsión catiónica de rotura lenta, además los ensayos se registrarán en función a su especificación técnica, y con guía de manuales y tablas de revistas, realizando 5 ensayos descritos en el marco normativo para su caracterización.

Para el diseño de mezclas se realizara a través del ensayo de Marshall modificado descrito en el manual básico de emulsiones asfálticas series N°19, y en la teoría la cual nos indica que para el diseño de la mezcla convencional se tendrá un total de 18 briquetas, es decir se tomara más de 3 puntos o porcentajes como indica la normativa para hallar el óptimo, optando por 6 porcentajes distintos los mismos que estarán en función al cemento asfáltico residual y cada 1%, además tomando en cuenta que para el ensayo de Marshall modificado inciden las temperaturas en compactación y previa a su rotura de briquetas.

En el caso del diseño de la mezcla con emulsión asfáltica modificada, se optará por la incorporación de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), mediante la vía húmeda, es decir como polímero parte de la emulsión, en un rango de entre 1,0% a 10,0% del total de la emulsión, rangos con base a las revistas de apoyo de investigaciones realizadas en Colombia haciendo un total de 30 briquetas es decir 3 por punto.

2.4.2. Tendencias y relaciones de los resultados de ensayo

Las curvas de ensayo trazadas para evaluar las propiedades mecánicas a través de método Marshall modificado, 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 dadas por el método Marshall:

Imagen 2.15. Curva estabilidad vs porcentaje de asfalto.

Fuente: (UMSS).

Imagen 2.16. Curva peso unitario vs porcentaje de asfalto.

Fuente: (UMSS).

Imagen 2.17. Curva porcentaje de vacíos en la mezcla vs porcentaje de asfalto.

Fuente: (UMSS).

Imagen 2.18. Curva flujo vs porcentaje de asfalto.

Fuente: (UMSS).

Imagen 2.19. *Curva porcentaje de vacíos en el agregado vs porcentaje de asfalto.*

Fuente: (UMSS).

CAPITULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo describe el proceso de selección y preparación de cada uno de los componentes de la mezcla con emulsión asfáltica que vamos a diseñar en esta investigación.

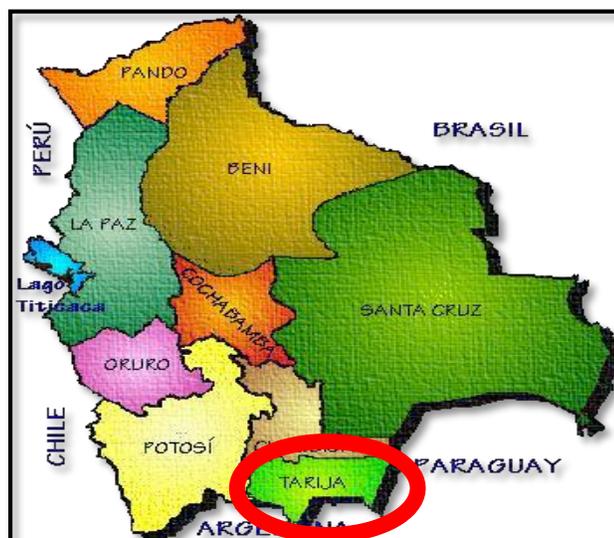
A continuación están descritos cada uno de los ensayos de los agregados, emulsión asfáltica y limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), su procedencia, el procedimiento con imágenes y gráficas, y su comparativa con respecto a las normas y especificaciones técnicas usadas.

3.2. UBICACIÓN

3.2.1. Ubicación en el contexto nacional

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

Imagen 3.1. Mapa político del Estado Plurinacional de Bolivia.



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

3.2.2. Ubicación en el contexto departamental

La Provincia de Cercado, se sitúa al Noreste del Departamento de Tarija, geográficamente a $21^{\circ}31'17''$ de latitud sur y a $64^{\circ}43'41''$ de longitud oeste, a una altura promedio de 1876m.s.n.m. y cuenta con una extensión de 4861 Km².

Coordenadas geográficas de Tarija (Latitud: - 21,5214; Longitud: - 64,7281)

Coordenadas UTM de Tarija (W: 321008,974; S: 7619126,156; Huso: 20)

Imagen 3.2. Mapa político del departamento de Tarija.



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

3.2.3. 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.

Imagen 3.3. Mapa de la provincia Cercado.



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

3.2.4. Ubicación del banco de materiales

Imagen 3.4. Ubicación de la comunidad de San José de Charaja.



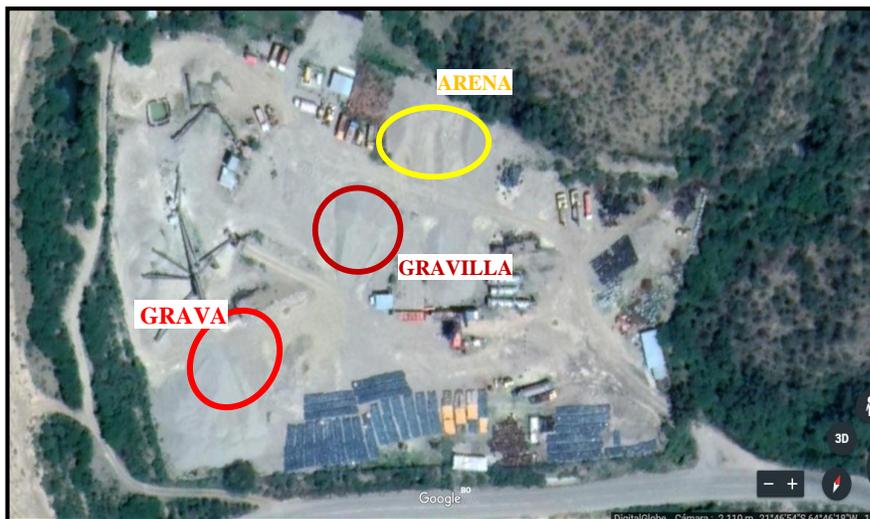
Fuente: Programa Google Earth.

Imagen 3.5. Ubicación de la chancadora de Charaja.



Fuente: Programa Google Earth.

Imagen 3.6. Croquis de ubicación del acopio de agregados pétreos.



Fuente: Programa Google Earth.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE LA MEZCLA

3.3.1. 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 utilizará los agregados de la Chancadora Charaja cuyo material es procedente del río Camacho, que pasa por la comunidad de San José de Charaja ubicado pasando la comunidad de Chocloca antes de llegar a la comunidad de Juntas, lugares donde la gente se dedican mayormente a la agricultura.

Los materiales empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas. Además de tenerlos a disponibilidad.

Los agregados necesarios, se extrajeron según el Manual de Carreteras (ASTM C75; AASHTO T2-91). Del acopio o almacenamiento de la planta de asfaltos de SEDECA de

Tarija, ubicada en la comunidad de San José de Charaja de la Provincia Avilés que este a su vez tiene como banco a la chancadora de Charaja.

Imagen 3.7. Acopio de material.



Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Características de la emulsión

La emulsión asfáltica que se uso fue una Emulsión Catiónica de Rotura Media Producto BETUMIX M3 CMS-2H de procedencia Brasileira propiamente de ciudad de São Paulo ubicado en coordenadas geográficas a (Latitud: -23,5489; Longitud: -46,6388) o en coordenadas UTM (S: 7394725,856; W: 332708,3454; Huso: 23), obtenida por medio de la empresa Stratura Asfaltos S.A. con casa matriz en la Av. Paulista 1754, 7° andar, Bela Vista, y que a mi persona fue proporcionado por el Ingeniero Segovia Fernández Rene que radica en el Departamento de Santa Cruz, pero con domicilio ubicado aquí en Tarija en el Barrio San Luis, posteriormente para seleccionar las muestras se procedió de acuerdo a las especificaciones indicadas en el Manual de Carreteras V4A (Método de muestreo ASTM D140; AASHTO T40-78). Siendo los mismos analizados en laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Imagen 3.8. Certificado de calidad de origen de la emulsión asfáltica CMS-2H.

Fuente: Stratura Asfaltos.

3.4. Muestreo de materiales

3.4.1. Selección del agregado pétreo

Para la obtención de los agregados que se utilizara en la mezcla con emulsión asfáltica, que serán materiales provenientes de la chancadora Charaja, en cantidades lo suficientemente necesario para realizar su caracterización y el estudio de las mezclas con emulsión asfáltica incorporando limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), se realizó la extracción de la muestra de los áridos con la ayuda de una pala de los tres acopios de materiales de grava, gravilla y arena, tanto de arriba del centro y de abajo para que este homogéneo la muestra y se las puso en bolsas de azúcar, posteriormente se las cargo en una camioneta para trasladar las muestras hasta el laboratorio de la universidad.

Imagen 3.9. Acopio y recolección de la grava.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.10. Acopio y recolección de la gravilla.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.11. Acopio y recolección de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Selección de la emulsión

Para la obtención de la Emulsión de rotura media BETUMIX CMS-2H procedente de Brasil, que fue proporcionada de manera gratuita por la empresa privada del Ing. Rene Segovia Fernández aquí en Tarija, me dirijo a su hacienda ubicada en el Barrio San Luis Av. San Luis a 1Km de la finca el “Ranchito feliz”.

Imagen 3.12. Croquis de la empresa privada que me proporciono la emulsión asfáltica.

Fuente: Elaboración propia.

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 con emulsión asfáltica incorporando limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), de la muestra de 200 litros en un turril he recibido una muestra en un recipiente, en este caso en un bidón de 5 litros como se muestra en la figura.

Imagen 3.13. Muestra proporcionada de emulsión asfáltica para la realización de esta investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Selección de botellas PET

Este material para su recolección fue extraído de algunos basureros de la ciudad de Tarija que recolectan en si todo tipo de plásticos, tambien de empresas y entidades que estén constantemente con el uso de este material desechable, además de sustraerlo de las calles puesto que este material o tenemos presente día a día, ya sea en la mesa para el almuerzo o cena en cualquier domicilio, y puesto no fue dificultosa su selección se escogió desde los más limpios y en mejores condiciones para la presente investigación.

Imagen 3.14. Basurero exclusivo para botellas plásticas y latas de aluminio.

Fuente: Elaboración propia.

3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.5.1. Ensayos de los agregados

Para la caracterización de los agregados se realizaron los ensayos que demuestran la calidad que presentan estos, y así poder realizar el estudio de mezclas con emulsiones asfálticas con la incorporación de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), para ello se mencionaran todos los ensayos tanto para:

Grava 3/4"

Gravilla 3/8"

Arena triturada

3.5.1.1. Granulometría (ASTM C40; AASHTO T27-99)

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de los áridos de diferentes tamaños. Este método consiste en la determinación por tamices de la distribución del tamaño de las partículas de agregados finos y gruesos. Para una gradación óptima, los agregados se separan mediante el tamizado, en dos o tres grupos de diferentes tamaños para las arenas, y en varios grupos de diferentes tamaños para los gruesos.

Se procedió a realizar el análisis granulométrico tanto del material grueso como del material fino de acuerdo a la Norma ASSHTO T-27. (Ver imagen 3.15. a imagen 3.20.)

Imagen 3.15. Separado de grava, gravilla y arena previo al lavado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.16. Material a usar para el tamizado

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.17. Lavado de material antes de realizar la granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.18. Grava, gravilla y arena previa a meter al horno.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.19. Muestra seca sacada del horno.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.20. Tamizado mediante el equipo ROP-TAP.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Agregado grueso – Grava 3/4”

Tabla 3.1. Granulometría 1 del agregado grueso (Grava).

Peso total (g)			10000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25,4	3,30	3,30	0,03	99,97	-	-
3/4"	19,0	2963,40	2966,70	29,67	70,33	35	70
1/2"	12,5	2418,80	5385,50	53,86	46,15	-	-
3/8"	9,50	2379,30	7764,80	77,65	22,35	10	30
Nº4	4,75	2219,60	9984,40	99,84	0,16	0	5
Nº8	2,36	0,60	9985,00	99,85	0,15	-	-
Nº16	1,18	0,30	9985,30	99,85	0,15	-	-
Nº30	0,60	0,20	9985,50	99,86	0,14	-	-
Nº50	0,30	0,40	9985,90	99,86	0,14	-	-
Nº100	0,15	6,10	9992,00	99,92	0,08	-	-
Nº200	0,075	1,60	9993,60	99,94	0,06	-	-
BASE	-	4,40	9998,00	99,98	0,02	-	-
	Suma	9998,0					
	Pérdidas	2,0					
	MF	7,06					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.1. Curva granulometría 1 del agregado grueso (Grava).

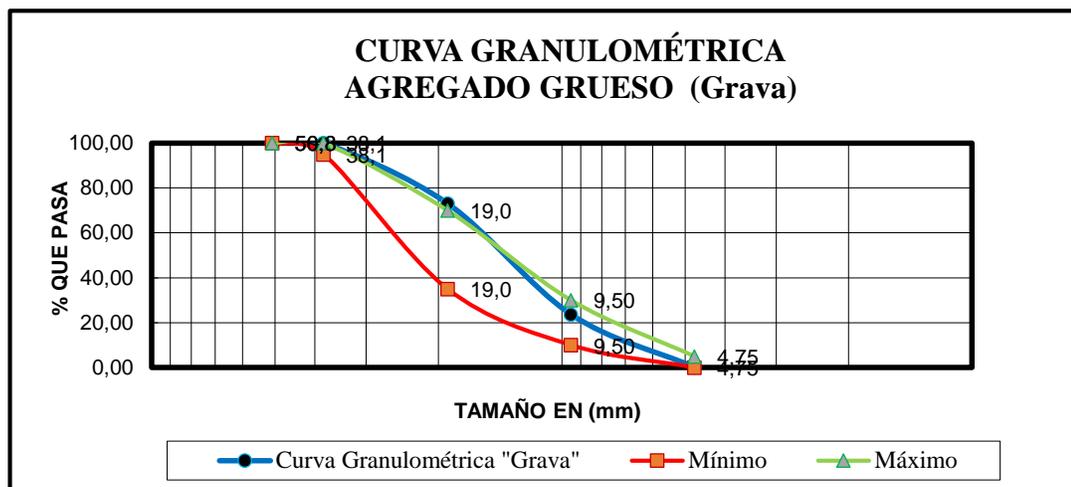
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2. Granulometría 2 del agregado grueso (Grava).

Peso total (g)			10000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
3/4"	19,0	2688,40	2688,40	26,88	73,12	35	70
1/2"	12,5	2498,00	5186,40	51,86	48,14	-	-
3/8"	9,50	2444,10	7630,50	76,31	23,70	10	30
Nº4	4,75	2353,90	9984,40	99,84	0,16	0	5
Nº8	2,36	0,40	9984,80	99,85	0,15	-	-
Nº16	1,18	0,70	9985,50	99,86	0,14	-	-
Nº30	0,60	0,50	9986,00	99,86	0,14	-	-
Nº50	0,30	0,20	9986,20	99,86	0,14	-	-
Nº100	0,15	4,20	9990,40	99,90	0,10	-	-
Nº200	0,075	3,10	9993,50	99,94	0,06	-	-
BASE	-	3,90	9997,40	99,97	0,03	-	-
	Suma	9997,4					
	Pérdidas	2,6					
	MF	7,02					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.2. Curva granulometría 2 del agregado grueso (Grava).



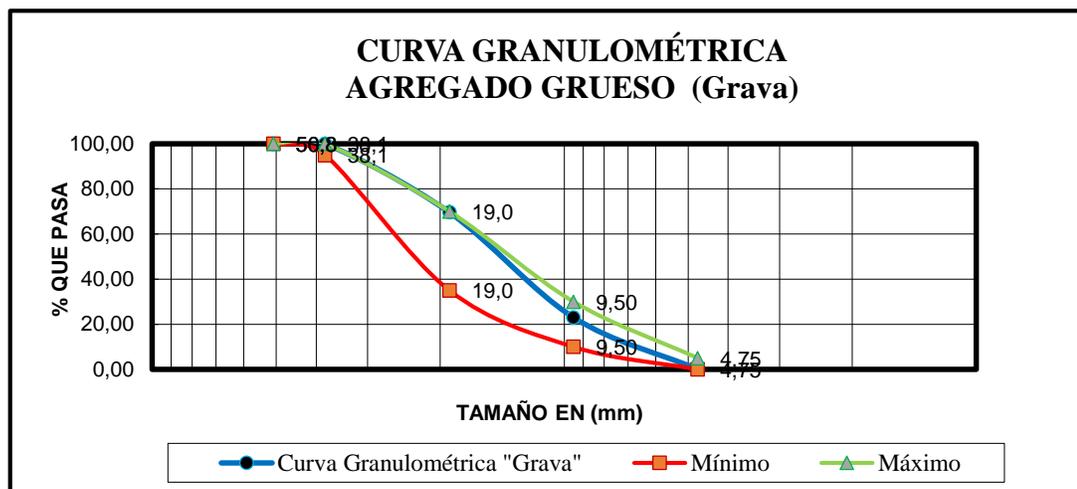
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3. Granulometría 3 del agregado grueso (Grava).

Peso total (g)			10000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
3/4"	19,0	3033,87	3033,87	30,34	69,66	35	70
1/2"	12,5	2440,00	5473,87	54,74	45,26	-	-
3/8"	9,50	2216,90	7690,77	76,91	23,09	10	30
Nº4	4,75	2295,80	9986,57	99,87	0,13	0	5
Nº8	2,36	0,30	9986,87	99,87	0,13	-	-
Nº16	1,18	0,20	9987,07	99,87	0,13	-	-
Nº30	0,60	0,40	9987,47	99,87	0,13	-	-
Nº50	0,30	0,30	9987,77	99,88	0,12	-	-
Nº100	0,15	3,80	9991,57	99,92	0,08	-	-
Nº200	0,075	2,90	9994,47	99,94	0,06	-	-
BASE	-	4,10	9998,57	99,99	0,01	-	-
	Suma	9998,6					
	Pérdidas	1,4					
	MF	7,07					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3. Curva granulometría 3 del agregado grueso (Grava).



Fuente: Elaboración propia.

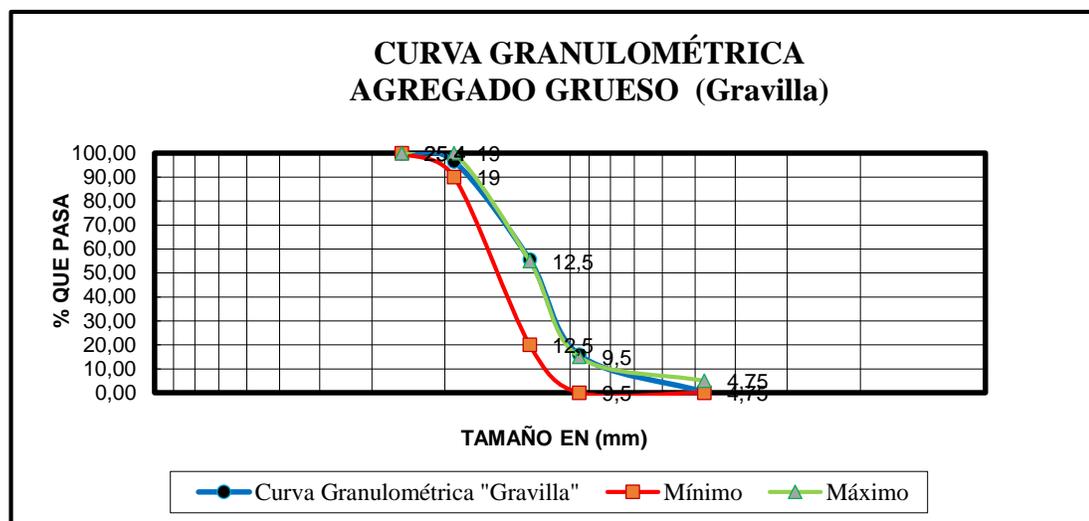
Agregado grueso – Gravilla 3/8"

Tabla 3.4. Granulometría 1 del agregado grueso (Gravilla).

Peso total (g)			10000					
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33		
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
3/4"	19	345,60	345,60	3,46	96,54	90	100	
1/2"	12,5	4098,20	4443,80	44,44	55,56	20	55	
3/8"	9,5	3963,30	8407,10	84,07	15,93	0	15	
Nº4	4,75	1556,90	9964,00	99,64	0,36	0	5	
Nº8	2,36	20,30	9984,30	99,84	0,16	-	-	
Nº16	1,18	1,70	9986,00	99,86	0,14	-	-	
Nº30	0,60	0,40	9986,40	99,86	0,14	-	-	
Nº50	0,30	0,60	9987,00	99,87	0,13	-	-	
Nº100	0,15	2,10	9989,10	99,89	0,11	-	-	
Nº200	0,08	2,50	9991,60	99,92	0,08	-	-	
BASE	-	6,10	9997,70	99,98	0,02	-	-	
	Suma	9997,70						
	Pérdidas	2,30						
	MF	6,9						

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4. Curva granulometría 1 del agregado grueso (Gravilla).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5. Granulometría 2 del agregado grueso (Gravilla).

Peso total (g)			10000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19	406,30	406,30	4,06	95,94	90	100
1/2"	12,5	4093,20	4499,50	45,00	55,01	20	55
3/8"	9,5	3936,20	8435,70	84,36	15,64	0	15
Nº4	4,75	1532,60	9968,30	99,68	0,32	0	5
Nº8	2,36	17,60	9985,90	99,86	0,14	-	-
Nº16	1,18	0,20	9986,10	99,86	0,14	-	-
Nº30	0,60	0,40	9986,50	99,87	0,13	-	-
Nº50	0,30	0,70	9987,20	99,87	0,13	-	-
Nº100	0,15	2,60	9989,80	99,90	0,10	-	-
Nº200	0,08	3,60	9993,40	99,93	0,07	-	-
BASE	-	4,80	9998,20	99,98	0,02	-	-
Suma		9998,20					
Pérdidas		1,80					
MF		6,9					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5. Curva granulometría 2 del agregado grueso (Gravilla).

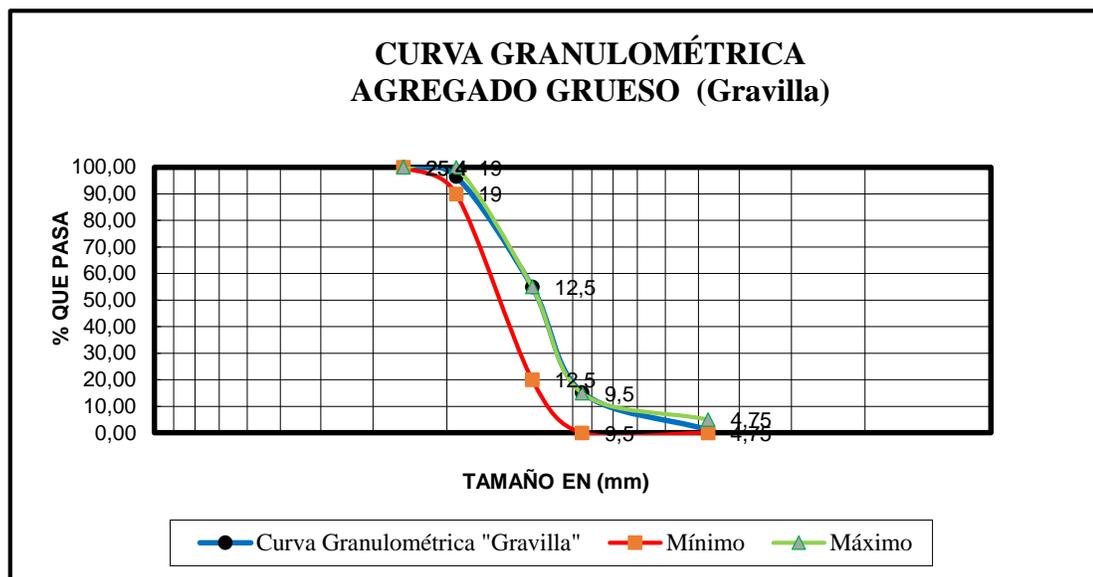
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6. Granulometría 3 del agregado grueso (Gravilla).

Peso total (g)			10000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especif. ASTM C-33	
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19	348,40	348,40	3,48	96,52	90	100
1/2"	12,5	4150,90	4499,30	44,99	55,01	20	55
3/8"	9,5	3973,60	8472,90	84,73	15,27	0	15
Nº4	4,75	1418,00	9890,90	98,91	1,09	0	5
Nº8	2,36	94,50	9985,40	99,85	0,15	-	-
Nº16	1,18	0,90	9986,30	99,86	0,14	-	-
Nº30	0,60	0,50	9986,80	99,87	0,13	-	-
Nº50	0,30	0,80	9987,60	99,88	0,12	-	-
Nº100	0,15	1,90	9989,50	99,90	0,11	-	-
Nº200	0,08	2,90	9992,40	99,92	0,08	-	-
BASE	-	5,80	9998,20	99,98	0,02	-	-
	Suma	9998,20					
	Pérdidas	1,80					
	MF	6,9					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.6. Curva granulometría 3 del agregado grueso (Gravilla).



Fuente: Elaboración propia.

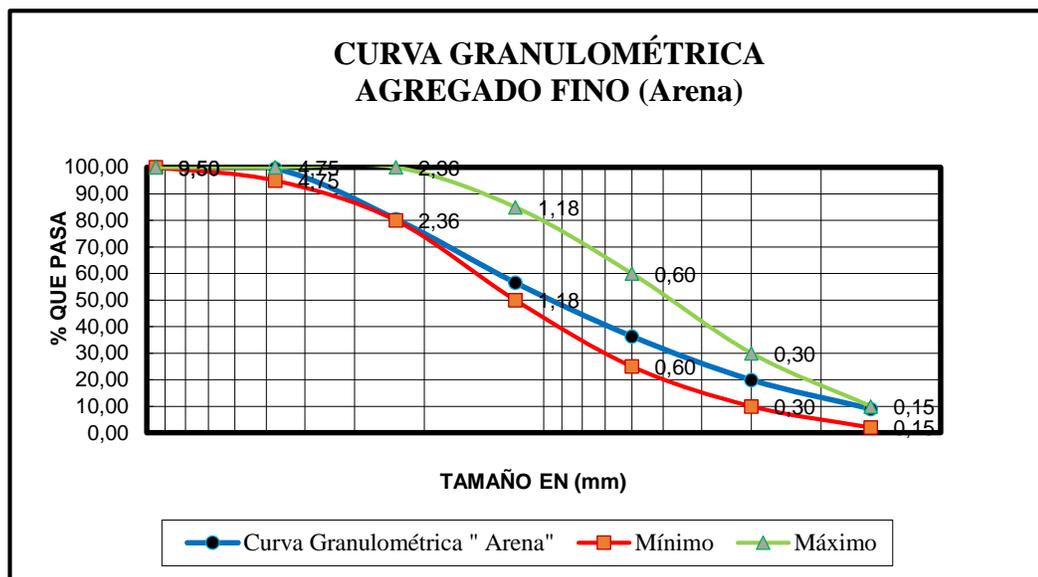
Agregado fino – Arena

Tabla 3.7. Granulometría 1 del agregado fino (Arena).

Peso total (g)			3000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00		
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
Nº4	4,75	14,70	14,70	0,49	99,51	95	100
Nº8	2,36	569,80	584,50	19,48	80,52	80	100
Nº16	1,18	718,80	1303,30	43,44	56,56	50	85
Nº30	0,60	606,10	1909,40	63,65	36,35	25	60
Nº50	0,30	493,20	2402,60	80,09	19,91	10	30
Nº100	0,15	326,50	2729,10	90,97	9,03	2	10
Nº200	0,075	144,80	2873,90	95,80	4,20		
BASE	-	125,70	2999,60	99,99	0,01		
	Suma	2999,6					
	Pérdidas	0,4					
	MF	2,98					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.7. Curva granulometría 1 del agregado fino (Arena).



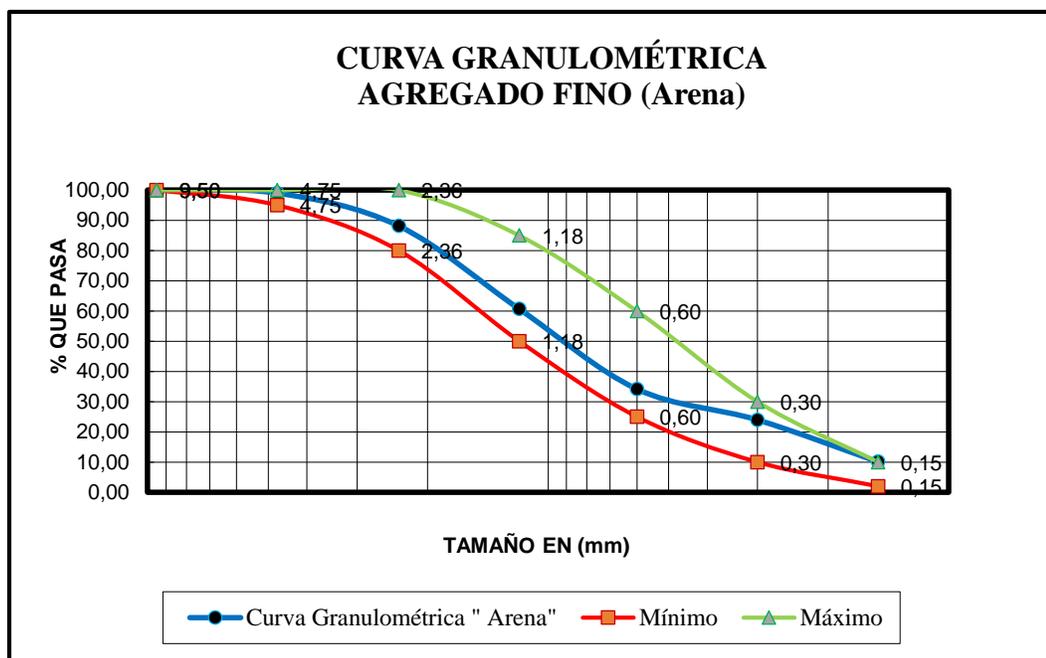
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Granulometría 2 del agregado fino (Arena).

