

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En este último tiempo, debido al constante desarrollo de las vías de comunicación, a causa del mayor tráfico vehicular en las redes viales, es decir; el 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 pretende mejorar las características del suelo con emulsiones asfálticas, es necesario mejorar las capas base y sub base de la estructura del pavimento, debido a que esta no muchas veces no cumple con las especificaciones requeridas por quien contrata la obra, para esto se pueden utilizar técnicas que pueden ser la mezcla de dos o más tipos de material, se pueden emplear diversos tipos de aditivos, como cemento, cal, asfaltos, aumentando la durabilidad de dichas capas y por lo tanto también aumentar la durabilidad de la vía.

En la actualidad el uso de las emulsiones asfálticas se ha venido incrementando, principalmente a su gran versatilidad y facilidad de uso en trabajos de conservación y pavimentación de carreteras, además de sus características amigables con el medio ambiente, minimización de costos de inversión y mantenimiento, siendo consideradas como un excelente reemplazo de los cementos asfálticos, los cuales emplean solventes de alto costo y son altamente contaminantes.

El presente proyecto de tesis comprende en diseñar mezclas de materiales granulares con diferentes porcentaje de emulsión asfáltica, encontrando un óptimo porcentaje de emulsión asfáltica mediante los ensayos de CBR o método Marshall.

En este caso se utilizará la metodología Marshall para materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica y se evaluará si los parámetros obtenidos, principalmente la estabilidad, flujo y cambio de estabilidad cumple con los requisitos de la metodología.

En segundo caso, se debe evaluar el daño por humedad, debido a que estas mezclas asfálticas tienen un mayor porcentaje de vacíos que una mezcla convencional en caliente. Por ese motivo, se evaluará si estas mezclas son resistentes a la acción del agua o humedad que son los agentes climáticos más destructivos en los pavimentos asfálticos, provocando deterioros o daños por humedad, donde su manifestación más común es el “stripping” que consiste en la separación de la matriz árido-ligante generado por la pérdida de adhesión y cohesión a causa del ingreso de agua o vapor de agua.

1.2. Situación problemática

1.2.1. Problema

¿Si evaluamos los efectos en la resistencia al daño por humedad en suelos estabilizados con emulsión asfáltica, podríamos obtener el comportamiento ante la presencia de humedad?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Consecutivamente el nivel de servicio y periodo de diseño las vías no es el esperado, puesto que éste se verá afectado por un elemento agresivo, el cual es la humedad. El problema de la humedad en los suelos mejorados, es que causa muchos daños y deterioros externa e internamente, afectando así la estabilidad y durabilidad.

La humedad trae como consecuencia una disminución de la resistencia de los suelos de soportar cargas, pudiéndose observar cuando la humedad afecta a las capas de la estructura de la carretera, provocando así un hundimiento debido al paso de los vehículos (cargas) que circulan. Esto traerá como consecuencia el desprendimiento de los agregados. A esto se le puede asociar el factor lluvia, el agua que cae en forma de lluvia sobre la superficie terrestre se distribuye en tres formas: una parte se evapora por la acción del sol, otra se infiltra en el terreno que recorre y la última se escurre directamente sobre el terreno que recorre en busca de una corriente de agua.

Esta agua que recorre en busca de una corriente, irá a ser depositada en la falla originada, formando así charcos de agua. Esta cantidad de agua si bien a veces no es muy significativa, causa un gran daño en la estructura de la vía, ya que algunas veces por mala compactación, el agua ingresa por los vacíos de aire, ocasionando deformaciones o agrietamientos que influirán en el nivel de servicio de la vía.

El presente trabajo se lo efectuará, con finalidad de evaluar el efecto que tiene el agua en suelos estabilizados con emulsiones asfálticas, para observar el daño por humedad. Esto nos permitirá tomar en cuenta el estudio realizado, para las próximas obras viales a ejecutarse, reduciendo así los daños o fallas posteriores en los suelos. Se utilizará emulsiones asfálticas en frío aplicadas en nuestro medio, con suelos granulares. Una de las causas que provocan estos daños en los pavimentos, son el agua, que intervienen en la matriz árido-ligante, generando pérdida de adhesión y cohesión a causa del ingreso de agua o vapor de agua.

1.3. Justificación

Figura 1.1. Vías intransitables



Fuente: Elaboración propia

Uno de los principales problemas de las zonas rurales es la mala transitabilidad en vías no pavimentadas debido a condiciones climáticas propias del país, caracterizados por humedad y precipitaciones altas provocando así un gran perjuicio en el comercio, educación, salud por lo cual se propone soluciones básicas proponiendo bases estabilizadas con emulsión

asfáltica diseñada con la finalidad de mejorar las condiciones de transitabilidad vial en esas zonas.