Peso total (g)			3000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00		
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
N°4	4,75	28,60	28,60	0,95	99,05	95	100
N°8	2,36	325,60	354,20	11,81	88,19	80	100
N°16	1,18	824,60	1178,80	39,29	60,71	50	85
N°30	0,60	794,20	1973,00	65,77	34,23	25	60
N°50	0,30	306,60	2279,60	75,99	24,01	10	30
N°100	0,15	415,30	2694,90	89,83	10,17	2	10
N°200	0,075	189,70	2884,60	96,15	3,85		
BASE	-	114,60	2999,20	99,97	0,03		
	Suma	2999,2					
	Pérdidas	0,8					
	MF	2,84					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.8. Curva granulometría 2 del agregado fino (Arena).



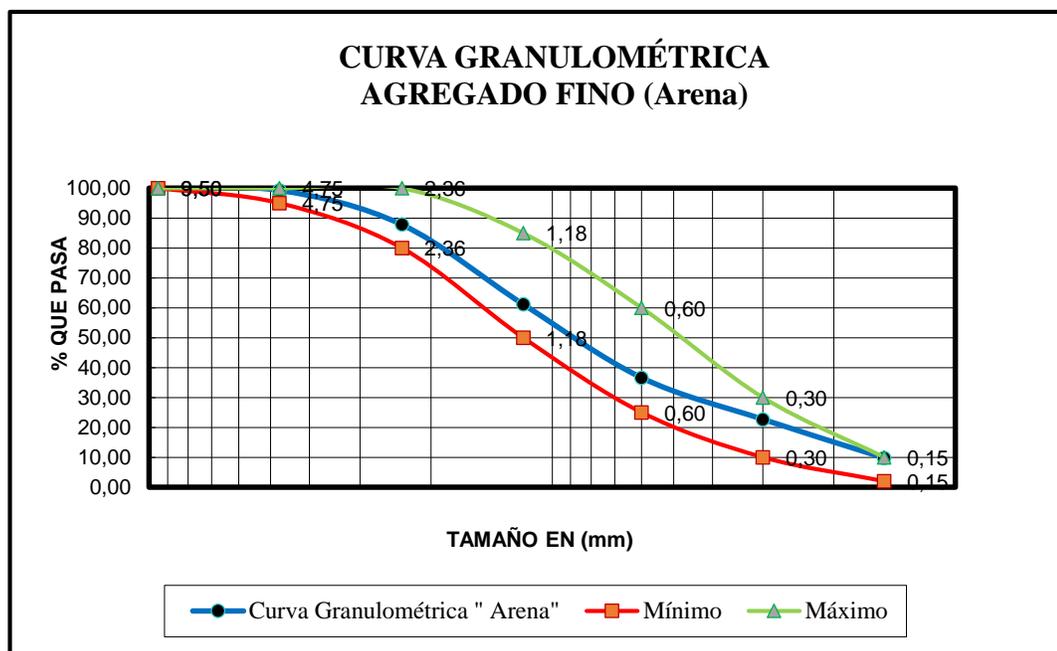
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9. Granulometría 3 del agregado fino (Arena).

Peso total (g)			3000					
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total	% Que pasa s/g. Especif. ASTM C-33		
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00			
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
Nº4	4,75	22,10	22,10	0,74	99,26	95	100	
Nº8	2,36	343,60	365,70	12,19	87,81	80	100	
Nº16	1,18	799,60	1165,30	38,84	61,16	50	85	
Nº30	0,60	736,80	1902,10	63,40	36,60	25	60	
Nº50	0,30	418,20	2320,30	77,34	22,66	10	30	
Nº100	0,15	387,20	2707,50	90,25	9,75	2	10	
Nº200	0,075	169,30	2876,80	95,89	4,11			
BASE	-	122,30	2999,10	99,97	0,03			
	Suma	2999,1						
	Pérdidas	0,9						
	MF	2,83						

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9. Curva Granulometría 3 del agregado fino (Arena).



Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.2. Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131; AASHTO T96-99)

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.

Para garantizar la resistencia de los agregados se los somete al ensayo de desgaste de Los Ángeles, ASTM E 131, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso en la tabla a continuación, se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que deberá ser representativa de la gradación original suministrado.

Tabla 3.10. Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el desgaste de los Ángeles.

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (g)			
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 rotación		15	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

Imagen 3.21. Lavar y secar en el horno a una temperatura de 105-110 °C el material antes de introducir en la Máquina de Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.22. *Pesar los materiales retenidos en las cantidades del método que corresponden*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.23. *Introducir la muestra y las cargas abrasivas en la máquina de Los Ángeles.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.24. Sacar el material y las cargas abrasivas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.25. Tamizar la muestra por los tamices N°8 y N°12, para luego lavar y dejar al horno a secar y pesar.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Tabla 3.11. Tabla de datos del desgaste de Los Ángeles (Grava).

Gradación A		Gradación B		Gradación C		Gradación D	
Tamiz	Peso retenido						
1"	-	1/2"	2500	1/4"	-	N°8	-
3/4"	-	3/8"	2500	N°4	-		
1/2"	-						
3/8"	-						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12. Tabla de resultados del desgaste de Los Ángeles (Grava)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
A				35% MAX
B	5000	3949,8	21,00	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13. Tabla de datos del desgaste de Los Ángeles (Gravilla)

Gradación A		Gradación B		Gradación C		Gradación D	
Tamiz	Peso retenido						
1"	-	1/2"	-	1/4"	2500	N°8	-
3/4"	-	3/8"	-	N°4	2500		
1/2"	-						
3/8"	-						

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}}{P_{\text{INICIAL}}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14. Tabla de resultados del desgaste de Los Ángeles (Gravilla)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
A	-	-	-	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	5000	3982,5	20,35	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.1.3. Peso específico del agregado grueso ASTM C-127 (Grava, gravilla)

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

Para ello se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, tanto de grava como de gravilla, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.26. Lavar y dejar saturar con agua por 24 horas el agregado retenido en el tamiz N°4.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.27. Secado superficial de la muestra saturada en agua.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.28. Peso del material superficialmente seco.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.29. Obtención del peso sumergido en agua.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.30. Secado de la muestra en el horno.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.15. Tabla de resultados del peso específico (Grava)

Muestra	Peso muestra secada "A"	Peso muestra saturada con sup. seca "B"	Peso muestra saturada dentro del agua "C"	Peso específico a granel	Peso específico saturado con sup. seca	Peso específico aparente	% de absorción
Nº	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)
1	4975,60	5053,70	3077,30	2,52	2,56	2,62	1,57
2	4963,40	5049,30	2989,60	2,41	2,45	2,51	1,73
3	4979,30	5059,60	3073,20	2,51	2,55	2,61	1,61
			Promedio	2,48	2,52	2,58	1,64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16. Tabla de resultados del peso específico (Gravilla)

Muestra	Peso muestra secada "A"	Peso muestra saturada con sup. seca "B"	Peso muestra saturada dentro del agua "C"	Peso específico a granel	Peso específico saturado con sup. seca	Peso específico aparente	% de absorción
Nº	(g)	(g)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	(g/cm3)	(%)
1	4987,70	5076,50	3142,00	2,58	2,62	2,70	1,78
2	4979,60	5068,80	3125,30	2,56	2,61	2,69	1,79
3	4983,60	5078,30	3145,60	2,58	2,63	2,71	1,90
			Promedio	2,57	2,62	2,70	1,82

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.4. Peso específico del agregado fino (Arena). (ASTM C-128)

Se realizó el ensayo según la norma, con tres muestras y se siguieron los pasos como se muestran a continuación

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.31. Se obtiene el material necesario.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.32. *Lavar y dejar saturar en agua por 24 horas el material que pasa por el tamiz N°4.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.33. *Secado superficial del material con secadora.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.34. Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.35. Colocar en un matraz 500g de material, llenar agua y pesar.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.36. Sacar la muestra del matraz y dejar secar en el horno para posteriormente pesar.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.17. Tabla de resultados del peso específico (Arena).

Muestra	Peso muestra	Peso de matraz	Muestra + matraz + agua	Peso del agua agregado al matraz "W"	Peso muestra secada "A"	Volumen del matraz "V"	P. E. a granel	P. E. saturado con sup. seca	P. E. aparente	% de absorción	
N°	(g)	(g)	(g)	(ml) ó (g)	(g)	(ml)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)		
1	500	236,2	1040,1	303,90	491,80	500,00	2,51	2,55	2,62	1,64	
2	500	171,9	983,6	311,70	492,40	500,00	2,61	2,66	2,72	1,52	
3	500	221,2	1025,6	304,40	489,50	500,00	2,50	2,56	2,64	2,10	
PROMEDIO								2,54	2,59	2,66	1,75

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.5. Ensayo de peso unitario de agregados

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

El procedimiento que se siguió para hallar el peso unitario de nuestros agregados se detalla a continuación:

Imagen 3.37. Materiales a utilizar en el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.38. Volumen suelto de arena y su enrase.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.39. *Volumen compactado de arena con el proceso de varillado.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.40. *Obtención del peso de la arena.*

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.41. Volumen suelto de la gravilla.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.42. Volumen compactado durante el varillado de la gravilla.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.43. *Obtención del peso de la gravilla.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.44. *Volumen suelto de la grava.*

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.45. *Obtención del peso suelto de la grava.*



Fuente: *Elaboración Propia.*

Imagen 3.46. *Volumen compactado durante el proceso de varillado de la grava.*

Fuente: *Elaboración Propia.*

Imagen 3.47. Obtención del peso compactado de la grava.



Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.18. Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Grava).

Muestra N°	Peso recipiente (g)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recipiente + muestra suelta (g)	Peso muestra suelta (g)	Peso unitario suelto (g/cm ³)
1	5798,40	9790,68	19410,50	13612,10	1,390
2	5798,40	9790,68	19423,30	13624,90	1,392
3	5798,40	9790,68	19421,00	13622,60	1,391
				Promedio	1,391

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.19. Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Grava).

Muestra	Peso recipiente	Volumen recipiente	Peso recipiente + muestra suelta	Peso muestra suelta	Peso unitario suelto
N°	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	5798,40	9790,68	20480,20	14681,80	1,500
2	5798,40	9790,68	20482,10	14683,70	1,500
3	5798,40	9790,68	20479,80	14681,40	1,500
				Promedio	1,500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20. Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Gravilla).

Muestra	Peso recipiente	Volumen recipiente	Peso recipiente + muestra suelta	Peso muestra suelta	Peso unitario suelto
N°	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	5798,40	9790,68	19315,20	13516,80	1,381
2	5798,40	9790,68	19320,10	13521,70	1,381
3	5798,40	9790,68	19423,30	13624,90	1,392
				Promedio	1,384

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.21. Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Gravilla).

Muestra	Peso recipiente	Volumen recipiente	Peso recipiente + muestra suelta	Peso muestra suelta	Peso unitario suelto
N°	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	5798,40	9790,68	20360,10	14561,70	1,487
2	5798,40	9790,68	20482,10	14683,70	1,500
3	5798,40	9790,68	20479,80	14681,40	1,500
				Promedio	1,496

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.22. *Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Arena).*

Muestra	Peso recipiente	Volumen recipiente	Peso recipiente + muestra suelta	Peso muestra suelta	Peso unitario suelto
N°	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	2610,30	2954,80	7473,70	4863,40	1,646
2	2610,30	2954,80	7449,80	4839,50	1,638
3	2610,30	2954,80	7531,40	4921,10	1,665
Promedio					1,650

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23. *Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Arena).*

Muestra	Peso recipiente	Volumen recipiente	Peso recipiente + muestra suelta	Peso muestra suelta	Peso unitario suelto
N°	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	2610,30	2954,80	8093,50	5483,20	1,856
2	2610,30	2954,80	8082,90	5472,60	1,852
3	2610,30	2954,80	8090,80	5480,50	1,855
Promedio					1,854

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.6. Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASTHO T176)

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm).

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Imagen 3.48. Equipo necesario para el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.49. Seleccionar material que pase el tamiz N° 4.

Fuente: Elaboración propia.

Solución base compuesta de lo siguiente: Cloruro de Calcio anhidro, Glicerina farmacéutica, Formaldehido y Agua destilada.

Modo de preparación: Cloruro de calcio disuelto en agua destilada agregando posteriormente la glicerina y el formaldehido a la solución.

Imagen 3.50. Colocar la solución indicada hasta la medida.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.51. Colocar el material y golpear en la parte baja del cilindro para evitar burbujas de aire y dejar reposar por 10 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.52. Una vez transcurrido los 10 min, agitar el cilindro con la muestra en un periodo de 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

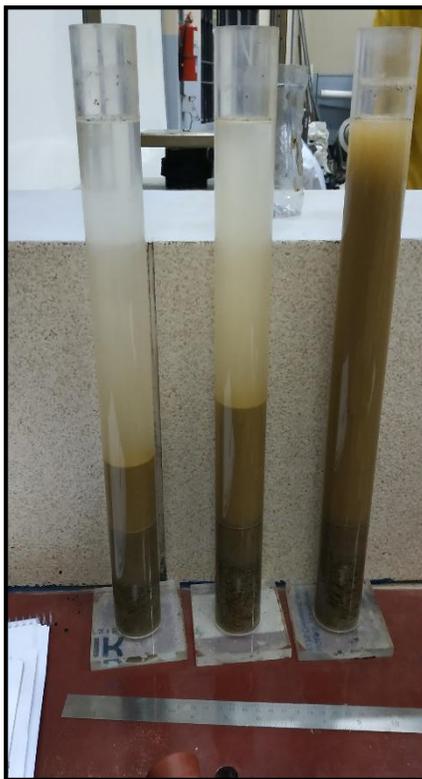
Pasado el proceso de agitación se procedió a introducir el irrigador hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión hasta que se haga visible la marca del irrigador, y luego retirarlo de la misma forma que fue introducido

Imagen 3.53. Introducción de irrigador en la probeta.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.54. Dejar sedimentar las probetas por 20 minutos aproximadamente.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.55. Una vez transcurrido los 20 min, lecturar y obtener datos.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.24. Tabla de resultados del equivalente de arena.

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,50	13,55	70,11
2	10,10	14,15	71,38
3	10,10	14,40	70,14
Promedio			70,54

$$E. A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Equivalente de Arena (%)	Norma
70,54	> 50%

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.7. Ensayo de determinación de porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95)

Este método de ensayo nos permite determinar la cantidad en porcentaje de peso de muestra, que tiene una o más de sus caras fracturadas.

Para ello se dispuso a pesar una muestra de aproximadamente 1000 gramos para grava de 3/4" y 1000 gramos para gravilla de 3/8", este peso va en función a el tamaño máximo del agregado que en nuestro caso sería de 25,4 mm como máximo, este material debe estar previamente lavado como se muestra en la imagen y se lo debe separa por tamices, para posteriormente separar las partículas en cada tamiz retenido que estén fracturadas en un porcentaje mayor a 25% de su superficie, además de separar también aquellas que presenten formas alargadas, laminadas o sean canto rodado.

Imagen 3.56. Material previamente lavado de grava y gravilla, con tamices a utilizar.

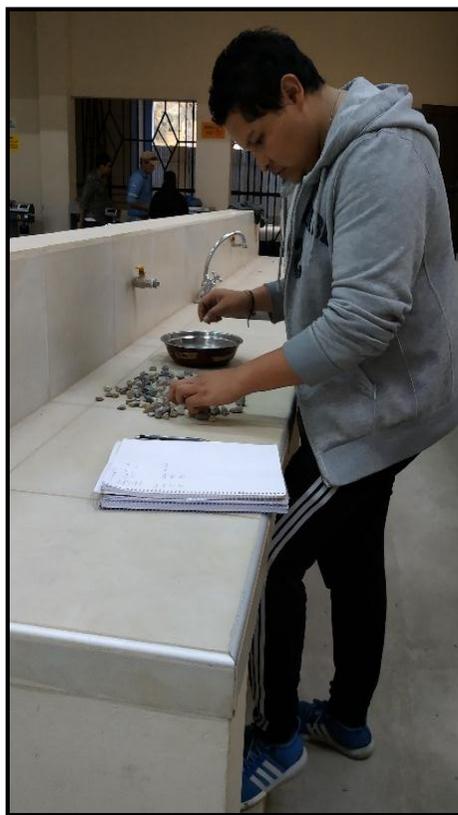
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.57. Tamizado tanto de grava como gravilla para tener separados los porcentajes.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.58. Separa las caras fracturadas de manera manual.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.59. Caras fracturadas de grava.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.60. Caras fracturadas de gravilla.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Determinación del porcentaje de caras facturadas (grava).

Tabla 3.25. Tabla de resultados porcentaje de caras fracturadas de la grava

Peso total (g)		1008,7				
Tamaño del agregado		A	B	C	D	E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	((B/A)*100)	(%)	(%)
1"	3/4"	297,3	276,8	93,10	29,47	27,44
3/4"	1/2"	249,4	231,6	92,86	24,72	22,96
1/2"	3/8"	233,8	201,3	86,10	23,18	19,96
3/8"	N°4	228,2	154,3	67,62	22,62	15,30
Total		-	864	-	100	85,65

Porcentaje de caras fracturadas

$$\frac{\text{TOTAL E}}{\text{TOTAL D}} = 85,65 \%$$

- A Peso Muestra, g.
 B Peso Material con caras fracturadas, g.
 C Porcentaje de caras fracturadas parcial.
 D Porcentaje retenido de la gradación original.
 E Porcentaje de caras fracturadas total.

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del porcentaje de caras facturadas (gravilla).

Tabla 3.26. Tabla de resultados porcentaje de caras fracturadas de la gravilla

Peso total (g)		999,5				
Tamaño del agregado		A	B	C	D	E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	((B/A)*100)	(%)	(%)
1"	3/4"	30,2	27,8	92,05	2,99	2,76
3/4"	1/2"	417,3	398,6	95,52	41,37	39,52
1/2"	3/8"	425,7	384,3	90,27	42,20	38,10
3/8"	Nº4	126,3	45,3	35,87	12,52	4,49
Total		-	856	-	99,087935	84,86

Porcentaje de caras fracturadas $\frac{TOTAL E}{TOTAL D} = 84,86 \%$

- A Peso Muestra, g
 B Peso Material con caras fracturadas, g
 C Porcentaje de caras fracturadas parcial
 D Porcentaje retenido de la gradación original
 E Porcentaje de caras fracturadas total

Fuente: Elaboración propia.

Ambos porcentajes de caras fracturas tanto para grava como para gravilla están por encima del 75% y cumplen con la norma.

3.5.2. Ensayos de la emulsión asfáltica

Para los ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica se optó en principio por obtener a través del ensayo de destilación el cemento asfáltico residual, para así con este realizar los demás métodos correspondientes con su procedimiento específico detallado en cada punto y así hacer la comparación con la ficha técnica de técnica de la emulsión BETUMIX CMS – 2H.

3.5.2.1. Ensayo de viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 217; ASSHTO T202-91)

Este método cubre los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad cinemática de productos de petróleo a temperaturas especificadas.

El objetivo de este ensayo de viscosidad es de determinar el grado de fluidez de nuestra emulsión asfáltica de rotura media CMS-2H a una temperatura como lo indica su ficha técnica que es de 50°C.

Imagen 3.61. Prender el equipo y esperar que caliente por un lado el aceite y por otro lado el asfalto a una temperatura de 50°C. Luego introducir la emulsión.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.62. Una vez alcanzada la temperatura deseada quitar el corcho y dejar caer el asfalto y medir el tiempo con ayuda de un cronometro.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.27. Tabla de datos y resultados del ensayo de viscosidad.

Emulsión asfáltica BETUMIX CMS-2H							
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Say bolt-Furol a 50 °C	sSF	115	123	118	118,67	50	450

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.2.2. Ensayo de destilación (ASTM D6997 o AASHTO T59-97)

Este método generalmente se realiza para emulsiones asfálticas, para separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles. En este caso se lo realizo con el objetivo de conocer el cemento asfáltico residual que queda tras calentarlo hasta 260°C. y expulsar todo el componente de agua a través de la evaporación y expulsión del mismo como se verá a continuación.

Es un ensayo en el cual se usa $200 \pm 0,1$ gr de una muestra, por otro lado pesar el destilador, incluyendo la tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura. Luego introducir la emulsión en el destilador y aplicar calor con el quemador encendido y ajustado a la llama al mínimo; también aplicar calor con un quemador Bunsen al tubo conector, para prevenir la condensación de agua, mover el anillo quemador aproximadamente a nivel con el fondo cuando la temperatura leída en el termómetro fuera de aproximadamente 215°C . Incrementar la temperatura a $260 \pm 5^{\circ}\text{C}$ manteniéndola por 15 min. La destilación total se completa en 60 ± 15 min contados desde la primera aplicación de calor.

Imagen 3.63. Una vez bien limpios pesar cada uno de los componentes del equipo de destilación: el destilador, la tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.64. Una vez que pesamos todo el destilador más la muestra realizar el correcto armado del equipo pieza por pieza.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.65. Teniendo el equipo bien armado y seguro poner a calentar, y lecturar que se encuentre atura correcta.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.66. En el tiempo transcurrido se podrá observar la expulsión del agua de nuestra emulsión asfáltica a través del tubo.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.67. Una vez cumplido el tiempo determinado sacar y volver a pesar, quedando en el destilador el cemento asfáltico residuo de destilación.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:*Tabla 3.28. Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación.*

Emulsión asfáltica		
Muestra 1		
peso de destilador + termómetro + tapa +abrazadera + muestra		
peso antes del ensayo	g	2502,3
peso después del ensayo	g	2434,4
peso del contenido de agua evacuada	g	67,9
peso de muestra de emulsión inicial	g	200
porcentaje del contenido de agua evacuada	%	33,95
porcentaje de cemento asfáltico residual	%	66,05
Muestra 2		
peso de destilador + termómetro + tapa +abrazadera + muestra		
peso antes del ensayo	g	2504,8
peso después del ensayo	g	2445,1
peso del contenido de agua evacuada	g	59,7
peso de muestra de emulsión inicial	g	200
porcentaje de contenido de agua evacuada	%	29,85
porcentaje de cemento asfáltico residual	%	70,15
Muestra 3		
peso de destilador + termómetro + tapa +abrazadera + muestra		
peso antes del ensayo	g	2503,1
peso después del ensayo	g	2441,6
peso del contenido de agua evacuada	g	61,5
peso de muestra de emulsión inicial	g	200
porcentaje de contenido de agua evacuada	%	30,75
porcentaje de cemento asfáltico residual	%	69,25
PROMEDIO	%	68,48

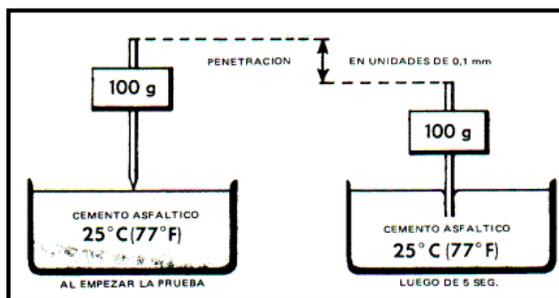
Fuente: Elaboración Propia.

3.5.2.3. Ensayo de penetración (ASTM D 5; AASHTO T49-97)

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos.

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante un ensayo de penetración. Durante éste ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100 gr) a una temperatura fija (25°C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5 seg). Se denomina penetración a la distancia hasta la cual penetra la aguja, que se mide en décimas de milímetro/dmm (0.1 mm). Por lo tanto, cuanto mayor es la penetración de la aguja, más blando es el cemento asfáltico.

Imagen 3.68. Ensayo de penetración.



Fuente: Manual de carreteras

Imagen 3.69. Colocar el asfalto residual en taras.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.70. Colocar las muestras en baño María de 25 °C por 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.71. Realizar el ensayo teniendo en cuenta que este limpia la aguja.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.29. Tabla de resultados del ensayo de penetración del cemento asfáltico residual.

Cemento asfáltico residual								
Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s 5 seg (0,1 mm)	Lectura N°1	mm	67	71	63			
	Lectura N°2		66	69	66			
	Lectura N°3		63	64	67			
	Promedio		65	68	65	66	50	100

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.4. Densidad relativa a 25°C (ASTM D71-94; AASHTO T229-97)

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra "A". después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergirla totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos para calibrar, luego una vez transcurrido el tiempo extraer los picnómetros, secar superficialmente y pesar y designar con la letra "B". Luego verter el cemento asfáltico aproximadamente 3/4 del picnómetro y dejar hasta que alcance temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras, designar ese dato como la letra "C". Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir también en agua destilada y dejar por 30 minutos, para luego secar, pesar y obtener el último dato, que se designa con la letra "D".

Imagen 3.72. *Peso de los picnómetros vacíos.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.73. *Calibrar y luego pesar cada uno de los picnómetros.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.74. Verter el cemento asfáltico residual en los picnómetros.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.75. Llenar con agua destilada cada uno de los picnómetros y dejar en baño maría por 30 minutos también en agua destilada sacar y pesar.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.30. Tabla de datos y resultados del ensayo de densidad relativa.

Cemento Asfáltico residual							
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	g	36,85	33,80	35,08			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	g	60,33	57,95	59,55			
Peso Picnómetro + Muestra	g	56,58	52,01	55,55			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	g	60,45	58,15	59,80			
Peso Específico o densidad relativa a 25°C.	g/cm ³	1,003	1,008	1,009	1,007	1,000	1,050

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.5. Ensayo de ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada.

Este ensayo consiste en armar el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubrir la superficie del plato con glicerina. Verter el cemento asfáltico en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra el nivel lleno del molde dejar que se enfríen para un periodo de 30 a 40 minutos y entonces poner el plato base y el molde lleno en el baño de agua a 25°C, por 30 minutos.

Quitar el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un contemporizador caliente cortar el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel. Posteriormente quitar la briqueta del plato, despegar los pedazos laterales, e inmediatamente realizar el ensayo.

Imagen 3.76. Equipo de ductilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.77. Llenar de agua el equipo de ductilidad al nivel de agua indicado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.78. Armado el plato base y el molde para los tres ensayos.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.79. Armado y engrasado de los platos de base y los moldes

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.80. Verter el cemento asfáltico en los moldes.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.81. Dejar enfriar por aproximadamente 30 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.82. Con una espátula o cuchillo enrazar los moldes.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.83. Una vez enraizados colocar a baño María en agua a 25 °C por 30 minutos aproximadamente.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.84. Separar el plato base y despegar los pedazos laterales del molde.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.85. Una vez listas las tres briquetas engancharlas en el equipo para realizar el ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.86. Medir en centímetros la distancia que se estira el asfalto antes de chocar la base.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.31. Tabla de datos y resultados del ensayo de ductilidad.

Cemento asfáltico residual							
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	102	118	125	115	>100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Ensayo de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Este quizá sea el ensayo más importante, puesto es el motivo de esta presente investigación, el proceso a seguir es el que una vez obtenidos los envases plásticos PET se buscara preparar el material para hacer la limadura, y para ello se recurre a moliendas o trituradoras del lugar y su posterior ensayo de análisis granulométrico en laboratorio para obtener el material retenido en el tamiz N°100 y con el cual se va a trabajar por vía húmeda incorporándolo a la emulsión.

3.5.3.1. Preparación de la muestra.

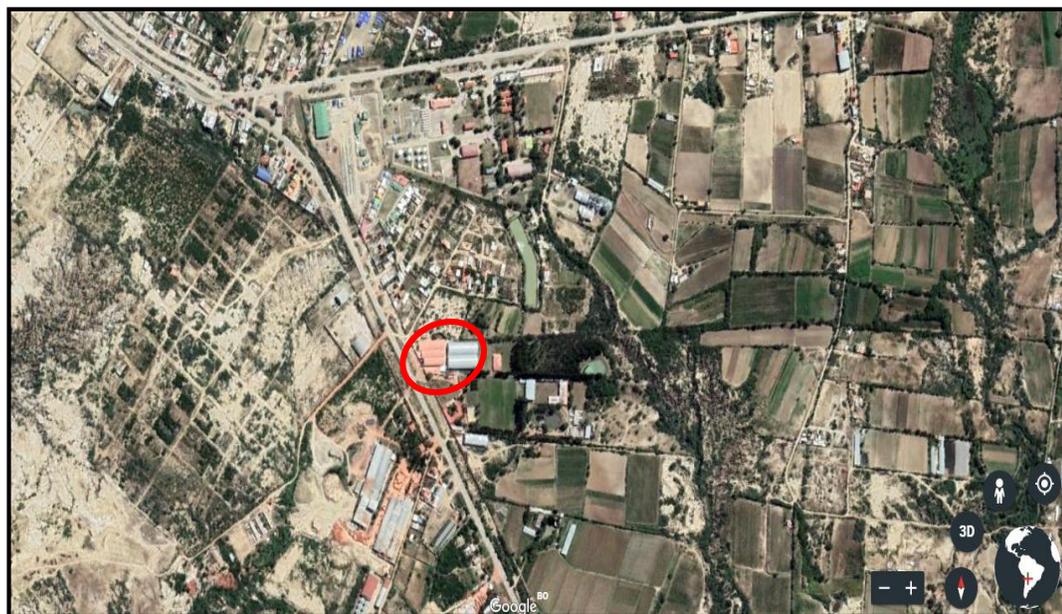
Habiendo obtenido los envases plásticos de Tereftalato de Polietileno (PET) se dispuso a ubicar o buscar un lugar donde realizar el triturado o molido del mismo.

A través de información por el medio local se pudo contactar con la empresa Capital Industrial de Tarija, ubicada en instalaciones dentro de la Fabrica Formas plásticas que se encuentra en la carretera a Bermejo Km. 8 de Tarija.

Capital industrial es una empresa nueva en el rubro que cuenta con el apoyo de la alcaldía y convenios con la empresa EMAT, esta empresa se dedica a la recolección y reciclado de elementos plásticos, así como también al comprimido, triturado o molido de las mismas. Esta empresa perteneciente al Ingeniero Comercial Enzo Valdez Subía el cual es dueño y nos facilitó esta tarea.

A continuación se dispone de imágenes del lugar y fotos de los equipos de trituración.

Imagen 3.87. Croquis de la fábrica Formas Plásticas Tarija.



Fuente: Programa Google Earth.

Imagen 3.88. Fabrica Formas Plásticas.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.89. Equipo de trituración de plástico o molienda industrial.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.2. Análisis granulométrico

Una vez realizado el proceso de triturado y obtener porciones menores de botellas plástica PET se procedió a dirigirse con el material al laboratorio de suelos y hormigones de la universidad Juan Misael Saracho a realizar el análisis granulométrico a través de los tamices N°50, N°100 Y N°200 y la posterior obtención de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) resultado del material retenido en el tamiz N°100 por tener una cantidad aceptable y de buen tamaño para adaptarlo como polímero en la emulsión.

Imagen 3.90. Material a utilizar para el tamizado.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.91. Tamizado del material plástico triturado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3.92. Material retenido en el tamiz N°100.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

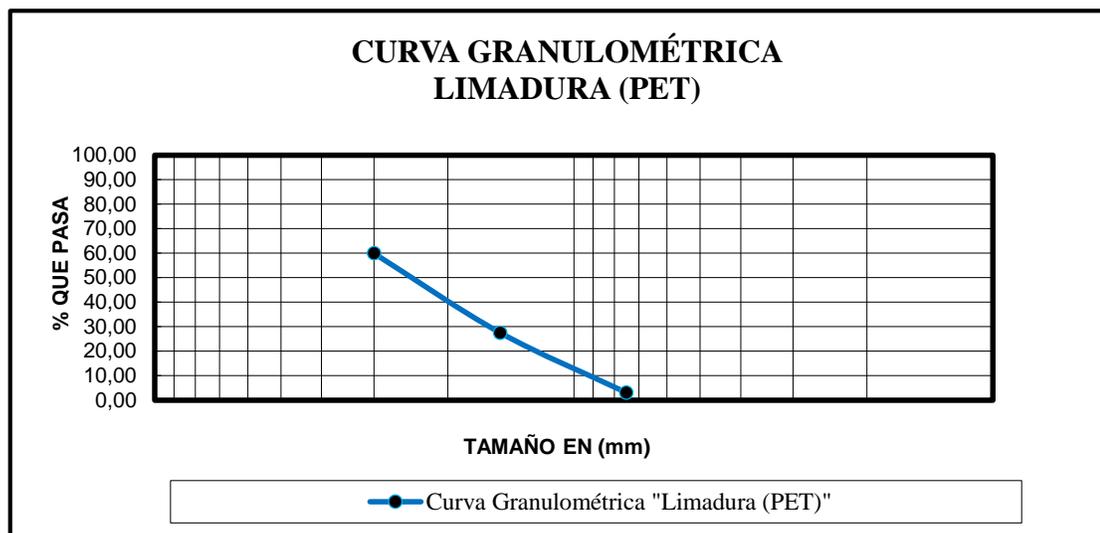
Limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Tabla 3.32. Granulometría de la limadura (PET).

Peso Total (g)			306,3		
Tamices	tamaño (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido	% que pasa del total
N°50	0,30	122,50	122,50	39,99	60,01
N°100	0,15	99,30	221,80	72,41	27,59
N°200	0,075	74,90	296,70	96,87	3,13
BASE	-	4,40	301,10	98,30	1,70
	SUMA	301,1			
	PÉRDIDAS	5,2			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.10. Curva granulometría de la limadura (PET).



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV

INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. PREPARACIÓN Y REVISIÓN DE DATOS DE CÁLCULO

4.1.1. Resultados de caracterización de materiales

En esta investigación los agregados que he utilizado para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas con emulsiones asfálticas con adición de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) tienen las siguientes propiedades:

4.1.1.1. Granulometría utilizada

Se realizó tres granulometrías para cada clasificación de agregados, es decir; arena, grava 3/4" y grava 3/8".

Se llamará agregado fino a la arena triturada que se utilizó en la presente investigación.

Asimismo se llamará agregado grueso a la grava 3/4" (grava) y a la grava 3/8" (gravilla).

Granulometría de agregado grueso:

Grava 3/4"

Para la granulometría de la grava 3/4" se realizaron tres ensayos con un peso de 10000 gramos para cada uno, y así con el promedio de los ensayos hallar una granulometría final de la grava 3/4" que cumpla con todas las especificaciones de la ASTM C-33.

Tabla 4.1. Resumen de granulometrías realizadas. Grava 3/4".

Ensayo	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
1	3,3	2963,4	2418,8	2379,3	2219,6	0,6	0,3	0,2	0,4	6,1	1,6	4,4	9998
2	0	2688,4	2498	2444,1	2353,9	0,4	0,7	0,5	0,2	4,2	3,1	3,9	9997,4
3	0	3033,87	2440	2216,9	2295,8	0,3	0,2	0,4	0,3	3,8	2,9	4,1	9998,6

Fuente: Elaboración propia.

De la cuales según especificación de la ASTM C-33 el ensayo 1 y 3 cumplían los porcentajes pasantes correctos y estaban dentro de la faja de trabajo, y así con estos valores y hallando el promedio de las granulometrías mencionadas se obtuvo la Tabla a continuación:

Tabla 4.2. Granulometría resultante de agregado grueso (Grava).

Peso Total (g)			10000			% Que pasa s/g. Especif. ASTM C-33	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa		
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25,4	1,10	1,10	0,01	99,99	-	-
3/4"	19,0	2895,22	2896,32	28,96	71,04	35	70
1/2"	12,5	2452,27	5348,59	53,49	46,51	-	-
3/8"	9,50	2346,77	7695,36	76,95	23,05	10	30
Nº4	4,75	2289,77	9985,12	99,85	0,15	0	5
Nº8	2,36	0,43	9985,56	99,86	0,14	-	-
Nº16	1,18	0,40	9985,96	99,86	0,14	-	-
Nº30	0,60	0,37	9986,32	99,86	0,14	-	-
Nº50	0,30	0,30	9986,62	99,87	0,13	-	-
Nº100	0,15	4,70	9991,32	99,91	0,09	-	-
Nº200	0,075	2,53	9993,86	99,94	0,06	-	-
BASE	-	4,13	9997,99	99,98	0,02	-	-
	Suma	9998,0					
	Pérdidas	2,0					
	MF	7,05					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1. Curva granulometría resultante del agregado grueso (Grava).

Fuente: Elaboración propia.

Gravilla 3/8"

Para la granulometría de la gravilla 3/8" se realizaron tres ensayos con un peso de 10000 gramos para cada uno, y así con el promedio de los ensayos hallar una granulometría final de la gravilla 3/8" que cumpla con todas las especificaciones de la ASTM C-33.

Tabla 4.3. Resumen de granulometrías realizadas. Gravilla 3/8".

Ensayo	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
1	0	345,6	4098,2	3963,3	1556,9	20,3	1,7	0,4	0,6	2,1	2,5	6,1	9997,7
2	0	446,3	4093,2	3956,2	1472,6	17,6	0,2	0,4	0,7	2,6	3,6	3,6	9998,2
3	0	348,4	4150,9	3973,6	1418	94,5	0,9	0,5	0,8	1,9	2,9	5,8	9998,2

Fuente: Elaboración propia.

De la cuales según especificación de la ASTM C-33 los 3 ensayos cumplían los porcentajes pasantes correctos y estaban dentro de la faja de trabajo, y así con estos valores y hallando el promedio de las granulometrías mencionadas se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Granulometría resultante de agregado grueso (Gravilla).

Peso Total (g)			10000					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33		
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
3/4"	19	366,77	366,77	3,67	96,33	90	100	
1/2"	12,5	4114,10	4480,87	44,81	55,19	20	55	
3/8"	9,5	3957,70	8438,57	84,39	15,61	0	15	
N°4	4,75	1502,50	9941,07	99,41	0,59	0	5	
N°8	2,36	44,13	9985,20	99,85	0,15	-	-	
N°16	1,18	0,93	9986,13	99,86	0,14	-	-	
N°30	0,60	0,43	9986,57	99,87	0,13	-	-	
N°50	0,30	0,70	9987,27	99,87	0,13	-	-	
N°100	0,15	2,20	9989,47	99,89	0,11	-	-	
N°200	0,08	3,00	9992,47	99,92	0,08	-	-	
BASE	-	5,57	9998,03	99,98	0,02	-	-	
	Suma	9998,03						
	Pérdidas	1,97						
	MF	6,90						

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2. Curva granulometría resultante del agregado grueso (Gravilla).

Fuente: Elaboración propia.

Granulometría del agregado fino:

Arena

Para la granulometría de la arena se realizaron tres ensayos con un peso de 3000 gramos para cada uno, y así con el promedio de los ensayos hallar una granulometría final de arena que cumpla con todas las especificaciones de la ASTM C-33.

Tabla 4.5. Resumen de granulometrías realizadas. (Arena).

Ensayo	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
1	0	0	0	0	14,7	569,8	718,8	606,1	493,2	326,5	144,7	125,7	2999,6
2	0	0	0	0	28,6	325,6	824,6	794,2	306,6	415,3	189,7	114,6	2999,2
3	0	0	0	0	22,1	343,6	799,6	736,8	418,2	387,2	169,3	122,3	2999,1

Fuente: Elaboración propia.

De la cuales según especificación de la ASTM C-33 los 3 ensayos cumplían los porcentajes pasantes correctos y estaban dentro de la faja de trabajo, y así con estos valores y hallando el promedio de las granulometrías mencionadas se obtuvo la Tabla a continuación:

Tabla 4.6. Granulometría resultante de agregado fino (Arena).

Peso Total (g)			3000				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% que pasa	% Que pasa s/g. Especific. ASTM C-33	
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
Nº4	4,75	21,80	21,80	0,73	99,27	95	100
Nº8	2,36	413,00	434,80	14,49	85,51	80	100
Nº16	1,18	781,00	1215,80	40,53	59,47	50	85
Nº30	0,60	712,37	1928,17	64,27	35,73	25	60
Nº50	0,30	406,00	2334,17	77,81	22,19	10	30
Nº100	0,15	376,33	2710,50	90,35	9,65	2	10
Nº200	0,075	167,93	2878,43	95,95	4,05	-	-
BASE	-	120,87	2999,30	99,98	0,02	-	-
	Suma	2999,3					
	Pérdidas	0,70					
	MF	2,88					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3. Curva granulometría resultante del agregado fino (Arena).

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2. Otros ensayos realizados de los agregados

Tabla 4.7. Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultados de los ensayos	Norma
		Mínimo	Máximo		
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (%)	Grava 3/4"	-	35	21,00 %	ASTM C131
	Gravilla 3/8"			20,35 %	
Equivalente de arena (%)	Arena	50	-	70.54%	ASTM D2419
Peso específico de agregado grueso (gr/cm ³)	Grava 3/4"	2	3	2,58 g/cm ³	ASTM C127
	Gravilla 3/8"			2,70 g/cm ³	
Absorción de agua en agregados gruesos (%)	Grava 3/4"	-		1,64%	ASTM C127
	Gravilla 3/8"			1,82%	
Peso específico de agregado fino (gr/cm ³)	Arena	2	3	2,66 g/cm ³	ASTM C128
Absorción de agua en agregados finos (%)	Arena	-		1,75%	ASTM C128
Peso unitario (gr/cm ³)	Grava 3/4"	-		1,391 g/cm ³	ASTM C129
	Gravilla 3/8"			1,384 g/cm ³	
	Arena			1,650 g/cm ³	
Porcentaje de caras fracturadas (%)	Grava 3/4"	75	-	85,65 %	ASTM D5821-95
	Gravilla 3/8"			84,86 %	

Fuente: Elaboración propia.

Evaluando cada uno de los resultados obtenidos en laboratorio de los ensayos de agregados pétreo en función a la norma ASTM se concluye lo siguiente:

Desgaste de la máquina de los ángeles:

Los valores de este ensayo según normativa tanto de grava como de gravilla se encuentran por debajo de los 35% de desgaste siendo apto el material para el uso y diseño de mezclas asfálticas.

Equivalente de Arena:

Para este ensayo se obtuvo un valor de 70.54% de arena en la muestra la cual según norma

se encuentra sobre los 50% recomendados.

Peso específico y absorción de agua en agregados finos y gruesos:

Con este ensayo se determinaron los pesos específicos a granel, saturados y aparentes, así también como el porcentaje de absorción que tienen cada uno de nuestros agregados a utilizar en la mezcla.

Donde con nuestros valores de cálculos obtenidos se puede apreciar que los pesos específicos de nuestros agregados se encuentran entre 2 a 3 gr/cm³ según la norma, e incluso para diseño de mezclas los rangos apropiados para un óptimo diseño oscilan entre 2,55 gr/cm³ y 2,75 gr/cm³, estando nuestros valores de peso específico dentro de los parámetros, además de tener un % de absorción bajo que denota que el agregado es apto y bueno para su aplicación en las mezclas asfálticas.

Peso unitario:

Por medio de tres ensayos realizados tanto para grava, gravilla y arena. Se obtuvo valores de peso unitario suelto y compactado que nos muestra el peso volumétrico que ocupara cada uno de nuestros agregados. Si bien no hay una especificación puesta para este ensayo los valores se ajustan a resultados obtenidos en experiencias anteriores para diseño de mezclas y son aceptables.

Porcentaje de caras fracturadas:

Con este ensayo tanto para grava y gravilla se tiene porcentajes de caras fracturadas tanto de grava y de gravilla por encima del 75% indicado según la normativa ASTM.

4.1.2. Resultados de caracterización de emulsión asfáltica.

En la presente investigación se trabajó con una emulsión asfáltica de rotura media BETUMIX CMS-2H evaluada en función a su ficha técnica la cual esta normada por AASHTO, teniendo parámetros iguales que la norma ASTM se evalúa en función a su especificación los resultados en los ensayos siguientes:

Tabla 4.8. Resultados de los ensayos de caracterización de la emulsión.

Ensayo	Especificación		Resultados de los ensayos	Norma
	Mínimo	Máximo		
Viscosidad Saybolt-Furol	50	450	119 sSF	ASTM D5
Residuo por destilación.	65	-	68.48 %	ASTM D6997
Penetración a 25°C, 100g; 5 seg.	50	100	66 mm	ASTM D113
Densidad relativa a 25°C	1,000	1,050	1.007	ASTM D71-94
Ductilidad	100	-	115 cm	ASTM D113

Fuente: Elaboración propia.

Viscosidad Saybolt-Furol:

Para el primer ensayo se realizó dos ensayos y se halló el promedio de los mismos que según especificaciones es valor hallado 119 segundos se encuentra entre los rangos de 50 segundos y 450 segundos Saybotl Furol.

Destilación:

Para este ensayo se determinó el porcentaje de cemento asfáltico que contiene la emulsión separando el agua del cemento asfáltico por medio del destilador subiendo la temperatura, se realizaron tres ensayos de destilación los cuales dieron un valor promedio de 68% de cemento asfáltico residual, valor cual según especificaciones se encuentra sobre los 65% indicados como mínimo.

Para el resto de los ensayos se trabajó con el cemento asfáltico residual obtenido por medio de la destilación, ensayos los cuales evaluaremos a continuación:

Penetración:

Para el ensayo de penetración tuvo tres ensayos de tres lecturas cada uno los cuales en general dieron un promedio de 86 mm de penetración, que se encuentra entre los rangos de 50 mm y 100 mm indicado en las especificaciones.

Peso específico:

Para hallar el peso específico se realizó tres ensayos de los cuales se sacó un promedio obteniendo un valor de 1.007 g/cm³. El cual se encuentra dentro de los rangos de

especificación 1,000 g/cm³ a 1,050 g/cm³.

Ductilidad:

Para hallar el valor de ductilidad se realizó tres ensayos hallando un promedio de 115 cm superando al mínimo según especificaciones que es 100 cm.

4.2. DISEÑO DE UNA MEZCLA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DEL EMULSIÓN ASFÁLTICA

4.2.1. Dosificación

4.2.1.1. Determinación de proporciones de agregados

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

Tabla 4.9. Contenido de agregados en granulometría formada.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10. Granulometría formada.

Tamices	Tamaño (mm)	TOTAL				Especificaciones	
		Peso ret. 1,00	Ret. acum	% ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,17	0,17	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	470,96	471,13	9,42	90,58	90	100
1/2"	12,5	779,25	1250,38	25,01	74,99	-	-
3/8"	9,50	747,79	1998,16	39,97	60,03	60	80
Nº4	4,75	511,88	2510,04	50,21	49,79	35	65
Nº8	2,36	348,65	2858,69	57,19	42,81	20	50
Nº16	1,18	650,99	3509,67	70,21	29,79	-	-
Nº30	0,60	593,74	4103,41	82,09	17,91	-	-
Nº50	0,30	338,45	4441,86	88,86	11,14	3	20
Nº100	0,15	314,54	4756,40	95,15	4,85	-	-
Nº200	0,075	140,62	4897,02	97,96	2,04	2	8
BASE	-	101,90	4998,92	100,00	0,00	-	-
	Suma	4998,9					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.4. Curva de la granulometría formada.

Fuente: Elaboración propia.

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

4.2.1.2. Determinación de proporción de emulsión

Ya establecida la combinación granulométrica de los agregados, se procedió a la determinación del contenido óptimo de emulsión, para el cual se establecieron parámetros en función al cemento asfáltico residual de la emulsión haciendo variar desde 4,5% hasta a 9,5% con intervalos de cada 1,0 %.

El porcentaje de cemento asfáltico residual de la emulsión CMS-2H que se va utilizar se estableció en función al ensayo de destilación de la emulsión asfáltica realizado en el laboratorio obteniendo el valor promedio de los tres ensayos realizados de 68,48% de cemento asfáltico en función al total de la emulsión asfáltica.

Se optó por realizar pruebas a briquetas con 6 porcentajes diferentes de emulsión para conocer el comportamiento de sus propiedades mecánicas, especialmente densidad, porcentaje de vacíos, Estabilidad y Fluencia, haciendo variar 17,52 litros de emulsión por cada grupo de briquetas y haciendo 3 briquetas por punto de emulsión. Los contenidos de emulsión serían de 65,70 l/m³, 80,30 l/m³, 94,90 l/m³, 109,50 l/m³, 124,10 l/m³ y 138,7 l/m³. Se prosiguió a los cálculos teóricos de conversión para el peso de una briqueta de 1200 g, en la tabla siguiente se muestran los resultados.

Tabla 4.11. Resultados de contenidos de emulsión.

Cemento asfáltico residual (68,48%)			4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50
Emulsión asfáltica (100%)			6,57	8,03	9,49	10,95	12,41	13,87
Para 1m ³	Vol.	L	65,71	80,32	94,92	109,52	124,12	138,73
	Vol.	ml.	78,86	96,38	113,90	131,43	148,95	166,47
para una briqueta de 1200 g	Peso	g	78,86	96,38	113,90	131,43	148,95	166,47

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.3. Determinación de las cantidades de agregados y de emulsión

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

TABLA DE RESULTADOS:

Tabla 4.12. Contenidos de agregados y emulsión convencional.

		Cantidad de emulsión en la mezcla					
Para 1m ³	L	65,71	80,32	94,92	109,52	124,12	138,73
Para una briketa de 1200 g	ml	78,86	96,38	113,90	131,43	148,95	166,47
Porcentaje de emulsión (%)		6,57%	8,03%	9,49%	10,95%	12,41%	13,87%
Porcentaje de agregado (%)		93,43%	91,97%	90,51%	89,05%	87,59%	86,13%
Peso de la emulsión (g)		78,86	96,38	113,90	131,43	148,95	166,47
Peso de la grava (g)		336,343	331,086	325,829	320,572	315,315	310,058
Peso de la gravilla (g)		224,229	220,724	217,220	213,715	210,210	206,706
Peso de la arena (g)		560,572	551,811	543,049	534,287	525,526	516,764
Peso total de la briketa(g)		1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

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

4.2.2. Elaboración de briquetas convencionales método Marshall modificado

Equipo y materiales utilizados:

Balanza $A \pm 0.1$ gr

Cuchara para extraer agregados

Platos

Frascos

Moldes para la preparación de briquetas

Papel filtro

Brocha

Bandeja metálica para la mezcla

Cuchara para la mezcla

Termómetro

Espátula

Equipo de compactación

Martillo o pistón

Extractor de briquetas

PROCEDIMIENTO:

La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, en donde se realizará el ensayo de Marshall modificado para hallar seis puntos de contenidos de emulsión que variarán en un valor de 17,52 ml de un punto a otro, para ello se realizara 3 briquetas para cada punto que determine el contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Para empezar se realizó el pesaje de las cantidades de grava de 3/4", gravilla de 3/8" y arena mediante una balanza como se muestra en las siguientes imágenes, para luego preparar los agregados en un plato o bandeja a una temperatura de 40°C para eliminar exceso de humedad que haga variar nuestra mezcla y luego dejarla enfriar o airear.

Imagen 4.1. Selección de materiales para pesar.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.2. Pesando cada uno de los materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.3. *Haciendo la mezcla de grava, gravilla y arena.*



Fuente: Elaboración propia.

Luego se pesó la cantidad de emulsión necesaria para cada porcentaje como se muestra en la siguiente *imagen 4.4.*, para después realizar la mezcla.

Imagen 4.4. *Pesando la cantidad de emulsión.*

Fuente: Elaboración propia.

Una vez lista la emulsión y con el debido control de la temperatura que no exceda los 30°C para evitar la pérdida de agua necesaria para el mezclado, se procede a preparar el agregado seco y ya aireado para realizar el mezclado a una temperatura usual que debe oscilar aproximadamente entre los 25 a 35°C de manera ideal, eso si no excediendo los

37°C temperatura ambiente usualmente máxima o más desfavorable en Tarija.

Imagen 4.5. Controlando la temperatura del agregado antes de la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo listo tanto el agregado para la mezcla así como la emulsión se empezó a preparar los moldes, poniendo la base en el equipo de compactación, luego el molde y el collarín, sobre la base dentro del molde se coloca un papel, para mezclas en frío (MAF) no siempre es necesario cubrir de aceite el papel filtro, solo basta con colocarlo. A continuación se debe vaciar los agregados en una bandeja y verter la emulsión de manera uniforme y remover durante 60 segundos o hasta que la emulsión se haya dispersado lo suficiente en la mezcla.

Imagen 4.6. Vertiendo la emulsión en el agregado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.7. Realizando la mezcla de los agregados y la emulsión.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez que nuestra mezcla convencional sea lo más homogénea posible cubriendo todas las partículas de agregado con emulsión y controlando que la temperatura de la mezcla sea la correcta y que no exceda los 40°C que es la temperatura máxima aceptable, ya que el agua de nuestra mezcla se evapora más de un 60% durante el procedimiento de mezclado, y no queremos una rotura prematura se procede de la siguiente manera.

Imagen 4.8. Mezcla previa al compactado.

Fuente: Elaboración propia.

Previamente a la compactación es necesario secar o airear la mezcla, así posteriormente se debe vaciar la mezcla dentro del molde en tres capas dando 25 golpes a cada capa con una varilla para que la mezcla esté bien distribuida, 15 golpes alrededor del perímetro y 10 golpes en el interior del molde de manera consecutiva, donde la temperatura para la compactación por lo general es a temperatura ambiente entre 25 a 35°C como temperatura ideal, no excediendo los 40°C.

Imagen 4.9. *Vaciado de la mezcla en el molde.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.10. *Varillado de cada capa de mezcla en el molde.*

Fuente: Elaboración propia.

Luego se introdujo otro papel filtro al molde sobre la mezcla, y posteriormente se procedió a realizar la compactación, agarrando el martillo a 90° elevándolo y soltándolo dando 75 golpes por cara, una vez terminado de compactar se lo deja airear o se aplica un poco de calor para que el asfalto residual se afirme a las partículas de agregado, el lapso de espera es por aproximadamente dos horas o incluso más; es decir, el tiempo necesario para así eliminar el agua que aún queda en la briqueta, posteriormente se retira el molde del equipo de compactación y se lo coloca en un extractor de probetas, para extraer la briqueta realizada como se muestra en las siguientes imágenes.

Imagen 4.11. Colocado del papel sobre la mezcla, previo al compactado.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.12. Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar secar.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.13. *Extracción de la briqueta.*



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente a la extracción de la briqueta se procede a enumerarla 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, densidad, % de vacíos, peso volumétrico, estabilidad y fluencia, para realizar el análisis del comportamiento de la mezcla compactada.

Imagen 4.14. *Muestreo de nuestras briquetas convencionales.*

Fuente: Elaboración propia.

4.3. DISEÑO DE LA MEZCLA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMADURA DE TEREFALATO DE POLIETILENO Y CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN 10,00 %, MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO

4.3.1. Dosificación

4.3.1.1. Determinación de proporciones de agregados

Para la elaboración de la mezcla con emulsión asfáltica modificada se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de agregado fino para la granulometría tal cual se estableció y describió en el punto anterior para la mezcla con emulsión asfáltica convencional, donde se tuvieron las siguientes tablas: véase en *Tabla 4.9.*, *Tabla 4.10.* y *Grafico 4.4.*

4.3.1.2. Determinación de proporción de emulsión

Ya establecida la misma combinación granulométrica de los agregados, se procedió a la determinación del contenido óptimo de emulsión, mismo contenido el cual se buscó hallar en el anterior punto como porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de una mezcla con emulsión asfáltica tipo convencional, y valor descrito en la tabulación de resultados y gráficas (*véase en el punto 4.5.*), el cual dio como resultado en función a la ecuación hallada y el promedio de porcentajes óptimos de las propiedades mecánicas, un porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de 10.00 % valor con el cual se trabajara para las briquetas con emulsión asfáltica modificadas descritas en este punto.

Para validar así este resultado se procedió a consulta del Manual Básico de Emulsiones Asfálticas de procedencia brasilera de donde obtuvimos nuestra emulsión y esta validada con más de 1000 ensayos la cual determina como contenido óptimo de emulsión asfáltica para una mezcla en frío el valor de 105,00 l/m³. Es decir su valor oscila en 10,50% para la mezcla

Imagen 4.15. Contenido óptimo de emulsión asfáltica según revista.

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

Nota:
Baseado em m³ de massa solta de PMF solta, antes da compactação e cura (como produzida e comprada).
Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica = 1,0 kg/l.

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas.

No obstante el valor de la revista solo valida nuestro resultado hallado como porcentaje óptimo de emulsión asfáltica cercano al cual tomaremos para esta investigación que es de 10,00%, debido a que el valor que hallamos se encuentra en función a nuestros agregados de la zona en la que nos encontramos, además nuestro porcentaje optimo hallado es un porcentaje menor al del manual que da mejores resultados es decir la norma nos recomienda usar un porcentaje de cemento asfaltico residual menor al 8,5% o lo menor posible debido a que en costo, si el porcentaje residual excede el 8,5% es conveniente optar por una mezcla caliente, y puesto que nuestro porcentaje de cemento asfaltico residual es de 6,84% nos resulta factible y económicamente positivo optar por este valor.

4.3.1.3. Determinación de proporción de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)

Para la determinación de este porcentaje se procedió a la consulta de muchos textos guías y libros, y pues se optó por la incorporación de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) mediante vía húmeda puesto que a lo largo de las investigaciones este método ha dado mejores resultados en cuanto a mejora de propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica a diferencia del método de vía seca añadiendo al agregado.

Procediendo el rango de porcentaje de limadura de PET utilizado en esta investigación se obtuvo de un estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia la cual se basa en todo los estudios tesis o investigaciones hechas en su país y nos indica el máximo porcentaje de polímeros de distintos materiales que se pueden usarse en la mezcla antes de que esta disminuya en cuanto a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a través de la siguiente imagen.

Imagen 4.16. Polímeros modificadores de asfalto.

Fuente: Estado del conocimiento de estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia.

Esta grafica nos indica que el valor máximo de polietileno u otro tipo de plástico usado en mezclas con emulsión asfáltica es de 4,00%, puesto que el fin de esta investigación es determinar el máximo porcentaje de limadura PET como polímero actuante en la emulsión

para obtener mejores resultados en las propiedades mecánicas se optara por trabajar en un rango de 1,00% hasta 10,00% del total de la emulsión asfáltica cada intervalo de 1,00%.

4.3.1.4. Determinación de las cantidades de agregados, emulsión y limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)

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

TABLA DE RESULTADOS:

Tabla 4.13. Contenido de agregado y emulsión incorporando 1,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briketa (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	1,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				118,80
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				1,20
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14. Contenido de agregado y emulsión incorporando 2,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	2,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				117,60
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				2,40
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15. Contenido de agregado y emulsión incorporando 3,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	3,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				116,40
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				3,60
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16. Contenido de agregado y emulsión incorporando 4,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	4,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				115,20
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				4,80
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17. Contenido de agregado y emulsión incorporando 5,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	5,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				114,00
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				6,00
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.18. Contenido de agregado y emulsión incorporando 6,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	6,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				112,80
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				7,20
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19. Contenido de agregado y emulsión incorporando 7,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20. Contenido de agregado y emulsión incorporando 8,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	8,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				110,40
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				9,60
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.21. Contenido de agregado y emulsión incorporando 9,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	9,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				109,20
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				10,80
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.22. Contenido de agregado y emulsión incorporando 10,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Peso inicial de la emulsión sin polímeros	Peso total de la briqueta (g)	Porcentaje de agregado (%)	Porcentaje óptimo de emulsión calculado (%)	Porcentaje de limadura de PET
120	1200,00	90,00	10,00	10,0
Agregado total (g)				1080,00
Arena (g)				540,00
Grava (g)				324,00
Gravilla (g)				216,00
Emulsión (g)				108,00
Limadura de Tereftalato de Polietileno PET (g)				12,00
Peso total briquetas (g)				1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Elaboración de briquetas modificadas método Marshall modificado.