En los suelos la humedad es muy importante porque determinan la capacidad de éstos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo, hasta ciertas humedades los suelos pueden mantener resistencias aceptables, pero cuando hay excesos de agua se debilitan y pierden la resistencia, que se manifiestan en hundimientos, grietas, cuarteamientos, etc.

Se escogió específicamente optar por una solución con emulsión asfáltica ya que además del aumento de estabilidad por las características aglomerantes del ligante este envuelve las partículas del suelo brindándole también una impermeabilización, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y por tanto más estable en condiciones adversas, esto se adecua de buena manera a los cambios climáticos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar los efectos que causan los daños por humedad en la resistencia de suelos estabilizados con emulsión asfáltica de tal forma que se observe su comportamiento mediante ensayos Marshall en el laboratorio.

1.4.2. Objetivo específicos

- Proponer una superficie para caminos de baja transitabilidad.
- Describir metodologías realizadas en el extranjero en beneficio de la ingeniería integrando los lugares más alejados de Bolivia beneficiando el comercio salud y educación.
- Obtener el contenido óptimo de humedad y emulsión asfáltica para la estabilización de suelos.
- Efectuar análisis comparativo de probetas saturadas y probetas secas a partir de las pruebas realizadas en laboratorio.
- Determinar de acuerdo a los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio si el suelo estabilizado con asfalto es una opción viable y duradera.

1.5. Hipótesis

Sí evaluamos los efectos y daños por humedad en la resistencia en suelos estabilizados con emulsión asfáltica mediante ensayos Marshall con probetas secas y húmedas, entonces sabremos si esta mezcla es apta para ser empleada en capas base.

1.6. Operacionalización de variables

1.6.1. Variable independiente

Estabilización de suelos con emulsión asfáltica.

1.6.2. Variable dependiente

Daño en la resistencia por humedad.

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Estabilización de suelos con asfalto	La estabilización de suelos permite mejorar las propiedades mecánicas del suelo para soportar cargas.	Probetas secas	Libras lb	Preparado de 6 muestras para cada contenido de asfalto residual
		Probetas húmedas		
Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Daño por humedad	La sensibilidad que presentarán las probetas al agua	Cambio de estabilidad	Porcentaje (%)	saturado durante 24 hrs

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

Esta investigación, es de tipo diseño experimental y se basa en el principio de generar una acción y obtener la reacción, para ello el investigador manipula con criterio a las variables independientes y observa los efectos en las variables dependientes.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1. Unidad de estudio

Es el efecto del daño por humedad en la estabilidad en suelos estabilizados con emulsión asfáltica, donde se realizarán 30 briquetas, 15 briquetas secas, y 15 briquetas húmedas, con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica, estas probetas serán sometidas a la prensa Marshall.

1.8.2. Población

Estabilización de suelos con emulsión asfáltica.

1.8.3. Muestra

La muestra será la evaluación del efecto al daño por humedad de suelos estabilizados con emulsión, para lo cual se tratará 30 briquetas con diferentes porcentajes de residuo asfáltico 2, 2.5, 3, 3.5, 4, donde se usará emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta.

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

Se realizará un muestreo simple no aleatorio donde se eligen los elementos por conveniencia a criterio del investigador, cuando crea que los elementos seleccionados puedan brindar mejor información a la investigación.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

Para la evaluación del efecto en el daño por humedad de los suelos con emulsión, se usará el método inductivo porque este método se basa en la experimentación mediante ensayos de laboratorio, la inducción es un razonamiento que analiza una porción de un todo; parte de lo particular a lo general, es decir, va de lo individual a lo universal.

La característica de este método es que utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares, aceptados como válidos para llegar a conclusiones cuya aplicación es de carácter general. El método se inicia con la observación individual de los hechos, se analiza la conducta y características del fenómeno, se hacen comparaciones, experimentos, etc. y se llega a conclusiones universales para postularlas como leyes, principios o fundamentos.

1.9.2. Técnicas

Con los agregados y la emulsión se utilizará la técnica experimental con ensayos de laboratorios que caracterizarán dichos materiales, donde se procede a diseñar la mezcla con emulsión asfáltica, se realizará briquetas, dividiéndolas en dos grupos, uno de secas y otro de húmedas, las cuales serán introducidas en agua, controlados con instrumentos de medición de temperatura. Donde se realizarán los siguientes ensayos.