Equipo y materiales utilizados:

Balanza A±0.1 gr

Cuchara para extraer agregados

Platos

Frascos

Moldes para la preparación de briquetas

Papel filtro

Brocha

Bandeja metálica para la mezcla

Cuchara para la mezcla

Termómetro

Espátula

Equipo de compactación

Martillo o pistón

Extractor de briquetas

PROCEDIMIENTO:

La preparación de las muestras se realizó en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, en donde se realizará el ensayo de Marshall modificado en diez puntos con distintos porcentajes de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno que será incorporado al contenido óptimo de emulsión hallado en el anterior punto mediante la vía húmeda, para ello se realizara 3 briquetas para cada punto que determine el contenido óptimo de polímero actuante en la emulsión y así su efecto sobre las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

Para empezar se realizó el pesaje de las cantidades de grava de 3/4", gravilla de 3/8" y arena mediante una balanza como se muestra en la siguiente imagen, para luego preparar los agregados en un plato o bandeja a una temperatura de 40°C para eliminar exceso de humedad que varié nuestra mezcla y luego dejarla enfriar o airear.

Imagen 4.17. Selección de materiales para pesar.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.18. Pesando cada uno de los materiales.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.19. Realizando el mezclado de grava, gravilla y arena.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a realizar el pesaje de la cantidad de emulsión y la cantidad de polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) que se va incorporar para la elaboración de las briquetas modificadas, dichos pesos irán en función de las tablas halladas con anterioridad en el punto 4.3.1.3., como se muestran a continuación en las siguientes

imágenes.

Imagen 4.20. Preparando la cantidad de polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.21. Pesando la cantidad de polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.22. *Porcentaje de polímero Tereftalato de Polietileno (PET).*

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.23. *Pesando la cantidad de emulsión*

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos cada uno de los pesos del polímero en función a cada porcentaje, se procede al mezclado de la emulsión y del polímero por medio de la vía húmeda. Donde lo primero que se debe hacer es introducir la emulsión en el horno a una temperatura constante de 140°C por un tiempo de aproximado de 10 minutos no más debido a que en el proceso puede perder demasiada agua necesaria para el mezclado, como paso siguiente se debe introducir el polímero procurando que la mezcla sea homogénea y esparciendo bien el plástico para evitar la formación de grumos, y volver a introducir la emulsión modificada en el horno por otros 10 minutos a la temperatura de 140°C este proceso debe

ser rápido, y para finalizar se debe sacar la nueva emulsión modificada del horno y dejar enfriar hasta que esta alcance una temperatura ambiente de entre 25 y 35°C.

Imagen 4.24. Echando el polímero a la emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.25. Emulsión más el polímero de limadura d Tereftalato de Polietileno (PET) previa al mezclado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.26. *Mezcla y control de temperatura de la emulsión modificada con polímeros.*



Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida nuestra emulsión modificada con polímeros PET a una temperatura ambiente, se procede a preparar el agregado seco y ya aireado para realizar el mezclado a una temperatura usual que debe oscilar aproximadamente entre los 25 a 35°C de manera ideal, eso si no excediendo los 37°C temperatura ambiente usualmente máxima o más desfavorable en Tarija.

Imagen 4.27. *Mezcla del agregado preparado a la temperatura indicada.*

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo listo tanto el agregado para la mezcla así como la emulsión modificada con polímeros PET se empezó a preparar los moldes, poniendo la base en el equipo de compactación, luego el molde y el collarín, sobre la base dentro del molde se coloca un papel, para mezclas en frío no es necesario cubrir de aceite el papel filtro, solo basta con colocarlo.

A continuación se debe vaciar los agregados en una bandeja y verter la emulsión modificada con polímeros PET obtenida, este proceso se debe realizar de manera uniforme y remover durante 60 segundos o hasta que la emulsión se haya dispersado lo suficiente en la mezcla.

Imagen 4.28. *Vertiendo la emulsión modificada con polímeros en el agregado.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.29. Realizando el mezclado de agregado más la emulsión modificada con polímeros.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez que la mezcla modificada sea lo más homogénea posible cubriendo todas las partículas de agregado con emulsión modificada con polímeros y controlando que la temperatura de la mezcla sea la correcta y que no exceda los 40°C, ya que el agua de nuestra mezcla se evapora más de un 60% durante el procedimiento de mezclado, y no queremos una rotura prematura.

Imagen 4.30. Mezcla previa al compactado.

Fuente: Elaboración propia.

De manera posterior y previamente a la compactación es necesario secar o airear la mezcla, así luego se empezó a vaciar la mezcla dentro del molde en tres capas dando 25 golpes a cada capa con una varilla para que la mezcla este bien distribuida, 15 golpes alrededor del perímetro y 10 golpes en el interior del molde, posteriormente se verifica que la temperatura para la compactación que por lo general es a temperatura ambiente idealmente entre 25 a 30°C en mezclas en frío y que no exceda los 40°C.

Imagen 4.31. Vaciado de la mezcla en el molde.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.32. Varillado de cada capa de mezcla en el molde.



Fuente: Elaboración propia.

Luego se introdujo otro papel filtro al molde sobre la mezcla, y posteriormente se procedió a realizar la compactación, agarrando el martillo a 90° elevándolo y soltándolo dando 75 golpes por cara, una vez terminado de compactar se lo deja airear o se aplica un poco de calor para que el asfalto residual se afirme a las partículas de agregado, el lapso de espera es por aproximadamente dos horas o incluso más; es decir, el tiempo necesario para así eliminar el agua que aún queda en la briqueta, posteriormente se retira el molde del equipo de compactación y se lo coloca en un extractor de probetas, para extraer la briqueta realizada como se muestra en las siguientes imágenes.

Imagen 4.33. Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar secar.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.34. Briqueta una vez finalizado el compactado.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.35. Extracción de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente a la extracción de la briqueta se procede a enumerarla 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, densidad, % de vacíos, peso volumétrico, estabilidad y fluencia, para realizar el análisis del comportamiento de la mezcla compactada.

4.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

4.4.1. Determinación del peso volumétrico

Para empezar se realizó el marcado de nuestras briquetas en cuatro puntos, el marcado se hizo con ayuda de una regla y de una tiza, y luego con un vernier se procedió a medir y registrar las cuatro alturas, y así por igual se midió dos diámetros de la briqueta en las dos direcciones, también se determinó el peso de las briquetas a través de una balanza, todo este procedimiento se muestra en las siguientes imágenes.

Imagen 4.36. Marcado de briqueta para sus posteriores mediciones.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.37. Briqueta marcada en sus cuatro direcciones.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.38. Midiendo las alturas de las briquetas con un vernier.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.39. Midiendo los diámetros de las briquetas con un vernier.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.40. Determinando el peso de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Determinación de la Densidad y % de vacíos

Para lo siguiente se realizó las mediciones de peso sumergido y saturado pero superficialmente seco de la briqueta en el laboratorio de suelos y hormigones, para obtener el peso sumergido de la briqueta se introdujo la briqueta en baño maría a 25°C por aproximadamente 5 minutos y de allí a pesarlas dentro de un canastillo en agua, para posteriormente obtener el peso de la briqueta saturada pero superficialmente seca sacándola del agua y secando la superficie con un trapo para su posterior pesaje. La descripción de lo realizado se muestra a continuación en las siguientes imágenes.

Imagen 4.41. Briquetas en baño María a 25°C por 5 min.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.42. Determinar el peso de las briquetas sumergidas en agua.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.43. Determinación del peso saturado superficialmente seco de briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Ensayo de estabilidad y fluencia.

En primer lugar se realizó la medición de las alturas en cuatro puntos de la briqueta con un vernier para así determinar su altura media, luego se introdujo las briquetas en baño maría a 25°C. por un periodo de 30 minutos para luego así sacarlas secarlas envolverlas con papel y colocar las briquetas en una mordaza previamente limpia en sus interiores y llevarla luego a la prensa Marshall para aplicarle carga hasta que se produzca la rotura de la briqueta, con la lectura y el anote de la estabilidad y fluencia dadas por el equipo.

Imagen 4.44. Poner las briquetas en baño maría a 25°C por 30 min para cada una.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.45. Transcurridos los 30 minutos secar la briqueta superficialmente.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.46. *Envolver las briquetas en papel.*



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.47. *Colocado de la briqueta en el centro de la mordaza.*

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.48. Colocar la mordaza con la briqueta en la prensa Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.49. Regular el dial de estabilidad y colocar el dial de flujo.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.50. Prensa Marshall previo a la deformación.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.51. Lectura del dial de estabilidad (dentro del anillo Marshall) y del dial de deformación para el flujo.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.52. Deformación de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.53. Briqueta deformada.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4.54. Todas las briquetas luego del ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

4.5. TABULACIÓN DE RESULTADOS

4.5.1. Briquetas convencionales

La siguiente tabla muestra los datos que se obtuvieron con las distintas mediciones que se realizó a las briquetas convencionales.

Tabla 4.23. Lectura de datos obtenidos para el cálculo de 18 briquetas, 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	g	g	g	pulg,	mm
1	6,31	6,33	6,29	6,29	10,15	10,12	1136,90	1153,50	648,60	932	260
2	6,31	6,31	6,29	6,28	10,11	10,12	1138,60	1174,40	659,50	1077	280
3	6,31	6,29	6,33	6,31	10,03	10,11	1133,40	1160,60	663,50	1132	290
4	6,29	6,25	6,26	6,32	10,13	10,11	1133,10	1144,70	644,80	1112	300
5	6,30	6,30	6,25	6,24	10,04	10,13	1138,20	1155,50	656,60	1229	320
6	6,24	6,27	6,26	6,23	10,13	10,14	1137,10	1149,80	648,90	1189	300
7	6,18	6,20	6,21	6,18	10,15	10,14	1136,20	1138,00	642,60	1262	330
8	6,23	6,22	6,24	6,23	10,14	10,11	1132,20	1134,10	640,20	1303	320
9	6,23	6,22	6,18	6,15	10,15	10,13	1129,90	1132,50	637,00	1276	320
10	6,24	6,23	6,23	6,23	10,11	10,12	1130,90	1135,80	640,10	1263	350
11	6,25	6,24	6,25	6,26	10,12	10,12	1127,60	1131,20	638,20	1230	320
12	6,27	6,22	6,27	6,20	10,10	10,10	1125,40	1130,90	640,30	1288	330
13	6,24	6,27	6,25	6,25	10,11	10,13	1123,60	1129,80	634,10	1205	350
14	6,25	6,24	6,27	6,20	10,13	10,01	1121,50	1126,80	630,70	1079	330
15	6,27	6,30	6,25	6,24	10,11	10,12	1120,00	1125,10	631,90	1185	350
16	6,27	6,23	6,31	6,29	10,14	10,13	1123,50	1127,30	625,30	1010	350
17	6,30	6,31	6,27	6,24	10,11	10,19	1122,80	1129,80	629,90	985	340
18	6,33	6,32	6,25	6,24	10,14	10,12	1112,40	1120,30	624,80	930	370

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la camada de las primeras 18 briquetas con distintos porcentajes de emulsión asfáltica, para la determinación del peso volumétrico.

Tabla 4.24. Resultados de la obtención del peso volumétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores a continuación son los resultados óptimos de las propiedades mecánicas de una mezcla convencional en función de la emulsión asfáltica obtenidos a partir de la ecuación formada por la línea de tendencia.

Tabla 4.25. Resultados del ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Contenido de cemento asfáltico residual	Contenido de emulsión asfáltica	Densidad promedio (g/cm ³)	% de Vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (Vacíos de Agregado Mineral) (%)	R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
4,50	6,57	2,25	8,77	18,81	53,40	2.833,87	10,89
5,50	8,03	2,27	6,35	18,76	66,15	3.220,85	11,57
6,50	9,49	2,29	4,29	19,06	77,52	3.560,71	12,73
7,50	10,95	2,29	2,93	19,97	85,33	3.474,68	13,12
8,50	12,41	2,27	2,45	21,57	88,66	3.174,71	13,52
9,50	13,87	2,24	2,06	23,22	91,13	2.654,31	13,91
Cálculos en función a la ecuación	X	10,09	9,82	10,05	9,70	10,05	10,05
	Y máx.	2,2844	4,0046	19,42	78,50	3.524,5714	12,74

Fuente: Elaboración propia.

Calculo del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.

Tabla 4.26. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.

Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	3.524,571	10,050
	Fluencia Marshall (pulg)	12,741	10,050
	Densidad máxima (g/cm ³)	2,284	10,090
	Vacíos de la mezcla (%)	4,005	9,820
	% Porcentaje óptimo	Promedio	10,00

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Briquetas modificadas con adición de polímeros de limadura PET

La siguiente tabla muestra los datos que se obtuvieron con las distintas mediciones que se realizó a las briquetas modificadas.

Tabla 4.27. Lectura de datos obtenidos para el cálculo de 30 briquetas, para la obtención del porcentaje óptimo de polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con las 30 briquetas modificadas con distintos porcentajes de polímero limadura de Tereftalato de polietileno incorporado la emulsión asfáltica para hallar el peso volumétrico.

Tabla 4.28. Resultados de la obtención del peso volumétrico.

PET	Nº	P seco (g)	Vol. (cm ³)	Peso Vol. (g/cm ³)	Peso Vol. Prom. (g/cm ³)
1,00%	1	1125,60	501,81	2,24	2,261
	2	1139,65	502,11	2,27	
	3	1129,60	497,34	2,27	
2,00%	4	1136,20	500,22	2,27	2,263
	5	1132,50	501,22	2,26	
	6	1134,20	502,20	2,26	
3,00%	7	1135,60	500,64	2,27	2,266
	8	1142,30	504,32	2,27	
	9	1130,20	499,32	2,26	
4,00%	10	1143,60	501,19	2,28	2,269
	11	1141,00	503,41	2,27	
	12	1137,20	503,21	2,26	
5,00%	13	1139,50	502,62	2,27	2,271
	14	1148,80	500,82	2,29	
	15	1126,20	499,96	2,25	
6,00%	16	1128,00	499,83	2,26	2,271
	17	1137,20	501,13	2,27	
	18	1145,50	500,72	2,29	
7,00%	19	1137,60	498,56	2,28	2,272
	20	1132,30	500,94	2,26	
	21	1142,50	502,44	2,27	
8,00%	22	1150,00	501,34	2,29	2,274
	23	1127,30	498,67	2,26	
	24	1139,10	502,13	2,27	
9,00%	25	1150,60	507,65	2,27	2,275
	26	1158,30	503,95	2,30	
	27	1142,30	505,74	2,26	
10,00%	28	1149,60	504,25	2,28	2,279
	29	1153,60	505,95	2,28	
	30	1146,00	503,45	2,28	

Fuente: Elaboración propia.

Los valores a continuación son los resultados óptimos de las propiedades mecánicas de una mezcla modificada con la adición de polímero PET en función de la emulsión asfáltica obtenidos a partir de la ecuación formada por la línea de tendencia.

Tabla 4.29. Resultados del ensayo Marshall para determinar el porcentaje óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de polietileno (PET) en la emulsión asfáltica.

Contenido de polímero PET (%)	Contenido de emulsión asfáltica (%)	Densidad promedio (g/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (Vacíos De Agregado Mineral) (%)	R.B.V. (Relación Betún Vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
1,00	9,90	2,27	4,78	20,04	76,16	3.771,23	12,60
2,00	9,80	2,28	4,49	19,66	77,16	3.813,52	12,62
3,00	9,70	2,29	4,16	19,25	78,38	3.869,83	13,25
4,00	9,60	2,30	3,78	18,79	79,86	3.898,07	13,78
5,00	9,50	2,31	3,41	18,33	81,40	3.929,02	14,70
6,00	9,40	2,32	3,18	17,99	82,32	3.924,60	15,62
7,00	9,30	2,33	2,82	17,99	83,94	3.887,07	15,88
8,00	9,20	2,33	2,65	17,54	84,65	3.818,05	16,40
9,00	9,30	2,34	2,68	17,14	84,38	3.745,15	17,19
10,00	9,00	2,34	2,77	17,07	83,77	3.656,86	18,50
Cálculos en función a la ecuación.	X	6,30	6,30	6,00	5,45	5,20	6,30
	Y máx.	2,3296	3,0196	18,10	81,97	3.918,8746	15,39

Fuente: Elaboración propia.

Calculo del porcentaje óptimo de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) incorporada en la emulsión.

Tabla 4.30. Determinación del porcentaje óptimo de polímero PET.

Determinación del porcentaje óptimo de asfalto residual	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	3.918,875	5,200
	Fluencia Marshall (pulg)	15,394	6,300
	Densidad máxima (g/cm ³)	2,330	6,300
	Vacíos de la mezcla (%)	3,020	6,300
	% Porcentaje óptimo	Promedio	6,03

Fuente: Elaboración Propia.

4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

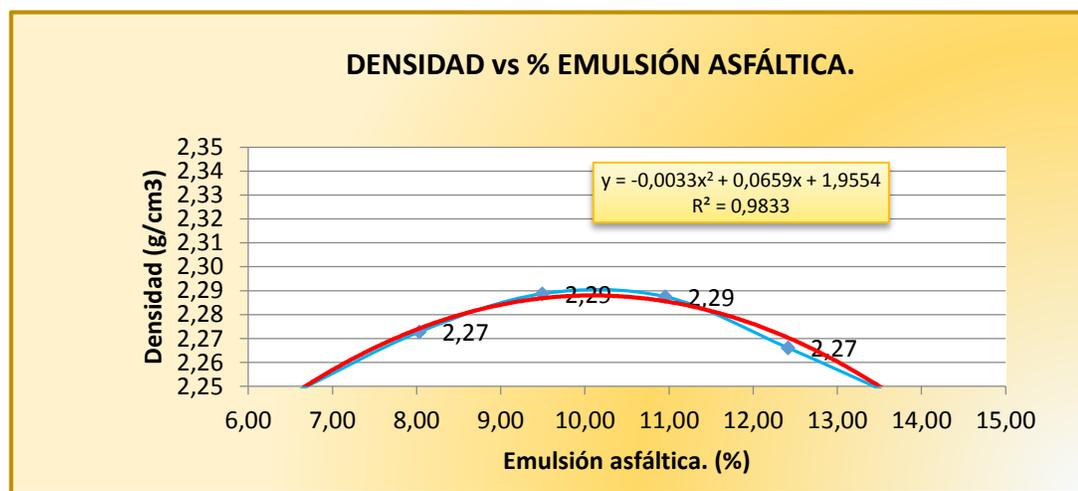
Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de peso volumétrico, densidad, porcentaje de vacíos, vacíos de agregado mineral, relación betún vacíos, estabilidad y fluencia correspondientes para cada contenido de emulsión asfáltica convencional y modificada, se procede a poder realizar un análisis individual y en comparativa de las propiedades mecánicas que se van a analizar las cuales están en función de nuestras variables dependientes; y serán la densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad y la fluencia.

Se analizará el peso volumétrico pero solo de manera simplificada, para ver su comportamiento en la gráfica y su tendencia con respecto a la densidad.

4.6.1. Análisis de resultados de la densidad.

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de Emulsión y los resultados de densidad de cada contenido de emulsión tanto convencional como con polímeros.

Gráfico 4.5. Análisis curva densidad vs % de emulsión convencional.

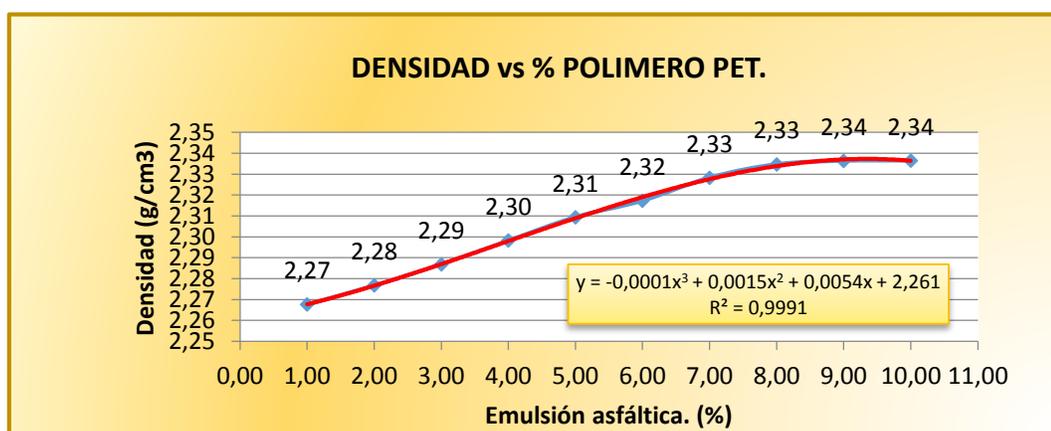


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión convencional expresado en porcentaje y la densidad expresado en gramos sobre centímetro cúbico, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que

la densidad forma una montaña donde el valor máximo o el pico más elevado oscila entre 9,5% y 10,5% de emulsión asfáltica con un valor máximo de 2,2843 g/cm³ es decir tanto con el menor porcentaje de emulsión que es 6,57% y el mayor porcentaje de emulsión que es 13,87% se tienen los menores valores de densidad. Se ha hecho la investigación para valores de 6 contenidos de emulsión entre 6,57% y 13,87% cuyas densidades nos marcan desde 2,248 gr/cm³ sube hasta 2,284 g/cm³ y desciende hasta 2,243 g/cm³, con el mayor valor se obtiene el contenido de emulsión de 10,12% que será el óptimo para la densidad.

Grafico 4.6. Análisis curva densidad vs % de emulsión modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión modificada con polímeros PET expresado en porcentaje y la densidad expresado en gramos sobre centímetro cúbico, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la densidad tiende a crecer de menor a mayor proporcional al porcentaje de polímero incorporado a la emulsión asfáltica con un valor máximo de 2,337 g/cm³ en el mayor porcentaje correspondiente al 10,00% de polímero y a partir de ese punto se mantiene. Se ha hecho la investigación para valores de 10 porcentajes de emulsión con polímeros PET entre 1,00% y 10,00%, cuyas densidades aumentaron de 2,268 g/cm³ hasta 2,337 g/cm³, llegando a la conclusión que el porcentaje de polímero que tenga mejores valores en las demás propiedades mecánicas de incidencia que son la estabilidad y la fluencia es el ideal.

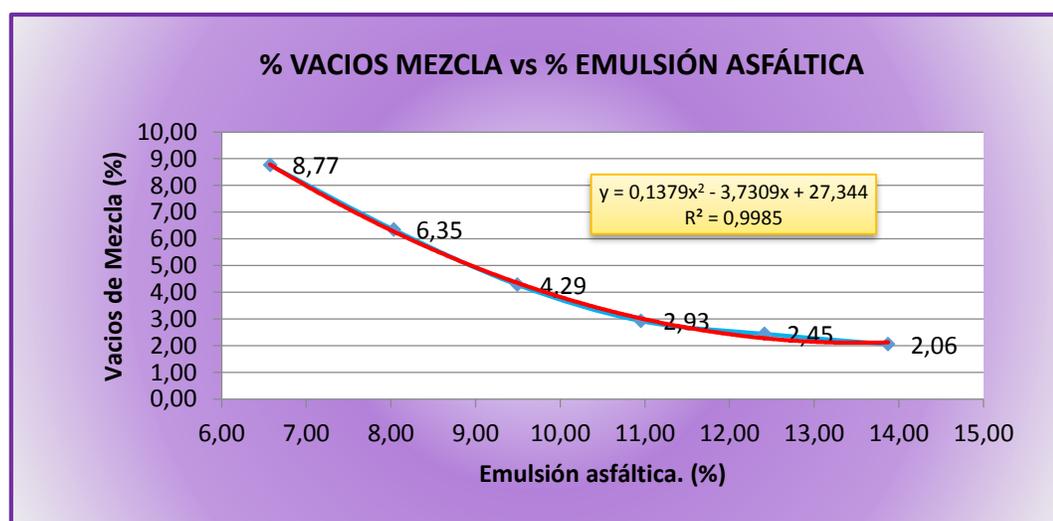
Análisis comparativo de ambas graficas:

La densidad de las briquetas modificadas con respecto a las convencionales es mayor y tiene una tendencia que a mayor porcentaje de polímeros de Tereftalato de Polietileno (PET) en la emulsión, las briquetas aumentan su densidad.

4.6.2. Análisis de resultados del porcentaje de vacíos

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de Emulsión y los resultados de porcentaje de vacíos de cada contenido de emulsión tanto convencional como con polímeros.

Gráfico 4.7. Análisis curva % de vacíos de la mezcla vs % de emulsión convencional.

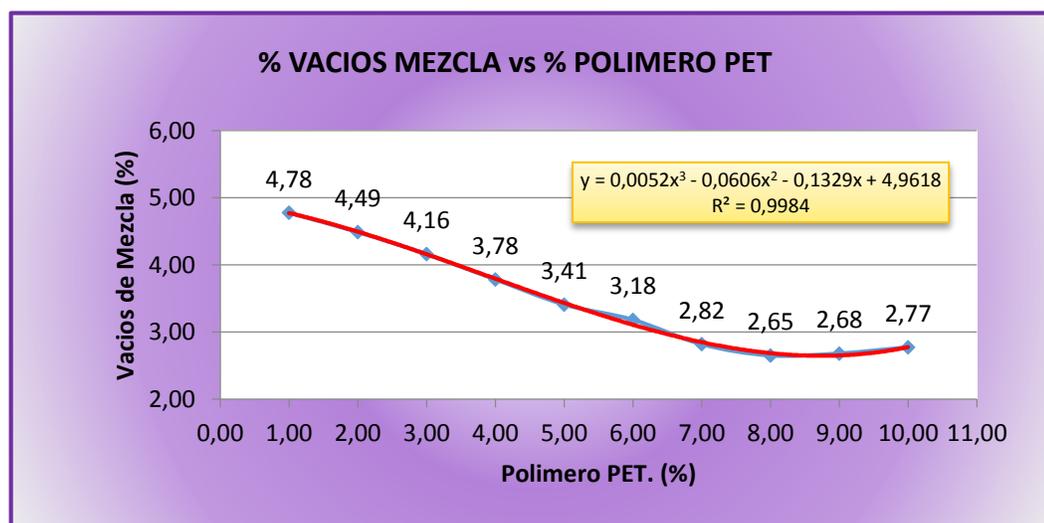


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión convencional expresado en porcentaje y el porcentaje de vacíos en la mezcla expresado de igual manera de forma porcentual, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que el porcentaje de vacíos para los porcentajes menores de emulsión asfáltica van desde un 8,77% hasta un 2,06% en el mayor porcentaje que se tiene de emulsión asfáltica que es 13,87%. Se ha hecho la investigación para valores de 6 contenidos de emulsión entre 6,57% y 13,87% cuyo porcentajes de vacíos se analizaran en función a los que se encuentran según su especificación entre un rango de 3,0% a 5,0% de vacíos, tomando como el porcentaje óptimo de emulsión el valor del punto intermedio

de 4,0% de vacíos obteniendo un valor de porcentaje de emulsión 9,82% determinado como el óptimo.

Gráfico 4.8. Análisis curva % de vacíos en la mezcla vs % de emulsión modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión modificada con polímeros PET expresado en porcentaje y el porcentaje de vacíos en la mezcla expresado de igual forma, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que el porcentaje de vacíos se encuentra entre 4,78% y 2,77%, es decir en su mayoría de porcentajes dentro de los rangos establecidos por la norma. Se ha hecho la investigación para valores de 10 porcentajes de emulsión con polímeros PET entre 1,00% y 10,00%, cuyo porcentaje de vacíos aceptables a analizar serán entre 1,00% a 6,00% de porcentaje de emulsión, y se optara por el porcentaje que tenga mejores valores en la estabilidad y fluencia.

Análisis comparativo de ambas graficas:

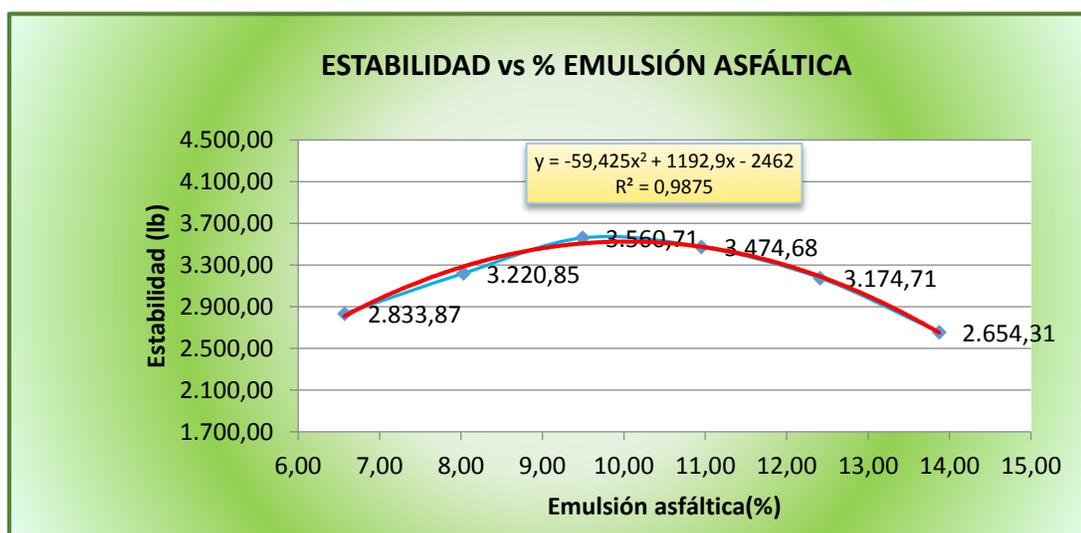
En ambas graficas la tendencia de porcentaje de vacíos es similar pero en la mezcla con emulsión modificada con polímeros PET los valores encontrados se adaptan mejor a los rangos y se tiene un porcentaje más bajo en vacíos esto quizá se debe a la capacidad del polímero de darle mayor viscosidad a la emulsión asfáltica, y este actuar en la mezcla

reduciendo los espacios o vacíos una vez mezclado y compactado, y tener mejor adherencia de los agregados en la briqueta a comparación de la emulsión convencional.

4.6.3. 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 tanto convencional como con polímeros.

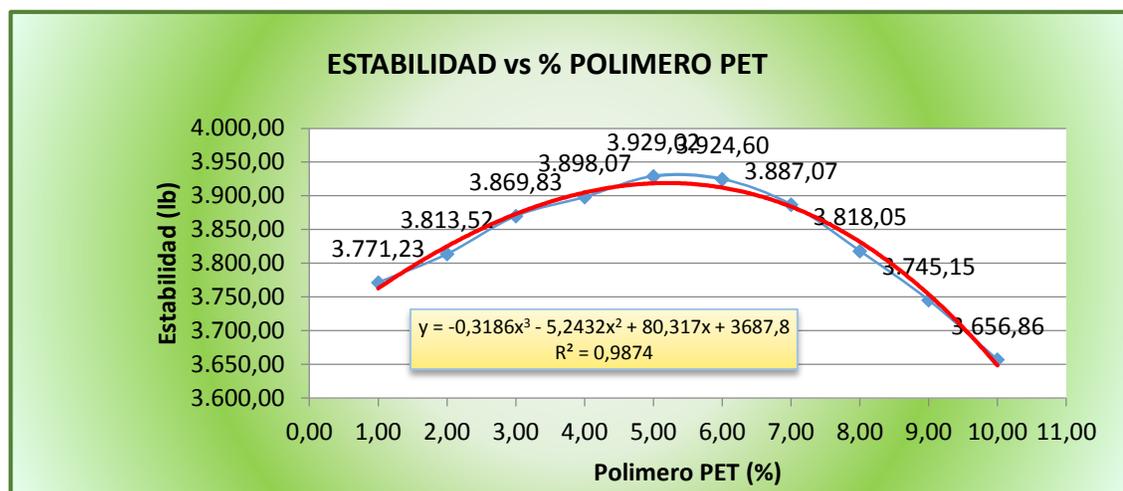
Grafico 4.9. Análisis curva estabilidad vs % de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión convencional expresado en porcentaje y 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 o aumenta demasiado. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 6,57% y 13,87% cuyas estabilidades nos marcan desde 2834 lb en porcentajes menores de emulsión sube hasta 3633 lb y desciende de gran manera hacia 2654 cuando se tiene mayor porcentaje de emulsión esto se debe quizá a que la briqueta a mayor porcentaje tiende a ser bastante acuosa e inestable, con datos de la gráfica se obtiene un valor de estabilidad máxima de 3524.57 libras con un contenido de emulsión óptimo de 10,05%.

Grafico 4.10. Análisis curva estabilidad vs % de emulsión modificada con polímeros de límadura de Tereftalato de polietileno (PET).



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión asfáltica modificada con polímeros PET expresado en porcentaje y la estabilidad expresada en libras, para poder evaluar el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la estabilidad es elevada, pero su comportamiento baja a medida que el % emulsión con polímeros PET disminuye o aumenta demasiado. Se ha hecho la investigación para valores de contenido polímero PET en la emulsión entre 1,00% y 10,00% cuyas estabilidades nos marcan desde 3771 lb en porcentajes más bajos de polímero PET en la emulsión y sube hasta un máximo de 3929 lb en el 6,00 % de polímero y va descendiendo poco a poco hasta llegar a 3657 libras en el 10,00 % de polímero, con datos de la gráfica se obtiene un valor de estabilidad máxima de 3920,82 libras al 5,20% de polímeros PET en la emulsión asfáltica.

Análisis comparativo de ambas graficas:

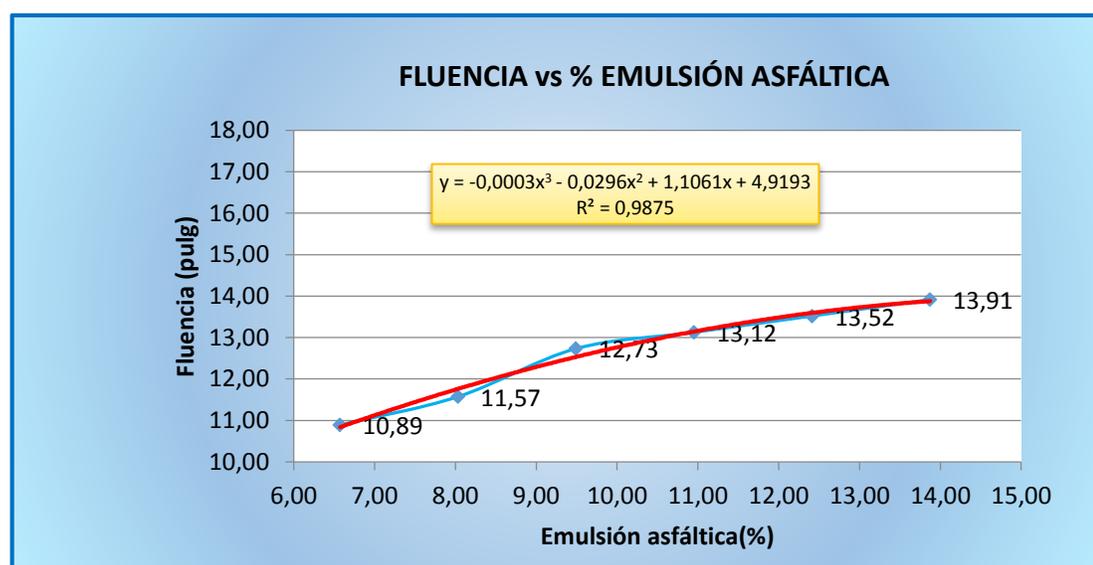
En ambas gráficas el comportamiento de las estabilidades es similar pero en la mezcla con emulsión modificada con polímeros PET los valores encontrados son altos y mejoran en un 110,83% a comparación de las mezclas con emulsión convencional, de todos modos ambas estabilidades se encuentran muy por encima de la estabilidad admisible para el tráfico pesado.

Los valores altos que se tienen de estabilidad se deben a que para el rompimiento de briquetas, estas previo a al rompimiento se encuentran en agua a 25°C siguiendo la normativa del Método Marshall modificado que corresponde a mezclas asfálticas en frío, y no así como las mezclas asfálticas en caliente que reposan sus briquetas en baño maría a una temperatura de 60°C previo al rompimiento.

4.6.4. 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 tanto convencional como con polímeros.

Grafico 4.11. Análisis curva fluencia vs % de emulsión convencional.

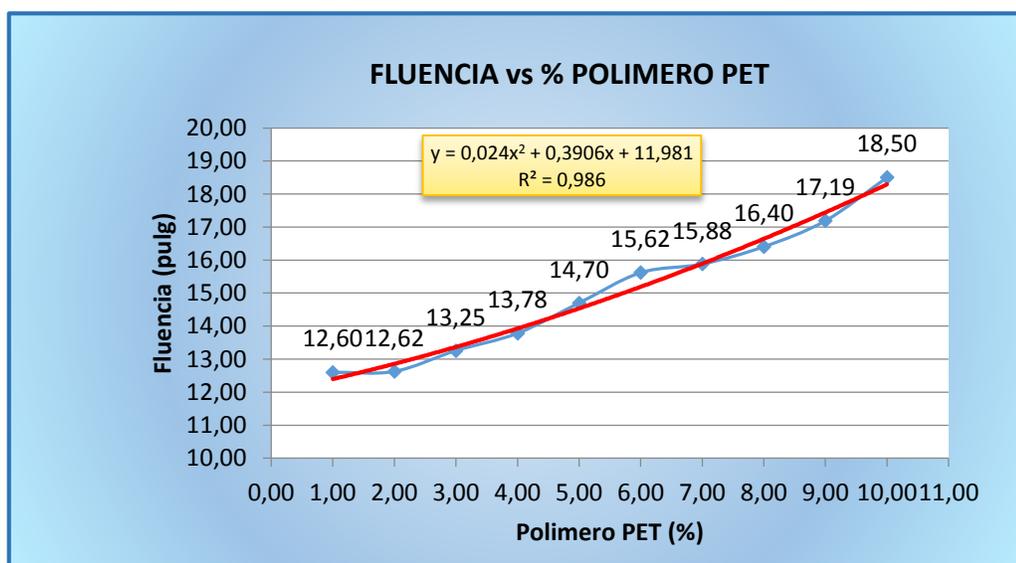


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión convencional expresado en porcentaje y 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 6,57% y 14,62% 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 13,87% pero en este porcentaje el valor de estabilidad es bastante bajo,

por lo que en el caso de la briqueta convencional se optara por un valor de fluencia cuya estabilidad sea la más alta, por lo que el contenido óptimo de emulsión será de 10,05% con un valor de fluencia de 12,74 centésimas de pulgada.

Grafico 4.12. Análisis curva fluencia vs % de emulsión modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión modificado con polímeros PET expresado en porcentaje y 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 modificada con polímeros PET, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido polímero PET en la emulsión entre 1,00% y 10,00%, 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 pero este se encuentra fuera del rango aceptable de 8,00 a 16,00 centésimas de pulgada, razón por la cual se opta por el valor más cercano a 16,00, pero este debe cumplir con las condiciones de % mínimo de vacíos y en función a ello se obtiene un contenido óptimo de polímero PET en la emulsión asfáltica de 6,30 % para una fluencia de 15,39 centésimas de pulgada.

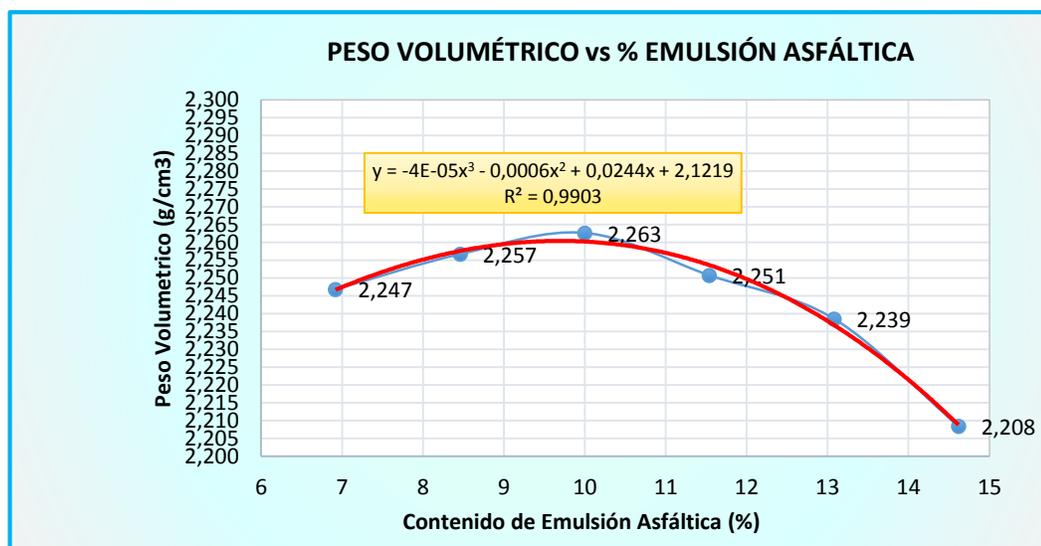
Análisis comparativo de ambas graficas:

Este quizá sea la propiedad mecánica de mayor relevancia en esta investigación debido a que la fluencia es la capacidad de cedencia, y a mayor fluencia más carga soportara el pavimento, y la fluencia mejora de manera bastante favorable en una mezcla con emulsión asfáltica con polímeros PET a comparación de una mezcla con emulsión asfáltica convencional como se puede denotar en cada gráfica, este comportamiento se debe a que al aumentar polímeros PET en la emulsión esta tiende a hacerse más viscosa reduciendo los vacíos y aumentando la fluencia hasta su valor más alto con una estabilidad admisible antes del quiebre de la misma.

4.6.5. Análisis de resultados del peso volumétrico

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de emulsión y los resultados de fluencia de cada contenido de emulsión tanto convencional como con polímeros PET.

Gráfico 4.13. Análisis curva peso volumétrico vs % de emulsión convencional.

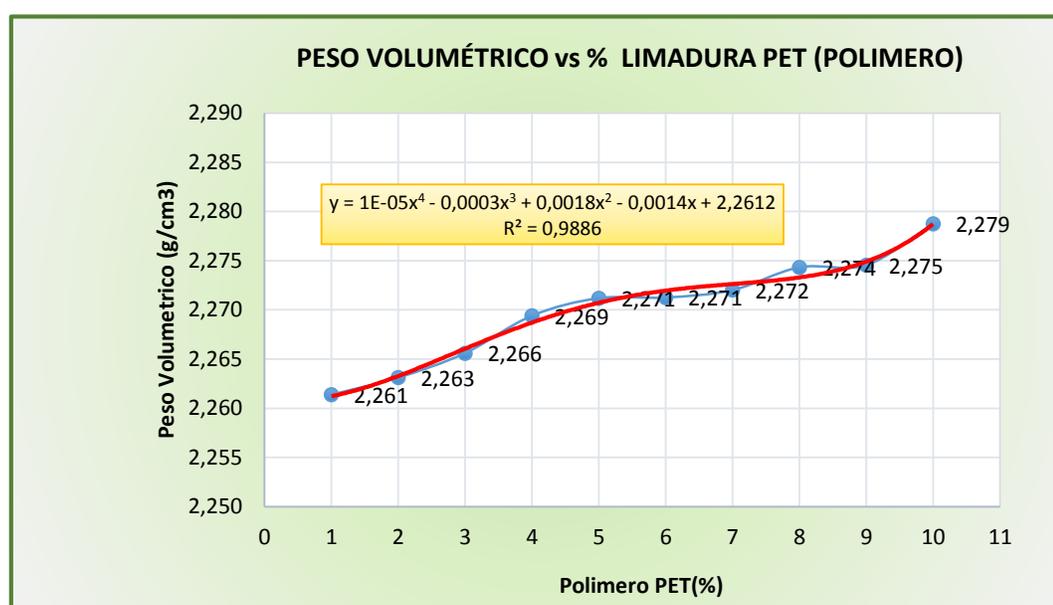


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión convencional expresado en porcentaje y el peso volumétrico expresado en gr/cm³, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa dos secciones en la gráfica,

la primera 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 contenido entre 6,57% y 14,62%, donde se tiene una variación de peso volumétrico de 2,24 a 2,20g/cm³, obteniendo entre estos valores un peso volumétrico más alto de 2,263 gr/cm³ a un porcentaje óptimo de emulsión de 10,00% aproximadamente.

Grafico 4.14. Análisis curva peso volumétrico vs % de emulsión modificada con polímeros PET.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión modificado con polímeros PET expresado en porcentaje y el peso volumétrico expresado en gr/cm³, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el peso volumétrico tiende a subir a de manera levemente a medida que se adiciona más % de polímeros PET en la emulsión. Se ha hecho la investigación para valores de contenido polímero PET en la emulsión entre 1,00% y 10,00%, donde tienen una variación de peso volumétrico de 2,26 a 2,28 g/cm³, a pesar que la variación es mínima, se tienen valores dentro del mismo rango y está en función a la línea de tendencia polinómica de grado 4 debido a un análisis más minucioso.

Análisis comparativo con la densidad:

En comparativa con la densidad viendo las gráficas de ambas propiedades se puede observar que el comportamiento es similar tanto para la emulsión convencional como con polímeros PET, y eso es bueno pues en si los valores deberían ser los mismos, pero por tema de medición, ya que la densidad trabaja con pesos sumergido y superficialmente seco y el peso volumétrico con medidas y fórmula de cálculo de volumen, se opta por analizar el peso volumétrico de manera superficial, y la densidad de manera más profunda, ya que de la densidad también depende el % de vacíos de la mezcla, los vacíos de agregado mineral y la relación betún vacíos.

4.6.6. Análisis final

Para una mezcla con emulsión asfáltica convencional se adoptó el valor promedio de 10,00% de contenido óptimo de emulsión asfáltica en función a las propiedades mecánicas de densidad, porcentaje de vacíos en la mezcla y la estabilidad

Para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de tereftalato de polietileno se adoptó un porcentaje promedio de 6,03% en función de las propiedades mecánicas, principalmente del óptimo en el porcentaje de vacíos en la mezcla cumpliendo que no baje de 3,00%, y de la estabilidad a su máximo valor.

4.7. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

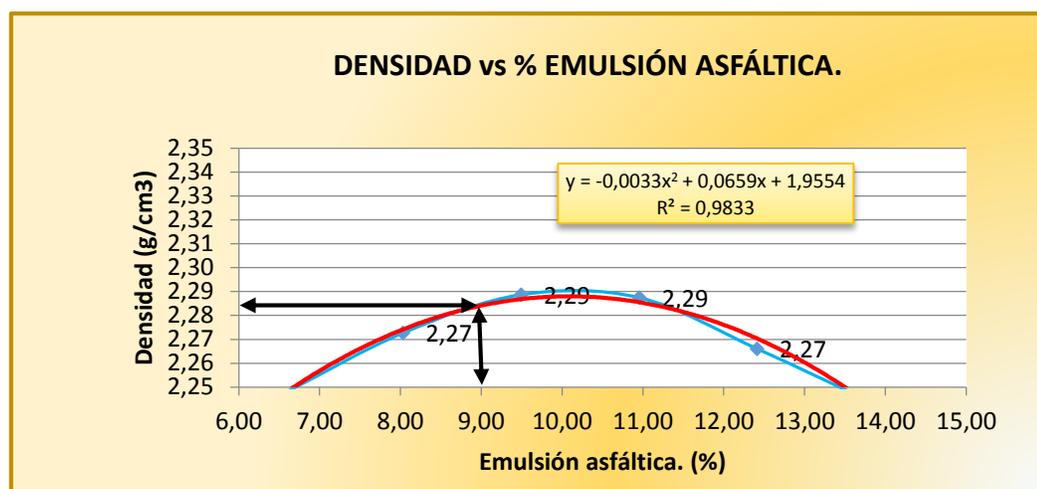
Para verificar que los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas que fueron mostrados anteriormente estén bien, se realizara la validez de los mismos comprobando a través de las ecuaciones de las curvas graficadas. En donde verificaremos una mezcla con emulsión asfáltica convencional y nos asumiremos un contenido de emulsión que esta vez sea un valor entero y no en función al asfalto residual, que en este caso el porcentaje de emulsión será el valor de 9,00 % de emulsión, que equivale a 108 ml de emulsión para una briqueta de 1200 gr, que a su vez también equivale a 90 Lt/m³ de emulsión.

Se opta por la mezcla convencional y no la modificada debido a que la mezcla convencional tiene más variación entre sus porcentajes de briquetas, en comparación a la modificada que tiene un mismo porcentaje de emulsión y el porcentaje de polímero varía cada 1,00%.

Para esta validación se dispuso trabajar elaborando 3 briquetas al porcentaje de 9,00% de emulsión asfáltica, y sacando el promedio de las 3 para tener un valor resultante y compararlo con el valor que nos da cada una de las ecuaciones de nuestras curvas graficadas tanto para la densidad, porcentaje de vacíos en la mezcla, estabilidad y fluencia.

4.7.1. Validación de la densidad

Grafico 4.15. Validación de la curva densidad vs % de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Densidad de la ecuación:

$$X = 9,00 \%$$

$$y = 2,2812 \text{ g/cm}^3$$

Densidad de las briquetas:

Se hizo tres briquetas con un contenido de 108 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de densidad se las enumeró como: 1V, 2V, 3V, para 108 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de densidad, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 4.31. Resultado de la densidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Denominación de la briqueta	Contenido de emulsión asfáltica (ml)	Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	Densidad (g/cm ³)
1V	108	9,00	2,279
2V	108	9,00	2,278
3V	108	9,00	2,293
Promedio			2,283

Fuente: Elaboración propia.

Validación de Densidad:

Se puede observar que el resultado obtenido de 2,281 g/cm³ de densidad de la ecuación, con el resultado obtenido de 2,283 g/cm³ de densidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 0,008 % menor que el 5,00 % por lo tanto los resultados son válidos.

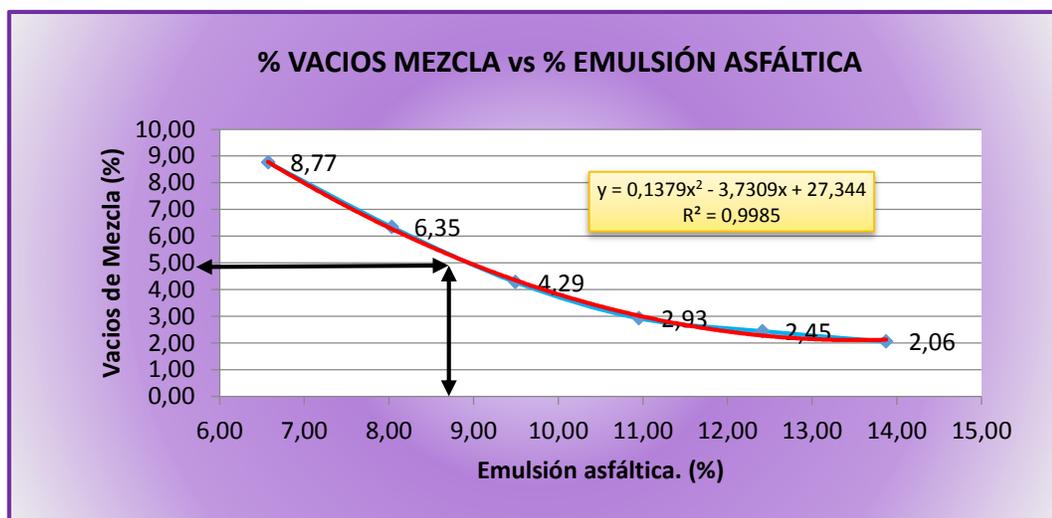
Tabla 4.32. Resultado de la densidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Forma de obtención del valor	Densidad (g/cm ³)	Validación
Ecuación	2,281	Cumple
Briqueta	2,283	

Fuente: Elaboración propia.

4.7.2. Validación del porcentaje de vacíos

Grafico 4.16. Validación de la curva % de vacíos vs % de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de vacíos en la mezcla de la ecuación:

$$X = 9,00 \%$$

$$y = 4,9358\%$$

Porcentaje de vacíos en la mezcla de las briquetas:

Se hizo tres briquetas con un contenido de 108 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de % de vacíos se las enumeró como: 1V, 2V, 3V, para 108 ml. Donde se hizo el promedio respectivo de las tres briquetas para obtener el resultado de % de vacíos, a continuación se muestra una tabla con el resultado obtenido.

Tabla 4.33. Resultado del % de vacíos para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Denominación de la briqueta	Contenido de emulsión asfáltica (ml)	Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	% de vacíos (%)
1V	108	9,00	5,493
2V	108	9,00	5,163
3V	108	9,00	4,632
Promedio			5,096

Fuente: Elaboración propia.

Validación del porcentaje de vacíos:

Se puede observar que el resultado obtenido de 4,936% del porcentaje de vacíos de la ecuación, con el resultado obtenido de 5,096% del porcentaje de vacíos de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 3,24% menor que el 5,00 % por lo tanto los resultados son válidos.

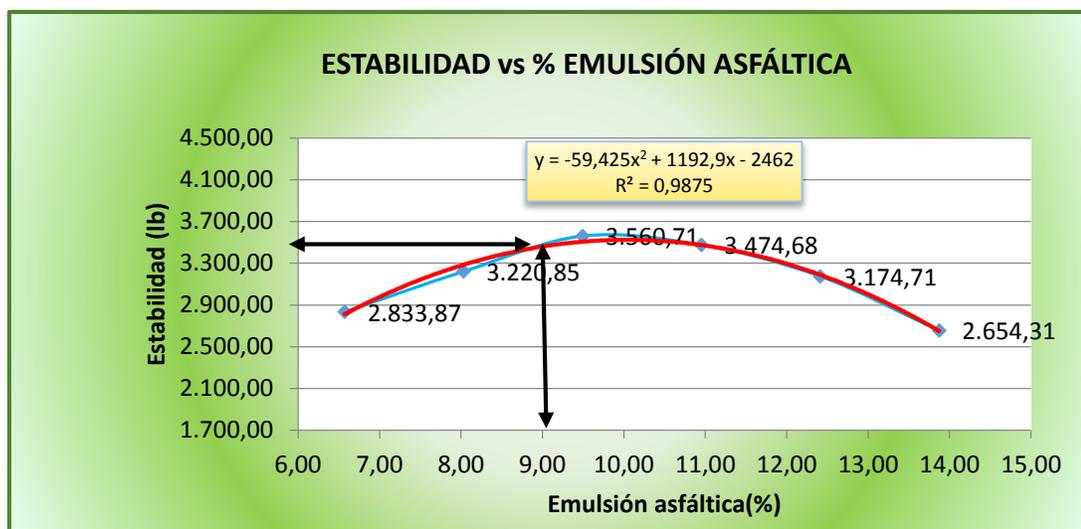
Tabla 4.34. Resultado del % de vacíos para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Forma de obtención del valor	% de vacíos (%)	Validación
Ecuación	4,936	Cumple
Briqueta	5,096	

Fuente: Elaboración propia.

4.7.3. Validación de la estabilidad

Grafico 4.17. Validación de la curva estabilidad vs % de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad de la ecuación:

$$X = 9,00 \%$$

$$y = 3460,68 \text{ lb}$$

Estabilidad de las briquetas:

Se hizo tres briquetas con un contenido de 108 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de estabilidad se las numero como: 1V, 2V, 3V, para 108 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 4.35. Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Denominación de la briqueta	Contenido de emulsión asfáltica (ml)	Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	Estabilidad (libras)
1V	108	9,00	3389,48
2V	108	9,00	3422,78
3V	108	9,00	3432,10
Promedio			3414,79

Fuente: Elaboración propia.

Validación de estabilidad:

Se puede observar que el resultado obtenido de 3460,68 lb de estabilidad de la ecuación, con el resultado obtenido de 3414,79 lb de Estabilidad de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,34 % menor que el 5,00 % por lo tanto los resultados son válidos.

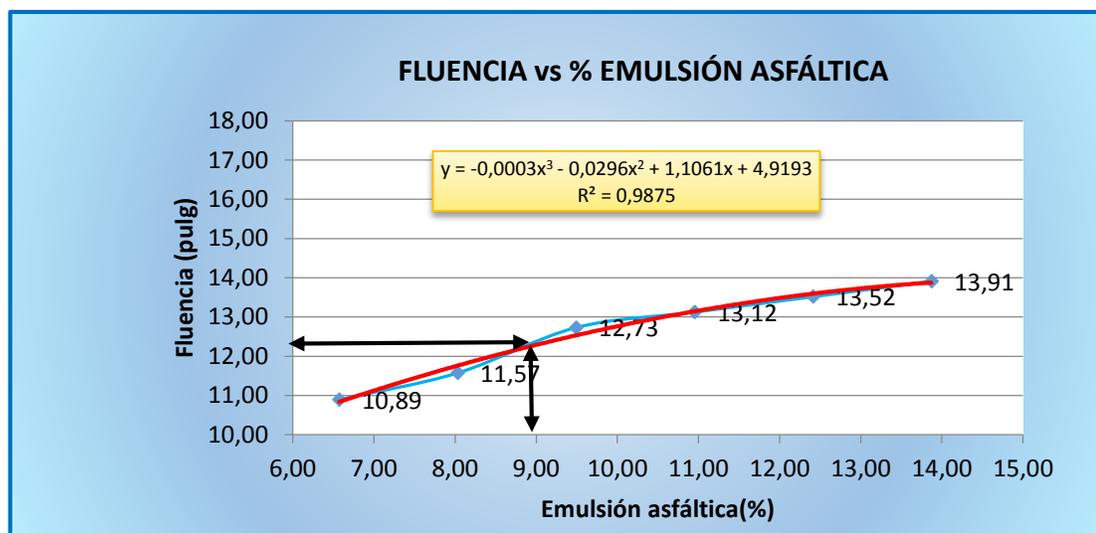
Tabla 4.36. Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Forma de obtención del valor	Estabilidad (libras)	Validación
Ecuación	3460,68	Cumple
Briqueta	3414,79	

Fuente: Elaboración propia.

4.7.4. Validación de la fluencia

Grafico 4.18. Validación de la curva fluencia vs % de emulsión convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Fluencia de la ecuación:

$$X = 9,00 \%$$

$$y = 12,26 \text{ pulgadas}$$

Fluencia de las briquetas:

Se hizo tres briquetas con un contenido de 108 ml de emulsión para verificar la validez de los resultados, para la identificación de las briquetas de validación de fluencia se las numero como: 1V, 2V, 3V, para 108 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 4.37. Resultado de la fluencia para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Denominación de la briqueta	Contenido de emulsión asfáltica (ml)	Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	Fluencia (pulgadas)
1V	108	9,00	11,811
2V	108	9,00	11,811
3V	108	9,00	12,598
Promedio			12,073

Fuente: Elaboración propia.