Caracterización del agregado

Ensayos

- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compactación
- CBR
- Equivalente de arena
- Peso específico de agregado grueso
- Peso específico de agregado fino
- Desgaste de los ángeles

Caracterización de emulsión asfáltica

Ensayos

- Viscosidad
- Penetración
- Ductilidad
- Punto de ablandamiento

- Destilación
- Sedimentación
- Peso específico

Ensayos Marshall

- Estabilidad
- Fluencia
- Densidad

1.10. Procesamiento de la información

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y de las pruebas de resistencia técnica, se procede al tabulado. Con los ensayos de caracterización se determina el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto la emulsión asfáltica y de los agregados.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica se determina las siguientes gráficas:

- Densidad vs asfalto residual
- Estabilidad vs asfalto residual
- Cambio de estabilidad vs asfalto residual
- Porcentaje de vacíos totales vs asfalto residual
- Flujo vs asfalto residual
- Estabilidad seca vs estabilidad saturada

1.11. Alcance

El presente investigación analiza el comportamiento de los suelos estabilizados con suelos granulares y emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta (CSS1), donde se realizan briquetas mediante ensayos Marshall, dividiéndolas en grupos de probetas secas y húmedas.

Se realizó caracterización de los suelos A-2-4 (G.W.) bajo normas establecidas por el instituto del asfalto donde sugiere bandas granulométricas un, I.P. menor a 10 un C.B.R. entre (25-80), esto para evaluar si el material es apto para tratamiento de capas bases

estabilizadas con emulsión asfáltica ya que estos tienen un efecto importante en el desempeño de las mezclas asfálticas frente al daño por humedad.

Una vez verificado que el material granular es apto se procedió a la caracterización de la emulsión asfáltica (CSS1) ya que estas son las más utilizadas en este tipo de aplicación estas emulsiones asfálticas facilitan su dispersión sobre el material granular, obteniéndose una buena trabajabilidad en un tiempo suficiente para que se dé todo su proceso constructivo.

Ensayos

- Viscosidad
- Penetración
- Ductilidad
- Punto de ablandamiento
- Destilación
- Sedimentación
- Peso específico

Una vez verificado que la emulsión y el agregado cumplen con los requerimientos especificados se realizó 6 especímenes, por medio de compactación Marshall (AASHTO T 245) a 75 golpes por cara, con diferentes porcentajes de residuo asfáltico del 2% 2,5% 3% 3,5% y 4% tomados de la guía para el diseño de materiales granulares estabilizados con emulsión de San José, Costa Rica.

Con los especímenes elaborados se procedió al ensayo de estabilidad Marshall la cual establece por norma un valor mínimo de 750 lb/mín para mezclas asfálticas en frío (AASHTO T 245).

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

2.1. Bases estabilizadas con emulsión asfáltica (CSS1)

Los materiales estabilizados con asfalto son materiales sometidos a un tratamiento con emulsión asfáltica, asfalto espumado o asfalto en caliente, para aumentar su resistencia al corte y reducir la susceptibilidad al daño por humedad. Los materiales sometidos a este tratamiento son generalmente materiales granulares, materiales tratados previamente con cemento, mezclas asfálticas recuperadas (RAP) e inclusive pavimento recuperado que incluya capas subyacentes y/o materiales tratados para formar una nueva base o sub-base.

La técnica de estabilización de materiales granulares consiste en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material por medio de la dispersión del asfalto entre las partículas más finas de agregado. Cuando se utilizan las emulsiones asfálticas, estas se dispersan preferentemente entre las partículas más finas, pero no exclusivamente, ya que algunas partículas más gruesas son parcialmente recubiertas. Con las emulsiones asfálticas, se da una unión química entre el agregado y el asfalto promovido por el emulsificantes (Asphalt Academy, 2009).

2.2. Estabilización de suelos

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un suelo firme y estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad.

La estabilización es el proceso de combinar o mezclar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades.

El proceso puede incluir la mezcla entre diversos tipos de suelos para alcanzar una graduación deseada (estabilización mecánica) o la mezcla del suelo con aditivos disponibles en el mercado (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura o plasticidad. Igualmente, el estabilizante puede actuar como ligante para la cementación del suelo.

El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varíen dentro de los rangos adecuados. Con esto se logran tres objetivos importantes: adecuada estabilidad ante las cargas, durabilidad de la capa de rodadura y una variación volumétrica mínima.

Las tres formas de lograrlo son las siguientes:

2.2.1. Estabilización física

Este se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

Mezclas de suelos este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que lo hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

2.2.2. Estabilización química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

2.2.3. Estabilización mecánica

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

Compactación: este mejoramiento generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas Pacheco, M. (2017) Carreteras III.

2.3. Suelo

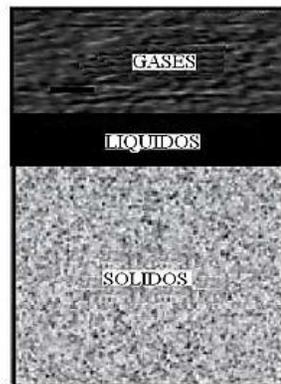
En el sentido general de la ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con líquido y gas que ocupen los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales por eso es importante estudiar y entender las propiedades del suelo, tales como su origen, distribución granulométrica, capacidad de carga y otras más.