Validación de fluencia:

Se puede observar que el resultado obtenido de 12,26 pulgadas de fluencia de la ecuación, con el resultado obtenido de 12,07 pulgadas de fluencia de las briquetas, entre ellos existe una diferencia porcentual de 1,57% menor que el 5,00 % por lo tanto los resultados son válidos.

Tabla 4.38. Resultado de la fluencia para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.

Forma de obtención del valor	Fluencia (pulgadas)	Validación
Ecuación	12,26	Cumple
Briqueta	12,07	

Fuente: Elaboración propia.

4.8. PRUEBAS DE CONFIANZA

4.8.1. Teoría de errores

El objetivo principal en esta prueba de teoría de errores es el de identificar las diversas fuentes que generan error en la medición, determinar el valor verdadero ante las medidas realizadas de forma directa, ya sea mediante los instrumentos utilizados en esta investigación, o de forma indirecta a través de los cálculos realizados mediante las fórmulas utilizadas de cada una de nuestras variables dependientes que fueron determinadas y halladas en esta investigación, y las cuales fueron analizadas como parte de nuestros resultados.

Los errores hallados fueron desglosados en las tablas a continuación para cada una de variables de la mezcla tanto convencional, como modificadas con la incorporación de del polímero PET.

4.8.1.1. Errores en la variable densidad

Mezcla con emulsión asfáltica convencional:

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de densidad, para cada una de las 18 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Tabla 4.39. Errores parciales y totales hallados con los valores de densidad de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Cemento Asfáltico residual (%)	N° de briqueta	Denominación	Densidad (g/cm ³)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
4,50	1	7A	2,252	2,248	1,77E-04	7,89E-05	7,89E-03
	2	7B	2,211				
	3	7C	2,280				
5,50	4	8A	2,267	2,273	8,74E-06	3,84E-06	3,84E-04
	5	8B	2,281				
	6	8C	2,270				
6,50	7	9A	2,294	2,289	7,78E-06	3,40E-06	3,40E-04
	8	9B	2,292				
	9	9C	2,280				
7,50	10	10A	2,281	2,288	5,71E-06	2,49E-06	2,49E-04
	11	10B	2,287				
	12	10C	2,294				
8,50	13	11A	2,267	2,266	3,91E-06	1,72E-06	1,72E-04
	14	11B	2,261				
	15	11C	2,271				
9,50	16	12A	2,238	2,243	2,81E-06	1,25E-06	1,25E-04
	17	12B	2,246				
	18	12C	2,245				
Suma					2,06E-04	9,16E-05	9,16E-03
Error total					3,44E-05	1,53E-05	1,53E-03

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de cemento asfáltico residual, y así obtener 6 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de densidad de las 18 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional. Obteniendo así un error absoluto total de 3,44E-05, un error relativo total de 1,53E-05, y un error porcentual de 1,53E-03%, que se encuentran muy por debajo del 5,0% error estimado lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de la densidad calculados.

Mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET):

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de densidad, para cada una de las 30 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET.

Tabla 4.40. Errores parciales y totales hallados con los valores de densidad de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueeta	Denominación	Densidad (g/cm ³)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
1,00	1	7A	2,258	2,268	1,26E-05	5,57E-06	5,57E-04
	2	7B	2,268				
	3	7C	2,277				
2,00	4	8A	2,257	2,277	4,47E-05	1,96E-05	1,96E-03
	5	8B	2,286				
	6	8C	2,287				
3,00	7	9A	2,276	2,287	1,52E-05	6,63E-06	6,63E-04
	8	9B	2,289				
	9	9C	2,296				
4,00	10	10A	2,297	2,298	2,49E-06	1,08E-06	1,08E-04
	11	10B	2,303				
	12	10C	2,295				
5,00	13	11A	2,305	2,309	3,74E-06	1,62E-06	1,62E-04
	14	11B	2,309				
	15	11C	2,315				
6,00	16	12A	2,317	2,317	2,42E-05	1,05E-05	1,05E-03
	17	12B	2,330				
	18	12C	2,304				
7,00	19	13A	2,328	2,328	8,78E-06	3,77E-06	3,77E-04
	20	13B	2,321				
	21	13C	2,336				
8,00	22	14A	2,317	2,335	3,76E-05	1,61E-05	1,61E-03
	23	14B	2,338				
	24	14C	2,349				
9,00	25	15A	2,325	2,336	7,08E-05	3,03E-05	3,03E-03
	26	15B	2,322				
	27	15C	2,362				
10,00	28	16A	2,351	2,336	4,65E-05	1,99E-05	1,99E-03
	29	16B	2,316				
	30	16C	2,342				
Suma					2,67E-04	1,15E-04	1,15E-02
Error total					2,67E-05	1,15E-05	1,15E-03

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de polímero PET, y así obtener 10 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de densidad

de las 30 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET.

Obteniendo así un error absoluto total de $2,67E-05$, un error relativo total de $1,15E-05$, y un error porcentual de $1,15E-03\%$, que se encuentran muy por debajo del $5,0\%$ de error estimado lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de la densidad calculados.

4.8.1.2. Errores en la variable % de vacíos en la mezcla

Mezcla con emulsión asfáltica convencional:

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de % de vacíos en la mezcla, para cada una de las 18 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Tabla 4.41. Errores parciales y totales hallados con los valores de % de vacíos de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Cemento Asfáltico residual (%)	N° de briqueleta	Denominación	% de vacíos de la mezcla. (%)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
4,50	1	7A	8,601	8,691	$7,40E-02$	$8,51E-03$	$8,51E-01$
	2	7B	10,242				
	3	7C	7,453				
5,50	4	8A	6,602	6,346	$5,40E-03$	$8,51E-04$	$8,51E-02$
	5	8B	5,993				
	6	8C	6,459				
6,50	7	9A	4,086	4,278	$7,07E-03$	$1,65E-03$	$1,65E-01$
	8	9B	4,133				
	9	9C	4,637				
7,50	10	10A	3,188	2,921	$8,08E-03$	$2,77E-03$	$2,77E-01$
	11	10B	2,942				
	12	10C	2,657				
8,50	13	11A	2,419	2,440	$6,65E-03$	$2,73E-03$	$2,73E-01$
	14	11B	2,680				
	15	11C	2,239				
9,50	16	12A	2,277	2,053	$5,66E-03$	$2,76E-03$	$2,76E-01$
	17	12B	1,927				
	18	12C	1,973				
Suma					$1,07E-01$	$1,93E-02$	$1,93E+00$
Error total					$1,78E-02$	$3,21E-03$	$3,21E-01$

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de cemento asfáltico residual, y así obtener 6 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de % de vacíos de las 18 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Obteniendo así un error absoluto total de $1,78E-02$, un error relativo total de $3,21E-03$, y un error porcentual de $3,21E-01\%$, que se encuentran por debajo del 5,0% de error estimado lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados del % de vacíos de la mezcla calculados.

Mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET):

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de % de vacíos en la mezcla, para cada una de las 30 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET.

Tabla 4.42. Errores parciales y totales hallados con los valores de % de vacíos de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	% de vacíos de la mezcla. (%)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
1,00	1	7A	5,164	4,767	1,06E-02	2,22E-03	2,22E-01
	2	7B	4,783				
	3	7C	4,386				
2,00	4	8A	5,336	4,453	3,76E-02	8,44E-03	8,44E-01
	5	8B	4,082				
	6	8C	4,054				
3,00	7	9A	4,628	4,147	1,44E-02	3,46E-03	3,46E-01
	8	9B	4,066				
	9	9C	3,790				
4,00	10	10A	3,822	3,781	2,67E-03	7,07E-04	7,07E-02
	11	10B	3,595				
	12	10C	3,935				
5,00	13	11A	3,605	3,405	4,48E-03	1,31E-03	1,31E-01
	14	11B	3,443				
	15	11C	3,183				
6,00	16	12A	3,185	3,149	3,12E-02	9,90E-03	9,90E-01
	17	12B	2,636				
	18	12C	3,720				
7,00	19	13A	2,839	2,805	1,28E-02	4,56E-03	4,56E-01
	20	13B	3,133				
	21	13C	2,480				
8,00	22	14A	3,381	2,593	5,60E-02	2,16E-02	2,16E+00
	23	14B	2,519				
	24	14C	2,047				
9,00	25	15A	3,136	2,550	1,28E-01	5,00E-02	5,00E+00
	26	15B	3,289				
	27	15C	1,607				
10,00	28	16A	2,151	2,707	6,44E-02	2,38E-02	2,38E+00
	29	16B	3,605				
	30	16C	2,557				
				Suma	3,62E-01	1,26E-01	1,26E+01
				Error total	3,62E-02	1,26E-02	1,26E+00

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de polímero PET, y así obtener 10 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de % de vacíos

de las 30 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET.

Obteniendo así un error absoluto total de 3,62E-02, un error relativo total de 1,26E-02, y un error porcentual de 1,26%, que se encuentran por debajo del 5,0% de error aceptable lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados del % de vacíos de la mezcla calculados.

4.8.1.3. Errores en la variable estabilidad

Mezcla con emulsión asfáltica convencional:

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de estabilidad, para cada una de las 18 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Tabla 4.43. Errores parciales y totales hallados con los valores de estabilidad de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Cemento Asfáltico residual (%)	N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (libras)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
4,50	1	7A	2518,874	2824,222	9,652	0,003	0,342
	2	7B	2919,389				
	3	7C	3063,359				
5,50	4	8A	3032,720	3217,842	3,005	0,001	0,093
	5	8B	3360,346				
	6	8C	3269,473				
6,50	7	9A	3525,436	3560,570	0,140	0,000	0,004
	8	9B	3602,193				
	9	9C	3554,503				
7,50	10	10A	3491,034	3473,990	0,694	0,000	0,020
	11	10B	3382,859				
	12	10C	3550,158				
8,50	13	11A	3313,721	3171,236	3,476	0,001	0,110
	14	11B	2971,042				
	15	11C	3239,374				
9,50	16	12A	2752,835	2652,590	1,721	0,001	0,065
	17	12B	2684,236				
	18	12C	2525,860				
Suma					18,688	0,006	0,634
Error total					3,115	0,001	0,106

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de cemento asfáltico residual, y así obtener 6 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de estabilidad de las 18 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Obteniendo así un error absoluto total de 3,12, un error relativo total de 0,0011, y un error porcentual de 0,11%, que se encuentran por debajo del 5% de error aceptable lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de estabilidad calculados.

Mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET):

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de estabilidad, para cada una de las 30 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET.

Tabla 4.44. Errores parciales y totales hallados con los valores de estabilidad de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (libras)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
1,00	1	7A	3663,330	3769,783	1,448	0,000	0,038
	2	7B	3913,438				
	3	7C	3736,928				
2,00	4	8A	3543,835	3808,183	5,332	0,001	0,140
	5	8B	3874,352				
	6	8C	4022,361				
3,00	7	9A	4107,107	3866,147	3,681	0,001	0,095
	8	9B	3786,591				
	9	9C	3715,785				
4,00	10	10A	3834,663	3897,744	0,324	0,000	0,008
	11	10B	3902,061				
	12	10C	3957,479				
5,00	13	11A	3888,207	3925,461	3,560	0,001	0,091
	14	11B	3746,699				
	15	11C	4152,158				
6,00	16	12A	4069,060	3922,592	2,009	0,001	0,051
	17	12B	3763,517				
	18	12C	3941,227				
7,00	19	13A	3808,746	3884,961	2,104	0,001	0,054
	20	13B	4068,704				
	21	13C	3783,745				
8,00	22	14A	3753,502	3817,626	0,419	0,000	0,011
	23	14B	3809,261				
	24	14C	3891,373				
9,00	25	15A	3770,688	3744,656	0,497	0,000	0,013
	26	15B	3803,518				
	27	15C	3661,252				
10,00	28	16A	3677,720	3655,819	1,043	0,000	0,029
	29	16B	3541,329				
	30	16C	3751,536				
Suma					20,418	0,005	0,531
Error total					2,042	0,001	0,053

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de polímero PET, y así obtener 10 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de estabilidad

de las 30 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET.

Obteniendo así un error absoluto total de 2,04, un error relativo total de 0,001, y un error porcentual de 0,053%, que se encuentran por debajo del 5% de error aceptable lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de estabilidad calculados.

4.8.1.4. Errores en la variable fluencia

Mezcla con emulsión asfáltica convencional:

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de fluencia, para cada una de las 18 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Tabla 4.45. Errores parciales y totales hallados con los valores de fluencia de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Cemento Asfáltico residual (%)	N° de briqueleta	Denominación	Fluencia (pulg.)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
4,50	1	7A	10,236	10,881	1,12E-02	1,03E-03	1,03E-01
	2	7B	11,024				
	3	7C	11,417				
5,50	4	8A	11,811	12,068	5,63E-03	4,66E-04	4,66E-02
	5	8B	12,598				
	6	8C	11,811				
6,50	7	9A	12,992	12,728	1,34E-03	1,06E-04	1,06E-02
	8	9B	12,598				
	9	9C	12,598				
7,50	10	10A	13,780	13,114	9,11E-03	6,94E-04	6,94E-02
	11	10B	12,598				
	12	10C	12,992				
8,50	13	11A	13,780	13,512	5,16E-03	3,82E-04	3,82E-02
	14	11B	12,992				
	15	11C	13,780				
9,50	16	12A	13,780	13,902	8,59E-03	6,18E-04	6,18E-02
	17	12B	13,386				
	18	12C	14,567				
Suma					4,10E-02	3,30E-03	3,30E-01
Error total					6,84E-03	5,49E-04	5,49E-02

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de cemento asfáltico residual, y así obtener 6 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de fluencia de las 18 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica convencional.

Obteniendo así un error absoluto total de $6,84E-03$, un error relativo total de $5,49E-04$, y un error porcentual de $5,49E-02\%$, que se encuentran por debajo del 5% de error aceptable lo que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de fluencia calculados.

Mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET):

En la siguiente tabla se puede apreciar el error absoluto, error relativo y error porcentual hallados en función de los valores de fluencia, para cada una de las 30 briquetas realizadas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET.

Tabla 4.46. Errores parciales y totales hallados con los valores de fluencia de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	Fluencia (pulg.)	Media aritmética (x)	Error absoluto e	Error relativo E	Error porcentual E%
1,00	1	7A	12,205	12,594	4,10E-03	3,26E-04	3,26E-02
	2	7B	12,598				
	3	7C	12,992				
2,00	4	8A	12,992	13,122	1,30E-03	9,94E-05	9,94E-03
	5	8B	12,992				
	6	8C	13,386				
3,00	7	9A	12,992	13,253	1,31E-03	9,87E-05	9,87E-03
	8	9B	13,386				
	9	9C	13,386				
4,00	10	10A	13,780	13,776	3,75E-03	2,72E-04	2,72E-02
	11	10B	14,173				
	12	10C	13,386				
5,00	13	11A	14,173	14,690	8,14E-03	5,54E-04	5,54E-02
	14	11B	14,567				
	15	11C	15,354				
6,00	16	12A	15,748	15,616	1,11E-03	7,10E-05	7,10E-03
	17	12B	15,748				
	18	12C	15,354				
7,00	19	13A	14,961	15,865	1,43E-02	9,03E-04	9,03E-02
	20	13B	16,142				
	21	13C	16,535				
8,00	22	14A	16,929	16,397	7,41E-03	4,52E-04	4,52E-02
	23	14B	16,535				
	24	14C	15,748				
9,00	25	15A	15,748	17,160	3,19E-02	1,86E-03	1,86E-01
	26	15B	18,110				
	27	15C	17,717				
10,00	28	16A	17,717	18,493	1,12E-02	6,04E-04	6,04E-02
	29	16B	19,291				
	30	16C	18,504				
Suma					8,45E-02	5,24E-03	5,24E-01
Error total					8,45E-03	5,24E-04	5,24E-02

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla se realizó la obtención de cada valor de error parcial en función a 3 briquetas realizadas para cada porcentaje de polímero PET, y así obtener 10 valores de error parcial, y a través de su promedio obtener un error total de fluencia de las 30 briquetas obtenidas para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET.

Obteniendo así un error absoluto total de 8,45E-03, un error relativo total de 5,24E-04, y un error porcentual de 0,052%, que se encuentran por debajo del 5% de error aceptable lo

que nos garantiza que los errores que pudimos haber tenido durante la realización de esta investigación son fiables y se pueden confiar en sus resultados de fluencia calculados.

4.8.2. Tratamiento estadístico

El análisis estadístico que se tratara en este punto posibilita las medidas de centralización, dispersión y tendencias temporales en los valores hallados para cada una de nuestras variables dependientes que se tiene en función de nuestra variable independiente que es el porcentaje de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) incorporado como polímero en la emulsión asfáltica.

Las variables dependientes que serán analizadas por medio de la estadística descriptiva e inferencial son la densidad, estabilidad y fluencia de la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero y serán desglosados junto a tablas y gráficos en los siguientes puntos.

4.8.2.1. Estadística descriptiva

El tratamiento estadístico que se hará a continuación será desglosado en los siguientes puntos para cada una de nuestras variables dependiente establecidas en el primer capítulo, este tratamiento se realizara en función a los valores obtenidos de las 30 briquetas que se hicieron para la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET, determinando así la tabla de datos estadísticos necesarios para hallar tabular la matriz de base de datos, el número de frecuencia, porcentajes parciales y acumulados, y así poder el elaborar las tablas y graficas del histograma, polígono de frecuencias.

4.8.2.1.1. Estadística descriptiva de la densidad

En la siguiente tabla se tiene los valores de densidad de la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET en función a cada uno de sus porcentajes de polímero PET.

Tabla 4.47. Datos de densidad hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	Nº de briqueta	Denominación	Densidad (g/cm ³)
1,00	1	7A	2,258
	2	7B	2,268
	3	7C	2,277
2,00	4	8A	2,257
	5	8B	2,286
	6	8C	2,287
3,00	7	9A	2,276
	8	9B	2,289
	9	9C	2,296
4,00	10	10A	2,297
	11	10B	2,303
	12	10C	2,295
5,00	13	11A	2,305
	14	11B	2,309
	15	11C	2,315
6,00	16	12A	2,317
	17	12B	2,330
	18	12C	2,304
7,00	19	13A	2,328
	20	13B	2,321
	21	13C	2,336
8,00	22	14A	2,317
	23	14B	2,338
	24	14C	2,349
9,00	25	15A	2,325
	26	15B	2,322
	27	15C	2,362
10,00	28	16A	2,351
	29	16B	2,316
	30	16C	2,342

Fuente: Elaboración propia.

A continuación partiendo de los 30 datos de densidad que se tiene de las briquetas se procede al cálculo de los datos estadísticos relevantes mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4.48. Datos estadísticos de la densidad.

Datos estadísticos relevantes de la densidad.	
Media	2,309216294
Error típico	0,004983244
Mediana	2,311792018
Desviación estándar	0,027294352
Varianza de la muestra	0,000744982
Curtosis	-0,530519808
Coficiente de asimetría	-0,125982368
Rango	0,105472322
Mínimo	2,256603774
Máximo	2,362076096
Suma	69,27648883
Cuenta	30

Número de clases	5,8745	≈	6
Tamaño de clase	0,017579		

Fuente: Elaboración propia.

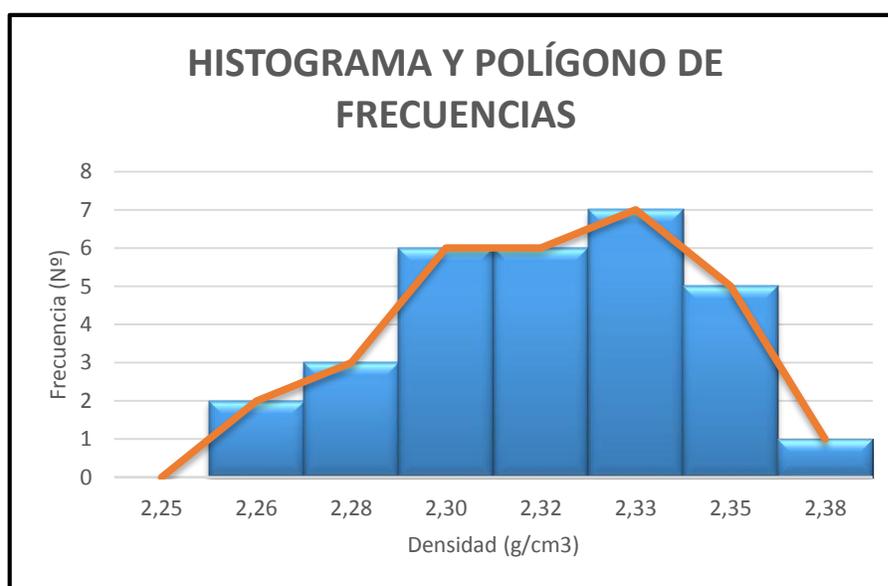
Teniendo todos los datos estadísticos de la densidad se procede a la elaboración de la base de datos, obteniendo los intervalos con un límite inferior y superior, los grupos o marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual de frecuencia para cada grupo o clase.

Tabla 4.49. Matriz de base de datos de la densidad.

	Intervalos		Clase	Frecuencia	Fr	Fr %
	Li	Ls				
0						
1		2,26	2,25	0	0,00	0,00
2	2,26	2,27	2,26	2	0,07	6,67
3	2,27	2,29	2,28	3	0,10	10,00
4	2,29	2,31	2,30	6	0,20	20,00
5	2,31	2,33	2,32	6	0,20	20,00
6	2,33	2,34	2,33	7	0,23	23,33
7	2,34	2,36	2,35	5	0,17	16,67
	2,36	2,38	2,38	1	0,03	3,33
				30	1	100

Fuente: Elaboración propia.

La grafica siguiente muestra el histograma y polígono de frecuencias de la densidad, donde se puede apreciar que la mayor frecuencia se tiene en el intervalo de densidad de 2,33 g/cm³ a 2,34 g/cm³, ya que de las 30 briquetas ensayadas, 7 briquetas nos dan valores que se encuentran en este intervalo, por debajo están 6 briquetas en la clase de 2,32 g/cm³ y otras 6 en 2,30 g/cm³ siendo las más relevantes. Además se aprecia que la mayor frecuencia de valores de densidad se encuentran entre la clase de densidad comprendida entre 2,30g/cm³ y 2,35 g/cm³ teniendo 24 briquetas en este intervalo.

Grafico 4.19. Histograma y polígono de frecuencias de la densidad.

Fuente: Elaboración propia.

También se calculó la frecuencia en porcentaje acumulado para cada grupo o clase de densidad con valores en la tabla a continuación:

Tabla 4.50. Frecuencia porcentual acumulada de la densidad.

Clase	Frecuencia	% acumulado
2,25	0	0,00%
2,26	2	6,67%
2,28	3	16,67%
2,30	6	36,67%
2,32	6	56,67%
2,33	7	80,00%
2,35	5	96,67%
2,38	1	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Y con los datos de la anterior tabla se graficó el siguiente histograma el cual nos representa porcentualmente que el 80,00% de nuestras briquetas ensayadas nos dan un valor por debajo de la clase 2,33 g/cm³ de densidad, teniendo solo 6 briquetas por encima de este valor.

Grafico 4.20. Histograma y % de frecuencias acumuladas de la densidad.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2.1.2. Estadística descriptiva del % de vacíos en la mezcla.

En la siguiente tabla se tiene los valores de % de vacíos de la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET en función a cada uno de sus porcentajes de polímero PET.

Tabla 4.51. Datos de % de vacíos hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET.

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueeta	Denominación	% de vacíos de la mezcla. (%)
1,00	1	7A	5,164
	2	7B	4,783
	3	7C	4,386
2,00	4	8A	5,336
	5	8B	4,082
	6	8C	4,054
3,00	7	9A	4,628
	8	9B	4,066
	9	9C	3,790
4,00	10	10A	3,822
	11	10B	3,595
	12	10C	3,935
5,00	13	11A	3,605
	14	11B	3,443
	15	11C	3,183
6,00	16	12A	3,185
	17	12B	2,636
	18	12C	3,720
7,00	19	13A	2,839
	20	13B	3,133
	21	13C	2,480
8,00	22	14A	3,381
	23	14B	2,519
	24	14C	2,047
9,00	25	15A	3,136
	26	15B	3,289
	27	15C	1,607
10,00	28	16A	2,151
	29	16B	3,605
	30	16C	2,557

Fuente: Elaboración propia.

A continuación partiendo de los 30 datos de % de vacíos que se tiene de las briqueetas se procede al cálculo de los datos estadísticos relevantes mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4.52. Datos estadísticos del % de vacíos en la mezcla.

Datos estadísticos relevantes del % de vacíos.	
Media	3,471906636
Error típico	0,16386058
Mediana	3,518860991
Desviación estándar	0,897501358
Varianza de la muestra	0,805508688
	-
Curtosis	0,160106324
Coefficiente de asimetría	0,074738755
Rango	3,728407242
Mínimo	1,60741206
Máximo	5,335819302
Suma	104,1571991
Cuenta	30

Número de clases	5,87450014	≈	6
Tamaño de clase	0,62140121		

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo todos los datos estadísticos del % de vacíos se procede a la elaboración de la base de datos, obteniendo los intervalos con un límite inferior y superior, los grupos o marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual de frecuencia para cada grupo o clase.

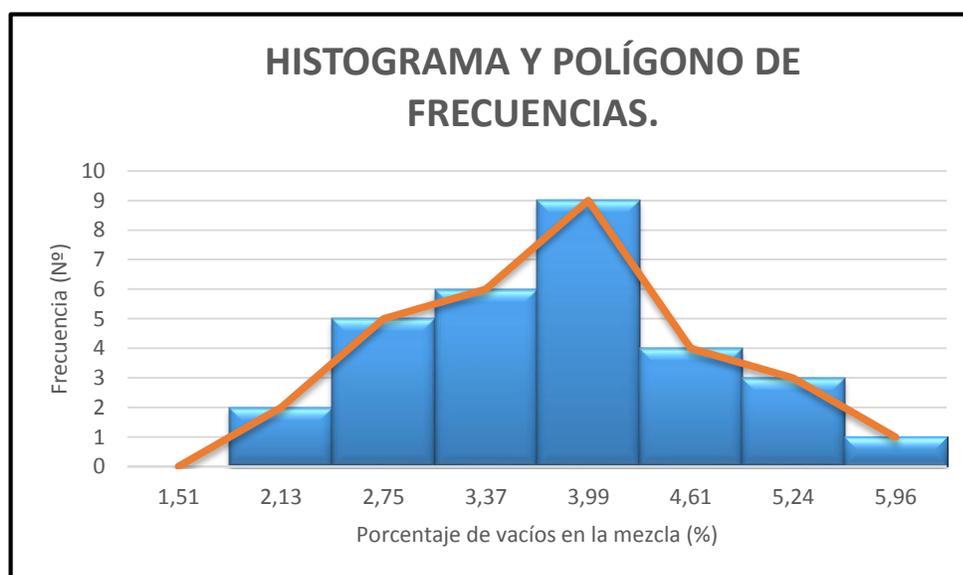
Tabla 4.53. Matriz de base de datos del % de vacíos en la mezcla.

	Intervalos		Clase	Frecuencia	Fr	Fr %
	Li	Ls				
0						
1		1,61	1,51	0	0,00	0,00
2	1,61	2,23	2,13	2	0,07	6,67
3	2,23	2,85	2,75	5	0,17	16,67
4	2,85	3,47	3,37	6	0,20	20,00
5	3,47	4,09	3,99	9	0,30	30,00
6	4,09	4,71	4,61	4	0,13	13,33
7	4,71	5,34	5,24	3	0,10	10,00
	5,34	5,96	5,96	1	0,03	3,33
				30	1	100

Fuente: Elaboración propia.

La grafica siguiente muestra el histograma y polígono de frecuencias del % de vacíos en la mezcla, donde se puede apreciar que la mayor frecuencia se tiene en el intervalo de % de vacíos de 3,47% a 4,09%, ya que de las 30 briquetas ensayadas, 9 briquetas nos dan valores que se encuentran en este intervalo, por debajo están 6 briquetas en el intervalo de 2,85% a 3,47% , se tiene 4 briquetas por encima en el grupo de 4,61% y 5 briquetas en 2,75% siendo las más relevantes. Con esta observación se concreta que de todas nuestras briquetas más de la mitad o aproximadamente se tiene una frecuencia de 20 briquetas que se encuentran en el rango aceptable por la norma de 3 a% a 5% de vacíos.

Grafico 4.21. Histograma y polígono de frecuencias del % de vacíos en la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

También se calculó la frecuencia en porcentaje acumulado para cada grupo o clase de % de vacíos con valores en la tabla a continuación:

Tabla 4.54. Frecuencia porcentual acumulada del % de vacíos en la mezcla.

Clase	Frecuencia	% acumulado
1,51	0	0,00%
2,13	2	6,67%
2,75	5	23,33%
3,37	6	43,33%
3,99	9	73,33%
4,61	4	86,67%
5,24	3	96,67%
5,96	1	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Y con los datos de la anterior tabla se graficó el siguiente histograma el cual nos representa porcentualmente que el 86,67 % de nuestras briquetas ensayadas nos dan un valor por debajo de 4,61% de vacíos, y el 63,33% de las briquetas cumplen con los rangos que establece la norma, estas se sitúan entre los intervalos de clase de 2,75% y 4,61% de vacíos.

Grafico 4.22. Histograma y % de frecuencias acumuladas del % de vacíos en la mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2.1.3. Estadística descriptiva de la estabilidad

En la siguiente tabla se tiene los valores de estabilidad de la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET en función a cada uno de sus porcentajes de polímero PET.

Tabla 4.55. Datos de estabilidad hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (libras)
1,00	1	7A	3663,330
	2	7B	3913,438
	3	7C	3736,928
2,00	4	8A	3543,835
	5	8B	3874,352
	6	8C	4022,361
3,00	7	9A	4107,107
	8	9B	3786,591
	9	9C	3715,785
4,00	10	10A	3834,663
	11	10B	3902,061
	12	10C	3957,479
5,00	13	11A	3888,207
	14	11B	3746,699
	15	11C	4152,158
6,00	16	12A	4069,060
	17	12B	3763,517
	18	12C	3941,227
7,00	19	13A	3808,746
	20	13B	4068,704
	21	13C	3783,745
8,00	22	14A	3753,502
	23	14B	3809,261
	24	14C	3891,373
9,00	25	15A	3770,688
	26	15B	3803,518
	27	15C	3661,252
10,00	28	16A	3677,720
	29	16B	3541,329
	30	16C	3751,536

Fuente: Elaboración propia.

A continuación partiendo de los 30 datos de % de vacíos que se tiene de las briquetas se procede al cálculo de los datos estadísticos relevantes mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4.56. Datos estadísticos de la estabilidad.

Datos estadísticos relevantes de la estabilidad.	
Media	3831,339145
Error típico	27,96628342
Mediana	3806,13237
Desviación estándar	153,1776428
Varianza de la muestra	23463,39024
	-
Curtosis	0,170430374
Coefficiente de asimetría	0,270346468
Rango	610,8290074
Mínimo	3541,329195
Máximo	4152,158203
Suma	114940,1743
Cuenta	30

Número de clases	5,87450014	≈	6
Tamaño de clase	101,804835		

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo todos los datos estadísticos de la estabilidad se procede a la elaboración de la base de datos, obteniendo los intervalos con un límite inferior y superior, los grupos o marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual de frecuencia para cada grupo o clase.

Tabla 4.57. Matriz de base de datos de la estabilidad.

	Intervalos		Clase	Frecuencia	Fr	Fr %
	Li	Ls				
0						
1		3541,33	3541,23	0	0,00	0,00
2	3541,33	3643,13	3643,03	2	0,07	6,67
3	3643,13	3744,94	3744,84	5	0,17	16,67
4	3744,94	3846,74	3846,64	11	0,37	36,67
5	3846,74	3948,55	3948,45	6	0,20	20,00
6	3948,55	4050,35	4050,25	2	0,07	6,67
7	4050,35	4152,16	4152,06	3	0,10	10,00
	4152,16	4253,96	4253,96	1	0,03	3,33
				30	1	100

Fuente: Elaboración propia.

La grafica siguiente muestra el histograma y polígono de frecuencias de la estabilidad, donde se puede apreciar que la mayor frecuencia se tiene en el intervalo de clase de estabilidad de 3744,94 libras a 3846,74 libras, ya que de las 30 briquetas ensayadas, 11 briquetas nos dan valores que se encuentran en este intervalo, por debajo están 5 briquetas en el intervalo de 3643,13 libras a 3744,94 libras, y se tienen 6 briquetas por encima en el intervalo de 3846,74 libras a 3948,55 libras siendo las más relevantes en esta investigación. Además que todas nuestras briquetas que fueron analizadas se encuentran por encima de las 2500 libras valor establecido por la norma para mezclas en frio.

Grafico 4.23. Histograma y polígono de frecuencias de la estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Tambien se calculó la frecuencia en porcentaje acumulado para cada grupo o clase de % de vacíos con valores en la tabla a continuación:

Tabla 4.58. Frecuencia porcentual acumulada de la estabilidad.

Clase	Frecuencia	% acumulado
3541,23	0	0,00%
3643,03	2	6,67%
3744,84	5	23,33%
3846,64	11	60,00%
3948,45	6	80,00%
4050,25	2	86,67%
4152,06	3	96,67%
4253,96	1	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Y con los datos de la anterior tabla se graficó el siguiente histograma el cual nos representa porcentualmente que el 60,00 % de nuestras briquetas analizadas, nos dan un valor que está por debajo de 3846,64 libras, y 6 briquetas más se encuentran en el intervalo de clase de 3948,45 libras hasta allí haciendo un porcentaje total de 80,00% de allí en más el 20,00% restante se encuentra por sobre los 4050,25 libras.

Grafico 4.24. Histograma y % de frecuencias acumuladas de la estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2.1.4. Estadística descriptiva de la fluencia

En la siguiente tabla se tiene los valores de fluencia de la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET en función a cada uno de sus porcentajes de polímero PET.

Tabla 4.59. Datos de fluencia que se tienen para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	Fluencia (pulg.)
1,00	1	7A	12,205
	2	7B	12,598
	3	7C	12,992
2,00	4	8A	12,992
	5	8B	12,992
	6	8C	13,386
3,00	7	9A	12,992
	8	9B	13,386
	9	9C	13,386
4,00	10	10A	13,780
	11	10B	14,173
	12	10C	13,386
5,00	13	11A	14,173
	14	11B	14,567
	15	11C	15,354
6,00	16	12A	15,748
	17	12B	15,748
	18	12C	15,354
7,00	19	13A	14,961
	20	13B	16,142
	21	13C	16,535
8,00	22	14A	16,929
	23	14B	16,535
	24	14C	15,748
9,00	25	15A	15,748
	26	15B	18,110
	27	15C	17,717
10,00	28	16A	17,717
	29	16B	19,291
	30	16C	18,504

Fuente: Elaboración propia.

A continuación partiendo de los 30 datos de % de vacíos que se tiene de las briquetas se procede al cálculo de los datos estadísticos relevantes mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4.60. Datos estadísticos de la fluencia.

Datos estadísticos relevantes de la fluencia	
Media	15,10498688
Error típico	0,355902695
Mediana	15,15748031
Moda	12,99212598
Desviación estándar	1,949359344
Varianza de la muestra	3,800001853
Curtosis	-0,793127972
Coefficiente de asimetría	0,435070558
Rango	7,086614173
Mínimo	12,20472441
Máximo	19,29133858
Suma	453,1496063
Cuenta	30

Número de clases	5,87450014	≈	6
Tamaño de clase	1,18110236		

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo todos los datos estadísticos de la fluencia se procede a la elaboración de la base de datos, obteniendo los intervalos con un límite inferior y superior, los grupos o marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual de frecuencia para cada grupo o clase.

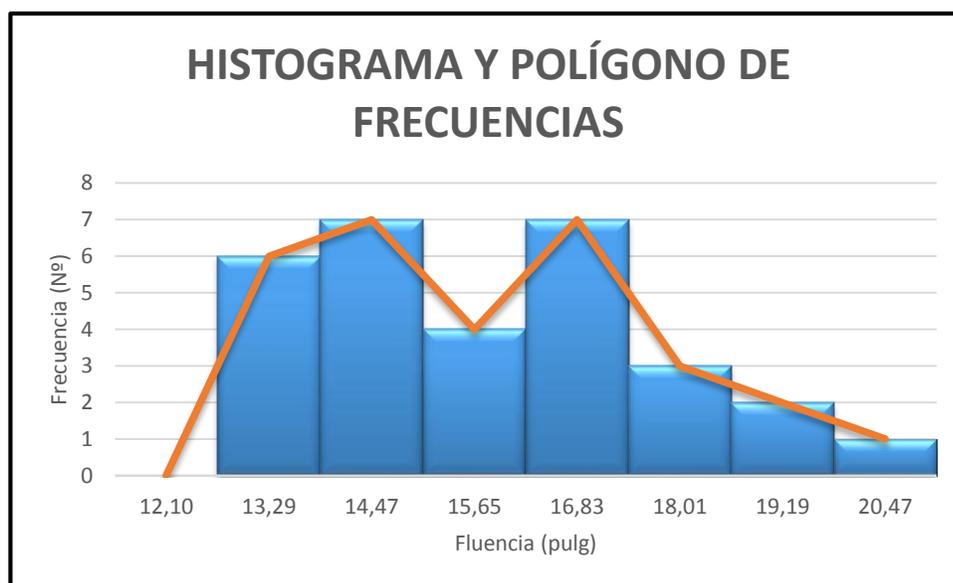
Tabla 4.61. Matriz de base de datos de la fluencia.

	Intervalos		Clase	Frecuencia	Fr	Fr %
	Li	Ls				
0						
1		12,20	12,10	0	0,00	0,00
2	12,20	13,39	13,29	6	0,20	20,00
3	13,39	14,57	14,47	7	0,23	23,33
4	14,57	15,75	15,65	4	0,13	13,33
5	15,75	16,93	16,83	7	0,23	23,33
6	16,93	18,11	18,01	3	0,10	10,00
7	18,11	19,29	19,19	2	0,07	6,67
	19,29	20,47	20,47	1	0,03	3,33
				30	1	100

Fuente: Elaboración propia.

La grafica siguiente muestra el histograma y polígono de frecuencias de la fluencia, donde se puede apreciar que la mayor frecuencia se tiene en el intervalo de fluencia de 13,39 pulgadas a 14,57 pulgadas, y otro de igual magnitud de fluencia en el intervalo de 15,75 pulgadas a 16,93 pulgadas, ya que de las 30 briquetas ensayadas, 7 briquetas nos dan valores que se encuentran en esos intervalos, entre ellos 4 briquetas nos da valores de fluencia comprendidos en el intervalo de 14,57 pulgadas a 15,75 pulgadas, y por debajo del grupo de 14,57 pulgadas, se encuentran con 6 briquetas de frecuencia con valores de la fluencia comprendidos en el intervalo de 12,20 pulgadas a 13,39 pulgadas, estas briquetas y sus valores con las más relevantes en esta investigación. Además de todas nuestras briquetas que fueron analizadas se encuentran solo 6 briquetas exceden su valor a las 16 pulgadas como máximo que establece la norma como el valor máximo de la fluencia.

Grafico 4.25. *Histograma y polígono de frecuencias de la fluencia.*



Fuente: *Elaboración propia.*

También se calculó la frecuencia en porcentaje acumulado para cada grupo o clase de % de vacíos con valores en la tabla a continuación:

Tabla 4.62. Frecuencia porcentual acumulada de la fluencia.

Clase	Frecuencia	% acumulado
12,10	0	0,00%
13,29	6	20,00%
14,47	7	43,33%
15,65	4	56,67%
16,83	7	80,00%
18,01	3	90,00%
19,19	2	96,67%
20,47	1	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Y con los datos de la anterior tabla se graficó el siguiente histograma el cual nos representa porcentualmente que aproximadamente el 80,00 % de nuestras briquetas analizadas, nos dan un valor que está por debajo de 16,00 pulgadas, y son aceptables para el diseño de la mezcla, el porcentaje restante se descarta.

Grafico 4.26. Histograma y % de frecuencias acumuladas de la fluencia.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2.2. Estadística inferencial

En este punto se tratara la inferencia estadística que comprende los métodos y procedimientos para deducir propiedades de nuestras variables dependientes que son la densidad, % de vacíos en la mezcal, estabilidad y la fluencia; en función a nuestra variable independiente que son los distintos porcentajes de incorporación de limadura de tereftalato de polietileno.

A continuación determinaremos los parámetros estadísticos o pruebas de estimación necesarios como la media, varianza, desviación estándar, error medio de la media para determinar los intervalos de confianza y nivel de confianza que existen en nuestras variables dependientes, puntualmente en el porcentaje óptimo del polímero PET.

4.8.2.2.1. Estadística inferencial de la densidad

El análisis de inferencia estadística que se realizó a continuación, se hizo para los valores de densidad de las 3 briquetas que dieron como resultado el porcentaje óptimo de polímero PET en la mezcla con emulsión asfáltica modificada de 6,00%.

Tabla 4.63. Datos de densidad para el cálculo de la estadística inferencial.

Porcentaje de polímero PET (%)	Nº de briquea	Denominación	Densidad (g/cm ³)
6,00	16	12A	2,317
	17	12B	2,330
	18	12C	2,304

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.64. Estadística inferencial de la densidad para el % óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Estadística inferencial			
Para el valor óptimo de polímero PET. (6,00 %)			
Media	2,317		
Desviación estándar	0,0130		
Varianza	1,685E-04		
Error medio de la media E(x)	3,060E-03		
Con un NC: 95% se tiene que z =	1,96		
Error probable Ep	5,997E-03		
Valor aceptado Va	x ± Ep	2,317 ± 0,006	
Valor aceptado inferior Va inf.	x - Ep	2,311	
Valor aceptado superior Va sup.	x + Ep	2,323	
Rangos (2,311 ; 2,313)			

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza de la densidad calculada en función al porcentaje óptimo de polímero PET, nos indica que cualquier investigación posterior que se realice en función a nuestros datos van a ser correctas, siempre y cuando todas las mediciones que se hagan a futuro se encuentren dentro del intervalo de confianza de la densidad comprendido entre 2,311 gr/cm³ y 2,313 gr/cm³.

4.8.2.2.2. Estadística inferencial del % de vacíos en la mezcla

El análisis de inferencia estadística que se realizó a continuación, se hizo para los valores de % de vacíos en la mezcla de las 3 briquetas que dieron como resultado el porcentaje óptimo de polímero PET en la mezcla con emulsión asfáltica modificada de 6,00%.

Tabla 4.65. Datos del % de vacíos en la mezcla, para el cálculo de la estadística inferencial.

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueta	Denominación	% de vacíos de la mezcla. (%)
6,00	16	12A	3,185
	17	12B	2,636
	18	12C	3,720

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.66. Estadística inferencial del % de vacíos en la mezcla, para el % óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Estadística inferencial Para el valor óptimo de polímero PET. (6,00 %)			
Media			3,149
Desviación estándar			0,542
Varianza			0,294
Error medio de la media E(x)			0,128
Con un NC: 95% se tiene que z =			1,96
Error probable	Ep		0,251
Valor aceptado	Va	x ± Ep	3,149 ± 0,251
Valor aceptado inferior	Va inf	x - Ep	2,90
Valor aceptado superior	Va sup	x + Ep	3,40
Rangos (2,90 ; 3,40)			

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza del % de vacíos en la mezcla calculada en función al porcentaje óptimo de polímero PET, nos indica que cualquier investigación posterior que se realice en función a nuestros datos van a ser correctas, siempre y cuando todas las mediciones que se hagan a futuro se encuentren dentro del intervalo de confianza de un % de vacíos en la mezcla comprendido entre 2,90 % y 3,40 %.

4.8.2.2.3. Estadística inferencial de la estabilidad

El análisis de inferencia estadística que se realizó a continuación, se hizo para los valores de estabilidad de las 3 briquetas que dieron como resultado el porcentaje óptimo de polímero PET en la mezcla con emulsión asfáltica modificada de 6,00%.

Tabla 4.67. Datos de estabilidad para el cálculo de la estadística inferencial.

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueeta	Denominación	Estabilidad (libras)
6,00	16	12A	4069,060
	17	12B	3763,517
	18	12C	3941,227

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.68. Estadística inferencial de la estabilidad para el % óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Estadística inferencial Para el valor óptimo de emulsión asfáltica			
Media			3560,57
Desviación estándar			38,75
Varianza			1501,80
Error medio de la media E(x)			9,13
Con un NC: 95% se tiene que z =			1,96
Error probable	Ep		17,90
Valor aceptado	Va	x ± Ep	3560,57 ± 17,93
Valor aceptado inferior	Va inf	x - Ep	3542,67
Valor aceptado superior	Va sup	x + Ep	3578,47
Rangos (3542,67 ; 3578,47)			

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza de la estabilidad calculada en función al porcentaje óptimo de polímero PET, nos indica que cualquier investigación posterior que se realice en función a nuestros datos van a ser correctas, siempre y cuando todas las mediciones que se hagan

a hagan a futuro se encuentren dentro del intervalo de confianza de la estabilidad comprendido entre 3542,67 libras y 3578,47 libras.

4.8.2.2.4. Estadística inferencial de la fluencia

El análisis de inferencia estadística que se realizó a continuación, se hizo para los valores de fluencia de las 3 briquetas que dieron como resultado el porcentaje óptimo de polímero PET en la mezcla con emulsión asfáltica modificada de 6,00%.

Tabla 4.69. Datos de fluencia para el cálculo de la estadística inferencial.

Porcentaje de polímero PET (%)	N° de briqueleta	Denominación	Fluencia (pulg.)
6,00	16	12A	15,748
	17	12B	15,748
	18	12C	15,354

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.70. Estadística inferencial de la fluencia para el % óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

Estadística inferencial Para el valor óptimo de emulsión asfáltica			
Media			12,728
Desviación estándar			0,227
Varianza			0,0517
Error medio de la media	$E(x)$		0,0536
Con un NC: 95% se tiene que $z =$			1,96
Error probable	E_p		0,105
Valor aceptado	V_a	$x \pm E_p$	12,7283 \pm 0,105
Valor aceptado inferior	$V_a \text{ inf}$	$x - E_p$	12,623
Valor aceptado superior	$V_a \text{ sup}$	$x + E_p$	12,833
Rangos (12,62 ; 12,83)			

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza de la fluencia calculada en función al porcentaje óptimo de polímero PET, nos indica que cualquier investigación posterior que se realice en función a nuestros datos van a ser correctos, siempre y cuando todas las mediciones que se hagan

a hagan a futuro se encuentren dentro del intervalo de confianza de la fluencia comprendido entre 12,62 pulgadas y 12,83 pulgadas.

4.8.2.3. Prueba de Hipótesis

Esta prueba aceptara o rechazara la hipótesis propuesta en esta investigación la cual es:

“Si se incorpora limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en distintos porcentajes a una mezcla con emulsión asfáltica convencional para modificarlas, entonces se mejorara algunas de las propiedades mecánicas de la misma. ”

Para validar esta hipótesis alternativa solo se analizó la propiedad mecánica más incidente en nuestra investigación la cual es la Estabilidad, y tomando como referencia el valor de estabilidad del porcentaje óptimo de mi mezcla con emulsión asfáltica convencional, se pretende mejorar este valor partiendo para ello de los valores obtenidos de estabilidad de las 30 briquetas con emulsión asfáltica modificada con polímeros que se tiene obteniendo así los siguientes datos de análisis:

Datos:

n: Numero de briquetas con MAF modificada con polímero PET. = 30

\bar{x} : Estabilidad media de la muestra modificada con polímero PET. = 3831,34 libras

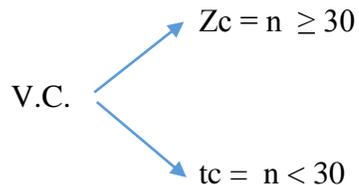
S: La desviación estándar en función a nuestra muestra modificada. = 153,18 libras

μ : Estabilidad obtenida de la norma o especificación técnica = 1800 libras

Los 30 valores de estabilidad para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímero PET se encuentran plasmados en la **Tabla 4.47**. en el punto 4.7.1.2.3. Estadística descriptiva de la estabilidad.

Los valores obtenidos de la estabilidad media y de la desviación estándar fueron sacados de la **Tabla 4.48**. en el punto 4.7.1.2.3. Estadística descriptiva de la estabilidad.

Así como el valor de μ de la estabilidad referencial se obtuvo de la norma de especificaciones técnicas para la estabilidad.

Valores críticos y de prueba.**Paso 1:****Proponer las hipótesis “H₀” y “H₁”***Tabla 4.71. Hipótesis alternativa y nula empleadas.*

H ₀	H ₁
=	≠
≤	>
≥	<

Fuente: Elaboración propia. \bar{x} : Media muestral (Extraído de mis muestras) μ : Media poblacional (Extraído de la norma)H₁: Hipótesis alternativa = $\bar{x} > \mu$ (3831,34 libras > 1800 libras)H₀: Hipótesis nula = $\bar{x} \leq \mu$ (3831,34 libras ≤ 1800 libras)**Paso 2:****Especificar la significación:**Nivel de confianza: 95% \longrightarrow $\alpha = 0,05$

Paso 3:

Calcular los valores críticos y de prueba, definiendo las zonas de aceptación y de rechazo de H_0 :

Imagen 4.55. Graficas de distribución normal.

Fuente: http://homepage.cem.itesm.mx/jorge.ramirez/AD4001/WebS00/S03_05.html

Teniendo los tres tipos de graficas de distribución normal en nuestro caso por las hipótesis planteadas se trabaja con la primera de cola superior donde:

Se procede a calcular la desviación estándar poblacional

Calculo de G:

$$G = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$G = \frac{153,18 \text{ libras}}{\sqrt{30}}$$

$$G = 27,967 \text{ libras}$$

Calculo de Z_c

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{G}{\sqrt{n}}}$$

$$Z = \frac{3831,34 \text{ libras} - 1800 \text{ libras}}{\frac{27,967 \text{ libras}}{\sqrt{30}}}$$

$$Z = 397,83 \text{ libras}$$

Paso 4:**Decisión:**

Se rechaza la hipótesis nula debido a que cae en zona de rechazo

Conclusión:

Se puede afirmar que la propiedad mecánica de estabilidad de una mezcla modificada con polímeros PET de 3831,34 libras es mayor a la estabilidad recomendada por la norma de 1800 libras con una significación del 5%.

Por tanto si se incorpora limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en distintos porcentajes a una mezcla con emulsión asfáltica convencional para modificarlas, entonces **SI** mejorara algunas de las propiedades mecánicas de la misma.

4.9. ELABORACIÓN DE PROPUESTA PARA LA MEZCLA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO LIMADURA DE TEREFALATO DE POLIETILENO (PET).

4.9.1. Análisis de precios unitarios.

El siguiente análisis se realizara para el diseño y colocado de 3 tipos de carpetas de concreto asfaltico para mezclas en frio, la primera con emulsión asfáltica convencional, la segunda con emulsión asfáltica con polímeros y la tercera con emulsión asfáltica modificada con la incorporación de polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET), evaluando cantidad, precios productivos tanto de los materiales como de mano de obra, y asi tambien como del equipo maquinaria y herramientas que se deben utilizar, tambien la sumatoria de los costos indirectos como ser los gastos generales y administrativos, la utilidad y los impuestos.

4.9.1.1. Precio unitario de una carpeta de concreto asfaltico en frio diseñada con emulsión convencional

La siguiente tabla nos muestra el precio unitario del colocado de una carpeta de concreto asfaltico en frio diseñada con emulsión convencional.

Donde la el valor de la emulsión convencional usada es el % optimo hallado con anterioridad en esta investigación y corresponde a un 10,00 %.

Los gastos generales se tomaron como un 15% valor promedio de un rango entre 10 y 20%

Y si adopto la utilidad como un 10%.

El precio unitario por 1 M3 que se obtuvo fue de 2464,29 Bs.

Tabla 4.72. *Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frio con emulsión asfáltica convencional.*

Peso total de la briqueta (g)	Cemento asfáltico residual (68,48%)	6,84	Valor porcentual de los componentes	Peso por m ³
1200,00	Emulsión asfáltica (100%)	10,00		
Agregado Total		1080,00 g	90,00 %	0,90 m ³
Arena clasificada		540,00 g	45,00 %	0,45 m ³
Grava triturada clasificada 3/4"		324,00 g	27,00 %	0,27 m ³
Gravilla triturada clasificada 3/8"		216,00 g	18,00 %	0,18 m ³
Emulsión convencional		120,00 g	10,00 %	0,10 m ³
Total		1200,00 g	100,00 %	1,00 m ³

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 4.73. Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica convencional.

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
PROYECTO:	CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO CONVENCIONAL EN FRIO.				
ACTIVIDAD:	COLOCADO DE CARPETA.				
CANTIDAD:	1,00	MONEDA: BOLIVIANOS			
UNIDAD:	m3				
N°	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES					
1	Arena clasificada	m3	0,45	145,00	65,25
2	Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,27	152,00	41,04
3	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m3	0,18	162,00	29,16
4	Emulsión convencional	1	100,00	15,00	1500,00
5	Diésel	1	1,50	3,72	5,58
TOTAL MATERIALES					1641,03
2. MANO DE OBRA					
1	Obrero	Hrs.	0,07	13,18	0,92
2	Capataz	Hrs.	1,20	18,02	21,62
3	Chofer	Hrs.	0,02	16,44	0,33
4	Ayudante de maquinaria y equipo	Hrs.	0,02	13,18	0,26
5	Operador de planta	Hrs.	0,01	24,85	0,25
6	Operador de equipo liviano	Hrs.	0,08	16,44	1,32
7	Operador	Hrs.	0,40	18,02	7,21
SUBTOTAL MANO DE OBRA					31,91
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				65	20,74
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	7,87
TOTAL MANO DE OBRA					60,52
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
1	Terminadora de asfalto	Hrs.	0,040	350,000	14,000
2	Cargador frontal de ruedas	Hrs.	0,010	420,700	4,207
3	Compactador rodillo liso y pata de cabra	Hrs.	0,020	304,660	6,093
4	Escoba mecánica autopropulsada	Hrs.	0,030	70,600	2,118
5	Planta de calentamiento de asfalto,	Hrs.	0,050	964,970	48,249
6	Rodillo neumático TPS 10000	Hrs.	0,080	332,330	26,586
7	Volqueta 12 m3 o 20 Tn	Hrs.	0,030	227,850	6,836
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5	3,03
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					111,11
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15	
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					271,90
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10	
COSTO TOTAL UTILIDAD					208,46
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	
COSTO TOTAL IMPUESTOS					70,85
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					2363,87
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Bs.)					2363,87
Son: Dos Mil Trecientos Sesenta y Tres con 87/100 Bolivianos					

Fuente: Elaboración propia.

4.9.1.2. Precio unitario de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada con emulsión con polímeros

La siguiente tabla nos muestra el precio unitario del colocado de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada con emulsión con polímeros.

Donde el valor de porcentaje óptimo de la emulsión con polímeros es de 9,50%, y se adoptó de ensayos y pruebas realizadas con los agregados de la chancadora de San José de Charaja.

Los gastos generales se tomaron como un 15% valor promedio de un rango entre 10 y 20%

Y si adopto la utilidad como un 10%.

El precio unitario por 1 M3 que se obtuvo fue de 2738,15 Bs.

Tabla 4.74. *Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frío con emulsión asfáltica con polímeros.*

Peso total de la briqueta (g)	Cemento asfáltico residual (68,48%)	6,51	Valor porcentual de los componentes	Peso por m3
1200,00	Emulsión asfáltica (100%)	9,50		
Agregado Total		1086,00 g	90,50 %	0,91 m3
Arena clasificada		543,00 g	45,25 %	0,45 m3
Grava triturada clasificada 3/4"		325,80 g	27,15 %	0,27 m3
Gravilla triturada clasificada 3/8"		217,00 g	18,10 %	0,18 m3
Emulsión modificada con polímeros		114,00 g	9,50 %	0,10 m3
Total		1200,00 g	100,00 %	1,00 m3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.75. *Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica con polímeros.*

Fuente: *Elaboración propia.*

4.9.1.3. Precio unitario de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada con emulsión modificada por polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)

La siguiente tabla nos muestra el precio unitario del colocado de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada con emulsión modificada en esta investigación con polímeros de tereftalato de polietileno.

Donde el valor de la emulsión convencional usada es el porcentaje de contenido óptimo menos el porcentaje óptimo de polímeros PET; hallado con anterioridad en esta investigación y corresponde a un 9,40 % de emulsión convencional y 0,60 % de polímeros PET.

El precio productivo de la limadura de botella plástica reciclada parte de que la botella reciclada la venden a 1,30 Bolivianos el kilogramo y su molido mediante molienda y posterior obtención de limadura cuesta a 7,00 Bolivianos por kilogramo haciendo un total de gasto de 8,30 Bolivianos por kilogramo de limadura de botella plástica reciclada.

Los gastos generales se tomaron como un 15% valor promedio de un rango entre 10 y 20%

Y si adopto la utilidad como un 10%.

El precio unitario por 1 M³ que se obtuvo fue de 2464,29 Bs.

Tabla 4.76. *Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frio con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).*

Peso total de la briqueta (g)	Cemento asfáltico residual (68,48%)	6,51	Valor porcentual de los componentes	Peso por m ³
1200,00	Emulsión asfáltica (100%)	9,50		
Agregado Total		1080,00 g	90,00 %	0,90 m ³
Arena clasificada		540,00 g	45,00 %	0,45 m ³
Grava triturada clasificada 3/4"		324,00 g	27,00 %	0,27 m ³
Gravilla triturada clasificada 3/8"		216,00 g	18,00 %	0,18 m ³
Emulsión convencional		114,00 g	9,40 %	0,09 m ³
Polímero PET		6,00 g	0,60 %	0,006 m ³
Total		1200,00 g	100,00 %	1,00 m ³

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 4.77. Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
PROYECTO:	CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO MODIFICADO CON POLÍMEROS PET EN FRIO.				
ACTIVIDAD:	COLOCADO DE CARPETA				
CANTIDAD:	1,00	MONEDA: BOLIVIANOS			
UNIDAD:	m3				
N°	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES					
1	Arena clasificada	m3	0,45	145,00	65,25
2	Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,27	152,00	41,04
3	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m3	0,18	162,00	29,16
4	Emulsión convencional	l	94,00	15,00	1410,00
5	Diésel	l	1,50	3,72	5,58
6	Limadura de botella plástica reciclada	Kg.	6,00	8,30	49,80
TOTAL MATERIALES					1600,83
2. MANO DE OBRA					
1	Obrero	Hrs.	0,07	13,18	0,92
2	Capataz	Hrs.	1,20	18,02	21,62
3	Chofer	Hrs.	0,02	16,44	0,33
4	Ayudante de maquinaria y equipo	Hrs.	0,02	13,18	0,26
5	Operador de planta	Hrs.	0,01	24,85	0,25
6	Operador de equipo liviano	Hrs.	0,08	16,44	1,32
7	Operador	Hrs.	0,40	18,02	7,21
SUBTOTAL MANO DE OBRA					31,91
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				65	20,74
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	7,87
TOTAL MANO DE OBRA					60,52
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
1	Terminadora de asfalto	Hrs.	0,040	350,000	14,000
2	Cargador frontal de ruedas	Hrs.	0,010	420,700	4,207
3	Compactador rodillo liso y pata de cabra	Hrs.	0,020	304,660	6,093
4	Escoba mecánica autopropulsada	Hrs.	0,030	70,600	2,118
5	Planta de calentamiento de asfalto,	Hrs.	0,050	964,970	48,249
6	Rodillo neumático TPS 10000	Hrs.	0,080	332,330	26,586
7	Volqueta 12 m3 o 20 Tn	Hrs.	0,030	227,850	6,836
Herramientas = (% del total de mano de obra)				5	3,03
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					111,11
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15	
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					265,87
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10	
COSTO TOTAL UTILIDAD					203,83
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	
COSTO TOTAL IMPUESTOS					69,28
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					2311,45
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Bs.)					2311,45
Son: Dos Mil Trescientos Once con 45/100 Bolivianos					

Fuente: Elaboración propia.

4.9.2. Análisis comparativo de precios unitarios

4.9.2.1. Relación de precio unitario de los tres tipos de carpetas de concreto asfáltico

Tabla 4.78. Precios unitarios de las tres carpetas asfálticas en frío.

Carpeta de concreto asfáltico en frío	Precio unitario (bs.)	Porcentaje (%)
Carpeta de concreto asfáltico convencional en frío	2363,87	100,00
Carpeta de concreto asfáltico modificado con polímeros en frío	2637,73	111,59
Carpeta de concreto asfáltico modificado con polímeros PET en frío	2311,45	97,78

Fuente: Elaboración propia.

Grafico 4.27. Comparativa de precios unitarios.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se percibe claramente que nuestra mezcla con emulsión asfáltica modificada con PET tiene un costo relativamente más bajo en comparación a la mezcla con emulsión convencional y a la emulsión que tiene polímeros por lo que claramente resulta económicamente más barato en relación a ambas.

Nuestra mezcla en frio con emulsión modificada con polímeros PET, nos resulta más económica un 97,78%, en relación a la mezcla en frio con emulsión convencional claro que con mejoras en las propiedades mecánicas.

Y así también nuestra mezcla en frio con emulsión modificada con polímeros PET nos resulta más económica un 87,62%, en relación a la mezcla en frio con emulsión con polímeros que viene de fábrica que en si cumplen la misma función de mejorar las propiedades pero nuestra mezcla es mucho más económica.

Comparando las dos mezclas con polímeros en función a la mezcla patrón que sería la mezcla con emulsión convencional, la mezcla asfáltica con emulsión con polímeros de fábrica resulta ser más cara en un 11,59%, a diferencia de la mezcla que tratamos en esta investigación la cual fue modificada con polímeros de Tereftalato de polietileno que es un 2,22% más económica.

4.9.3. Especificación técnica de una mezcla con emulsión asfáltica en frio modificada con polímeros PET

El desglose de puntos realizado a continuación cita los cuidados y aspectos a tomar en cuenta para la elaboración de una mezcla con emulsión asfáltica en frio modificada con polímero PET.

Descripción:

El presente trabajo consiste en la selección de agregados, emulsión y elaboración de la mezcla con emulsión asfáltica respecto a las temperaturas mezclado y compactado.

Materiales:

Agregados Pétreos:

Los agregados pétreos deben satisfacer los requisitos establecidos por la norma ASTM tal cual esta descrito en la presente investigación, tomando en cuenta estas especificaciones en cada uno de los ensayos realizados tanto para grava, gravilla y arena.

Además los agregados se deben ajustar a las gradaciones propuestas por la ASTM D3515, tanto para mezclas densas como semidensas y en algún caso abiertas.

Material bituminoso:

El material bituminoso usualmente usado para elaborar mezclas abiertas en Bolivia es la emulsión asfáltica catiónica de rotura media, y para el diseño de mezclas semidensas y densas se usara una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, esto debido al contenido de fino que presentan las distintas mezclas y al tiempo de rotura de la emulsión, pues a mayor cantidad de finos en la mezcla se precisa un tiempo de rotura mucho más largo.

En esta investigación a pesar que se trabajó con una emulsión asfáltica de rotura media para una mezcla densa el fin no es más que investigativo pues las briquetas realizadas eran pequeñas y se pueden realizar una mezcla adecuada sin ser dificultad el tiempo de rotura.

La emulsión asfáltica a utilizar debe satisfacer las especificaciones establecidas en su ficha técnica de origen basado en la normativa AASHTO que son las mismas que la ASTM.

Polímero modificador de la emulsión:

El polímero modificador en nuestro trabajo fue la limadura de Tereftalato de polietileno (PET) presente en las botellas plásticas, para obtener la limadura se realiza un triturado en molineras comprendido entre 6 a 10 molineras del material, para después seleccionar por medio de la granulometría el material más pequeño posible, siendo aceptables para el diseño el material PET comprendido en el tamiz N° 100 y tamiz N° 200.

Además la incorporación de la limadura PET se debe realizar mediante la vía húmeda es decir como parte de la emulsión asfáltica en un porcentaje de 6,00 % para obtener mejores resultados en la mezcla, el modo de incorporarlo a la emulsión debe ser introduciendo la emulsión a una temperatura constante en el horno de 140°C por 10 minutos aproximadamente verter el polímero PET esparciéndolo de manera homogénea y dejar que la unión se lleve a cabo en el horno por otros 10 minutos sacarlo y dejarlo enfriar. El tiempo que este la emulsión en el horno es indispensable y no debe sobrepasar ello para evitar un rotura prematura de la emulsión asfáltica.

Diseño de la mezcla con emulsión asfáltica en frío modificada con polímeros:

El contenido del ligante se deberá fijar en función de los materiales por emplear, este no debe sobrepasar en lo necesario de un 10,50 % de emulsión del total de la mezcla asfáltica.

Mezclado:

Se debe prever en este punto el tiempo de mezclado en función a la emulsión asfáltica que se esté utilizando debido a su tiempo de rotura, se debe remover vigorosamente procurando el recubrimiento de todas sus partículas y hasta que la humedad este homogénea en toda la mezcla, este proceso se debe realizar preferentemente a temperatura ambiente siendo la ideal de entre 25°C a 35°C sin sobrepasar por ningún modo los 40°C.

Compactación:

A menudo y previamente a la compactación es necesario airear o secar la mezcla, en este proceso es fundamental evitar el efecto rebote del compactador debido a que esto indica que la mezcla aun exuda líquido, cuando se de esta condición remueva ocasionalmente la mezcal para reducir el contenido de humedad y lograr un buen compactado.

Posterior a este proceso se debe dar un tiempo de al menos dos horas para que la mezcla se afirme y elimine cualquier contenido de humedad excedente para luego ser habilitada al paso de vehículos los cuales se deberán limitar a 30 Km/h durante las setenta y dos horas siguientes a la apertura de tránsito hasta que el pavimento se encuentre totalmente curado.

Limitaciones en el tipo de transito:

Las mezclas con emulsión asfáltica en frio son usualmente utilizadas en calles alternas o pavimentos de mediano a bajo tránsito, y en bacheo de calles.

Esto se debe a que la rotura se la realiza a una temperatura de 25°C y no a 60°C como se la hace a una mezcla en caliente.

4.9.4. Ventajas y desventajas de las mezclas modificadas con polímero PET**4.9.4.1. Ventajas**

Económicamente las mezclas modificadas con la incorporación de limadura de Tereftalato de polietileno resultan mucho más baratas tanto en su diseño como colocado con respecto a una mezcla con emulsión con polímeros, e incluso su precio es menor a una mezcla con emulsión convencional.

El uso del polímero de Tereftalato de polietileno genera una mezcla más flexible y reduce la posibilidad de rotura por fatiga, siendo capaz de absorber tensiones.

Mejora la cohesión de la mezcla, mayor adherencia y elasticidad.

Mejora la vida útil, es decir menos trabajos de conservación.

Fácil obtención del producto, además que promueve el reciclaje y reduce la contaminación.

Permite reiniciar el tráfico sobre la mezcla bituminosa de manera más rápida.

4.9.4.2. Desventajas

No existe un procedimiento de diseño de mezclas en frío con adición de polímero de Tereftalato de polietileno por vía húmeda normalizadas en nuestro medio.

La reciente investigación de modificación de emulsiones con polímeros, posibilita la baja producción de la mezcla, además del poco uso de emulsiones con polímeros para el diseño de mezclas en Tarija.

El resultado de la mezcla modificada depende del correcto método de fabricación.

Un incremento de temperatura en la fabricación podría provocar una rotura prematura de la emulsión y la pérdida de adherencia de sus componentes previa al compactado.

4.9.5. Valor significativo de la investigación respecto al tema ambiental

La presente investigación destaca su incidencia respecto en el tema ambiental en función a los siguientes puntos trazados.

Promover el uso de las emulsiones asfálticas para el diseño de mezclas es bastante ventajoso debido a que se trabaja a temperatura ambiente es decir no necesita ser calentado a altas temperaturas por tanto no expelle gases tóxicos a diferencia de las mezclas en caliente que generan este tipo de gases que suben a la atmosfera y dañan la capa de ozono, además el uso de emulsiones asfálticas contribuye al protocolo de Kioto el cual pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmosfera.

Además la incorporación de la limadura de Tereftalato de polietileno como polímero a la emulsión, es una propuesta bastante favorable al medio ambiente debido a que exhorta al reciclaje de botellas plásticas que son materiales contaminantes que pueden tardar años en degradarse generando pésimo panorama, erosión y muerte de especies animales y plantas.

Esta propuesta ambiental podría promover al incremento de fábricas o plantas recicladoras con moliendas para generar materia prima para elaborar la mezcla asfáltica modificada con polímeros PET que precisa de 6 Kg de limadura de PET por metro cubico de mezcla.

A continuación se justifica esta investigación como propuesta ambiental por medio de los siguientes artículos:

Con respecto al Medio Ambiente se sabe que hoy en día el crecimiento poblacional ha hecho que la industria en Bolivia fabrique productos de forma acelerada, por lo que en particular se considera que esos volúmenes de basuras o productos de los cuales hace uso la sociedad se torna cada vez un reto dentro del área de la ingeniería ambiental. Y dentro de nuestro entorno se sabe también que a través del tiempo la industria del plástico ha ido en aumento y ha sustituido diversos materiales tales como el vidrio, la madera y el Cloruro de Polivinilo (PVC), por el denominado Tereftalato de Polietileno (PET), ya que el mismo es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a compresión, posee alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y olor de los alimentos, y es una barrera contra los gases. La producción anual de envases de Tereftalato de Polietileno (PET) en el mundo es aproximadamente de 207 millones de Toneladas, cifra que va aumentando considerablemente a nivel mundial. (Casanova, 2009).

La propuesta que se tiene en la presente investigación ayudaría mucho al reciclaje de productos plásticos y a darle un uso técnico en el diseño de pavimentos.

A pesar que en Bolivia la actividad del reciclaje de botellas de Tereftalato de Polietileno (PET) es relativamente nueva y existe una ley del reciclaje de botellas PET-PCR lanzada el 30 de agosto de 2016, se sostiene que al menos unas 1.500 toneladas de material reciclable se generan en el país y de ese monto entre 800 a 1.000 toneladas corresponden

a las botellas PET, se observa un desarrollo relevante del negocio del reciclaje que aun así requiere de más apoyo.²⁰ (Toro, 2012)

Con base en lo anterior, cabe agregar que precisamente la ciudad de Tarija fue la primera en proponer la reducción de plástico por medio de campañas, y debate de proyecto de leyes de reciclaje, y se sabe también que no todas las botellas de Tereftalato de Polietileno (PET) son reciclables, por lo cual se considera pertinente reciclarlo y clasificarlo para lograr una disposición adecuada de los plásticos producidos además se tiene como dato que el kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire; lo que se considera prioritario debido a que afecta los ecosistemas por su lenta descomposición y degradación.

La contaminación producida por desechos plásticos en el país es crítica y de acuerdo a la información de la prensa, el 65% de la basura es material orgánico y 35% inorgánico, generado en un 70% por hogares y 30% por industrias y comercio. Entre los principales desechos inorgánicos están el plástico, papel, cartón, vidrio, aluminio y lata.

Quizá convenga saber este dato sobre el tiempo que tardan nuestros desechos en biodegradarse:

Papel entre 8 meses a un año.

Chicles un mínimo de 5 años.

Latas de Aluminio de 10 a 100 años dependiendo el grosor composición y tamaño del envase.

Aerosoles y Tetrabriks se estima un mínimo de 30 años.

El polipropileno que son bolsas, corchos y tapas plásticas entre 100 a 300 años.

Pañales y toallitas íntimas entre 500 años.

Pilas entre 500 a 1000 años.

Y para nuestro caso los desechos plásticos entre Cloruro de Polivinilo (PVC) y Tereftalato de Polietileno (PET), tardan un mínimo de 450 a 1000 años en descomponerse. (ECOticias, 2012).

Teniendo todos estos aspectos en cuenta se desarrolla a continuación un ejemplo para una calle de aproximadamente 6,5 metros de ancho tomando este valor para el diseño de un

²⁰ Datos extraídos de un artículo del Periódico La Razón : http://m.la-razon.com/suplementos/financiero/Botellas-industria-productos-exportan-Europa_0_1536446443.html

cruce de camiones livianos y autos del Manual de Diseño de Calles para Ciudades Bolivianas que nos referencia un valor mínimo de 6 metros de ancho, y largo de calle correspondiente a una cuadra que es de 100 metros y un espesor en función al uso de emulsiones para diseño de pavimentos de tráfico liviano a intermedio que será para una calle secundaria, o vecinal de un espesor aproximado de carpeta de rodado de 40 mm a 70 mm en carpetas delgadas para tráfico liviano, y mayores a 70 mm para carpetas intermedias y arteriales según ecuaciones empíricas y ábacos del Manual del Instituto del Asfalto²¹.

Teniendo estos datos:

Largo de calle: 100 metros

Ancho de calle: 6,5 metros

Espesor de calle: 0,08 metros

$$\mathbf{Volumen\ total = l * a * e}$$

$$\mathbf{Volumen\ total = 100m * 6,5m * 0,08m}$$

$$\mathbf{Volumen\ total = 52\ m^3}$$

Se usan 6 Kg para cada 1m³, donde en este ejemplo se necesitarían 312 Kg de limadura de botella para los 52 m³, se dice que 30 botellas de 600 ml equivalen a 1Kg de PET y esto es proporcional a decir que 9 botellas de 2 litros equivalen a 1 Kg de PET²²; es decir para este ejemplo se contribuiría a reciclar 2808 botellas vacías de 2 litros para pavimentar una calle de estas dimensiones.

²¹ <https://dokumen.tips/documents/manual-del-asfalto-instituto-del-asfalto1.html>

²² <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/cuantas-botellas-de-pet-necesitas-reciclar-para-ganar-un-salario-minimo>

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Se estableció que la forma más conveniente de trabajar con la limadura de Tereftalato de Polietileno(PET) e incorporarlo a una mezcla con emulsión asfáltica es mediante la vía húmeda, debido a que, el mejorar la emulsión con polímeros ha dado mejores resultados según investigaciones, que en comparación al método por vía seca que propone alterar el árido con limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) no es factible, debido a que en Mezclas Asfálticas en Frio (MAF) es difícil la adherencia de la emulsión al plástico una vez que está cubierto de material fino ya sea en mezcla o compactado, además que también se han producido roturas al momento de desmoldar.
- ✓ Se determinó la proporción de agregados pétreos mediante una combinación que pueda cumplir con las especificaciones de la banda granulométrica TM-25 que se detalla en el Manual de la Administradora Boliviana de Carreteras, llegando a establecer que la combinación granulométrica de 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de arena, usada para realizar la mezcla que presentó buenos resultados.
- ✓ Por otra parte se logró realizar la caracterización de la emulsión, y se obtuvo valores cercados a los de su ficha técnica, y usando los mismos parámetros de la ficha, estos cumplen con los rangos que especifica.
- ✓ Se logró incorporar de manera satisfactoria el polímero de Tereftalato de Polietileno (PET) en todos sus porcentajes a la emulsión, y diseñar la mezcla con emulsión asfáltica modificada sin tener dificultad en la elaboración y extracción de las briquetas, cumpliendo con el procedimiento y las temperaturas adecuadas según indica el manual básico de emulsiones asfálticas series N°19.

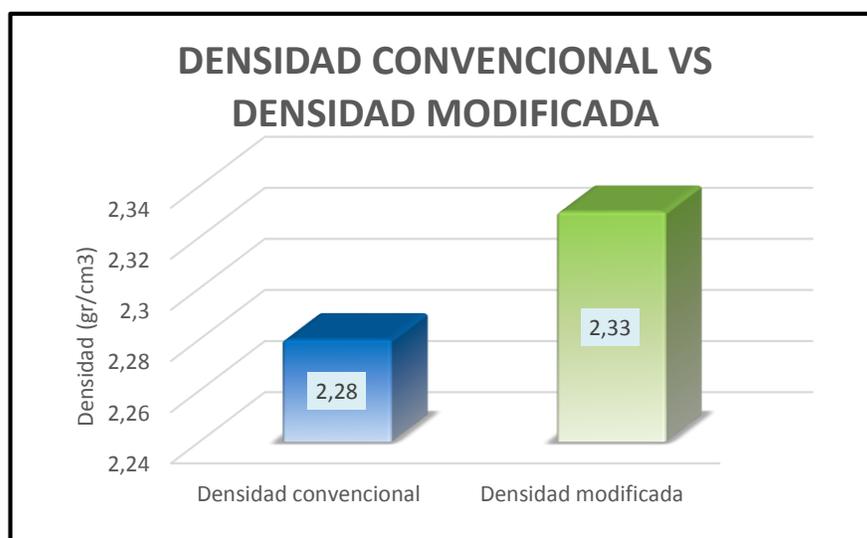
Tabla 5.1. Comparación de las propiedades de una mezcla convencional y una mezcla modificada con polímeros PET.

Propiedades mecánicas de la mezcla con emulsión asfáltica en frío	Mezcla con porcentaje óptimo de 10,00% de emulsión asfáltica convencional	Mezcla con porcentaje óptimo de 9,40% de emulsión asfáltica modificada con 6,00% de polímero PET	Mejora porcentual (%)
Emulsión total (%)	10,00	10,00	
Densidad (g/cm ³)	2,28	2,33	+2,19 %
Porcentaje de vacíos (%)	3,83	3,11	-18,80 %
Estabilidad (libras)	3524,50	3912,13	+11,00 %
Fluencia (pulgadas)	12,72	15,19	+19,41 %

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Por otra parte, tomando en cuenta las propiedades Marshall según el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en cada grupo, se pudo percibir que el uso de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) mejora satisfactoriamente las propiedades mecánicas de la mezcla con emulsión asfáltica en porcentajes comprendidos sobre entre 1,00 a 7,00% que se encuentran dentro del rango permitido, siendo el 6,00% el porcentaje óptimo de polímero para la mezcla modificada como se puede apreciar en la tabla, ya que ese porcentaje presenta la mejor estabilidad, y una buena fluencia, y tanto en el % de vacíos, como el VAM sus valores cumplen con los rangos.

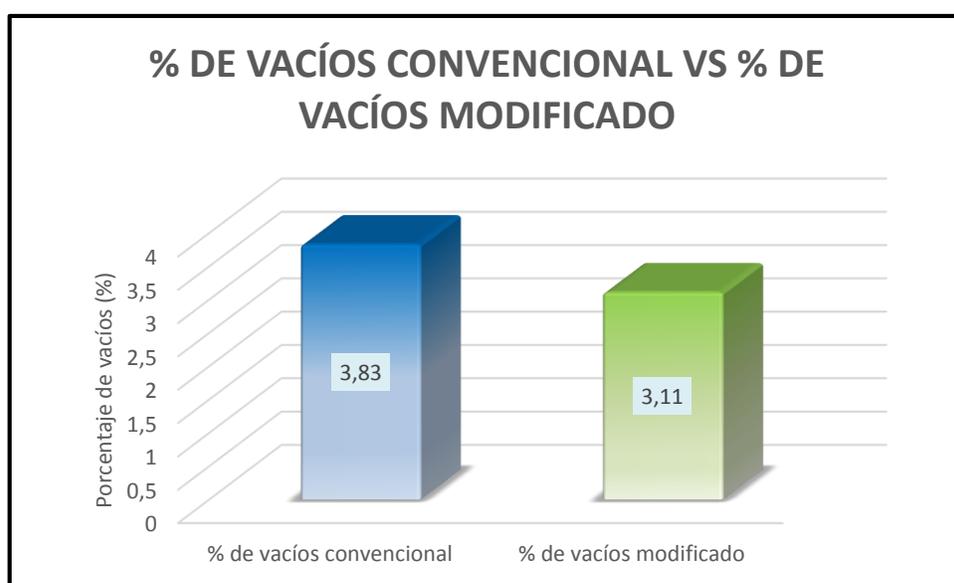
Gráfica 5.1. Comparación de la densidad convencional vs densidad modificada.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Así también analizando cada propiedad a través de las gráficas comparativas de resultados, se concluye que la mezcla modificada con polímeros PET mejora las propiedades mecánicas, dándonos en este caso un valor de densidad más alto que podría verse plasmado en un mejor rendimiento del pavimento, no obstante no sufre variaciones considerables con respecto a la mezcla convencional lo que nos indica que se adecua a la mezcla convencional y no incide en ella de forma negativa, pues si incremento porcentual respecto a una densidad convencional es de 2,19%.

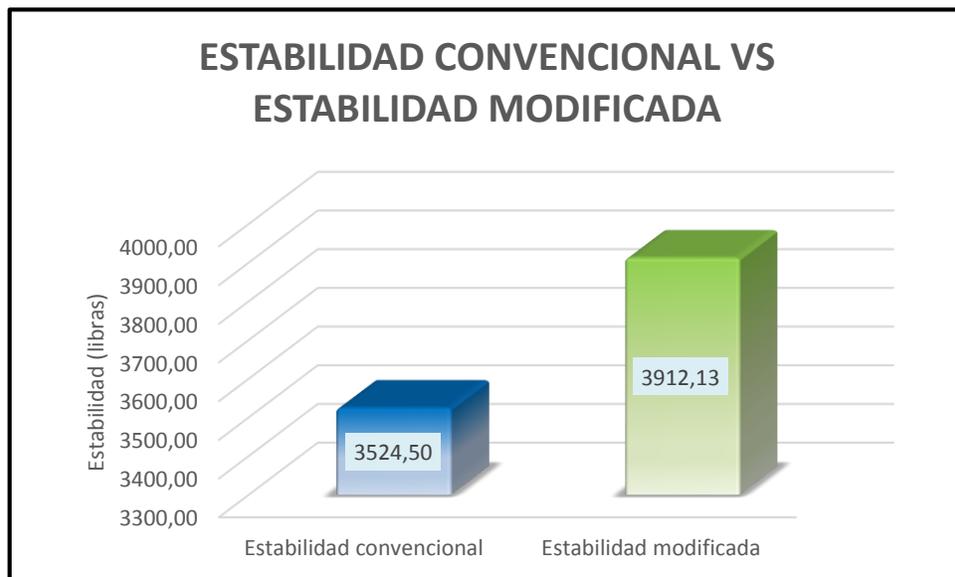
Gráfica 5.2. Comparación del % de vacíos convencional vs % de vacíos modificado.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Respecto al porcentaje de vacíos este es menor cubriendo más la mayoría de los vacíos de aire en la mezcla, esto es debido a que el polímero le da viscosidad más alta a la emulsión, lo que se ve plasmado en la mezcla logrando mayor adherencia y cohesión de los componentes. La reducción porcentual de vacíos respecto a una mezcla convencional es de 18,80%.

Gráfica 5.3. Comparación de la estabilidad convencional vs estabilidad modificada.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ La estabilidad incrementa considerablemente respecto a una mezcla convencional en un 11,00%, haciendo que nuestra mezcla modificada con polímero PET tenga una mayor resistencia a las cargas de tráfico.

Gráfica 5.4. Comparación de la fluencia convencional vs fluencia modificada.

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Al tener menor porcentaje de vacíos y una emulsión asfáltica más viscosa respecto a la convencional se obtiene una fluencia más alta dándole mayor elasticidad a la mezcla, y una capacidad de cedencia más elevada para soportar una mayor carga antes de su quiebre, esto se ve reflejado en el incremento porcentual de 19,41% respecto a una mezcla convencional obteniendo una mayor estabilidad hasta un valor de fluencia de 15,19 centésimas de pulgada.
- ✓ Los tratamientos estadísticos realizados en función a los resultados de las propiedades mecánicas fueron satisfactorios, ya que gracias a los mismos se pudo realizar una correcta evaluación y apreciación de los resultados, y además se obtuvieron errores mínimos de medición y cálculo de los resultados de estudio.
- ✓ Por medio de una prueba de hipótesis a la estabilidad que es la propiedad de mayor incidencia en una mezcla, se pudo validar que efectivamente sí con la incorporación de limadura de Tereftalato de Polietileno a la emulsión se mejora las propiedades mecánicas de la mezcla.

Tabla 5.2. Comparación de costos de las diferentes carpetas asfálticas en frío.

Carpeta de concreto asfáltico en frío	Precio unitario (bs.)	Porcentualmente (%)
Carpeta de concreto asfáltico convencional en frío	2363,87	32,32
Carpeta de concreto asfáltico modificado con polímeros en frío	2637,73	36,07
Carpeta de concreto asfáltico modificado con polímeros PET en frío	2311,45	31,61
Precio Total	7313,05	100

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5.5. Comparación porcentual del costo de diferentes carpetas en frío.

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Se obtuvieron bastantes ventajas en cuanto al uso de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en la modificación de mezclas con emulsión asfáltica, sobretodo en el tema económico como se puede apreciar en la torta, ya que como se denota porcentualmente nos resulta mucho más barato que una mezcla con emulsión asfáltica con polímeros de fábrica, e incluso de menor costo que la mezcla con emulsión asfáltica convencional misma.
- ✓ Con respecto al tema ambiental la mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros PET presenta bastantes ventajas en los aspectos de no ser contaminante ni expeler gases tóxicos, y promoviendo a la descontaminación del plástico y darles un uso ingenieril que beneficie a la sociedad.
- ✓ Se establece que el uso de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) es recomendable como agente modificador de la emulsión en porcentajes no mayor 6,00%, debido a que si se sobrepasa ese valor no se cumple con los parámetros de % de vacíos, VAM, y nos daría una fluencia bastante elevada que provocaría una mezcla demasiado plástica que se deformaría con facilidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Se aconseja tener en cuenta la manipulación y almacenamiento de la emulsión ya que debido a eso se puede perder propiedades y porcentaje de agua debido a la evaporación de la misma.
- ✓ Hacer un buen uso del tiempo para la realización de la caracterización de los agregados y de la emulsión por la falta de equipos y materiales en los laboratorios.
- ✓ Se recomienda tener mucho cuidado al realizar los ensayos de la caracterización de la emulsión, especialmente al calentar la emulsión a altas temperaturas, tal es el caso del ensayo de destilación del cual se debe verificar constantemente la temperatura para evitar accidentes lamentables.
- ✓ Se recomienda que al momento de trabajar con polímero de limadura de polietileno, se emplee la porción más fina del mismo comprendida en el tamiz N°100 o N° 200, y que al momento de incorporarlo a la emulsión sea de a poco y esparcido para facilitar su unión.
- ✓ Se recomienda controlar la temperatura de una mezcla asfáltica en frío debido a que un exceso de temperatura podría provocar la rotura prematura de la emulsión.
- ✓ Se recomienda tener mucho cuidado en la utilización y manipulación los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos y también se recomienda utilizar ropa adecuada como guantes, barbijo, lentes y otros para evitar problemas de salud.
- ✓ Dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación y sobre todo a la prensa debido a la calibración del anillo de carga Marshall, porque podría afectar a los resultados.
- ✓ Es importante el implementar en las guías de laboratorio ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica que no conocidos en nuestro medio tales como: el ensayo de estabilidad al almacenamiento, demulsibilidad, recubrimiento y resistencia al agua, ensayo del mezclado de la emulsión asfáltica, ensayo del tamiz, ensayo de solubilidad en tricloroetileno o el ensayo de flotabilidad; donde lo único que se requiere es un conocimiento apropiado del procedimiento a seguir, buen manipuleo y material de uso como las soluciones y bases.
- ✓ Se recomienda que las mezclas con emulsión asfáltica en frío sean utilizadas en calles alternas o secundarias, y en pavimentos de mediano a bajo tránsito o en el bacheo de calles, las mismas que comprenden una estabilidad por encima de las

1200 libras y una fluencia de 8 a 16 centésimas de pulgada, estableciendo una fluencia ideal entre trafico pesa y mediano que oscila entre 14 a 15,5 centésimas de pulgada, es uso en este tipo de pavimentos es debido a que la temperatura a la rotura se la realiza es de 25°C y no a 60°C como se la hace a una mezcla en caliente, y que diseño de mezclas con emulsiones siempre son usadas para este tipo de tránsito.

- ✓ Se recomienda el uso de la mezcla asfáltica ecológica presentada en esta investigación ya que implementaría nuevas tendencias en el uso de emulsiones, una propuesta innovadora de reciclaje y mejores resultados en cuanto a sus propiedades reduciendo costo tanto de diseño para su elaboración, así como menor costo de mantenimiento del mismo.