Los materiales a utilizar son agregados pétreos que 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 (DAS, 1985).

2.3.1. Composición de los suelos

Se considera el suelo como un sistema multifase formado por:

Figura 2.1. Composición del suelo



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das.)

- Fase sólida, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo.
- Fase líquida (generalmente agua).
- Fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.

2.3.2. Clasificación de suelos

Un sistema de clasificación es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen características y propiedades similares, con el propósito de facilitar al ingeniero un método para estimar las propiedades o aptitudes del mismo.

Los agregados pueden ser clasificados, sean estos naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas y arenas limos y arcillas. Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomados de la ribera de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales. Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. La roca se tritura para volver angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das).

Tabla 2.1. Clasificación por el Tamaño de las Partículas

Nombre de la organización	Tamaño del gramo en (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto tecnológico de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de transporte y carreteras estatales (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema unificado de clasificación de suelos (Cuerpo de ingenieros del ejército de E.U., oficina de reclamación de E.U., sociedad Americana para pruebas y materiales)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (es decir, limos y arcillas <0,075)	

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M Das)

2.3.3. Materiales pétreos utilizados en el diseño

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 (ASOPAC, 2004).

Gravas

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca que varían en su tamaño entre 2 mm y 76,2 mm 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 rellenados conocidas como canteras.

Arenas

Están formadas por granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 0,075 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.

Limos y arcillas

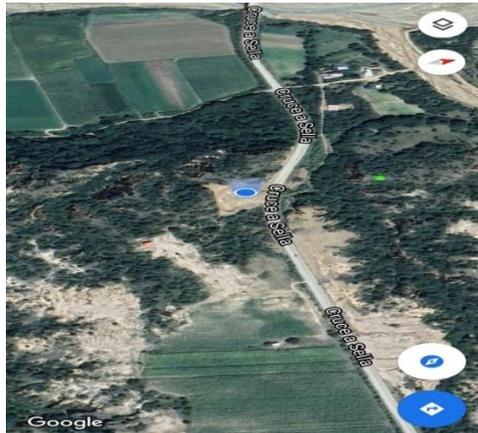
Los limos son granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas (hojuelas) que son fragmentos de minerales micáceos.

Las arcillas son partículas sub microscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos, por ejemplo los silicatos de aluminio en sus diferentes unidades básicas.

Para el presente proyecto se obtuvo el material de una plata de áridos del banco del Cruce de Sella ubicado en la provincia Méndez de la ciudad de Tarija la cual provee de material a la institución SEDECA.

Del cual después de los ensayos a los que fueron sometidos se observaron que sus propiedades cumplen con las especificaciones técnicas para la estabilización con emulsión asfáltica.

Figura 2.2. Ubicación de la planta de agregados pétreos



Fuente: Google earth

Figura 2.3. Banco de agregados pétreos



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.4. Banco de agregados pétreos



Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Propiedades de los agregados pétreos

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 (ASOPAC, 2004).

- Gradación y tamaño máximo de partícula
- Limpieza
- Dureza
- Forma de la partícula
- Textura de la superficie
- Capacidad de absorción
- Afinidad con el cemento asfáltico

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.

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.

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.

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.

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.

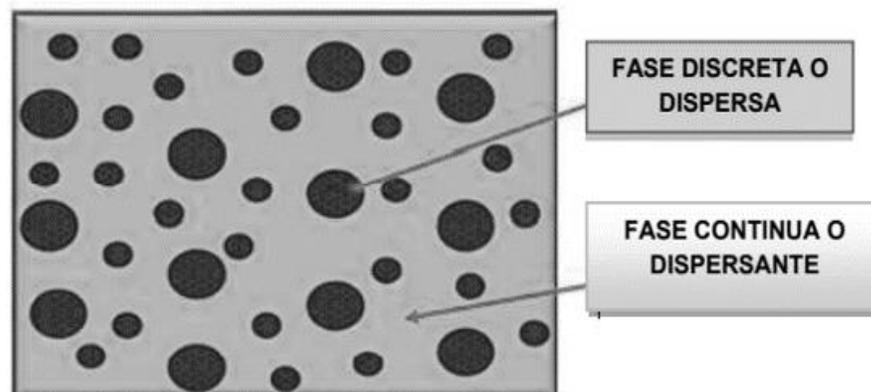
Capacidad de absorción: La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información, pues un agregado poroso requiere mayores cantidades de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Afinidad con el cemento asfáltico: Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

2.4. Emulsión asfáltica

Se define una emulsión como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la (Figura 2.5.), en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión (Rodríguez Talavera y otros 2001).

Figura 2.5. Diagrama esquemático de una emulsión



Fuente: Rodríguez Talavera 2001

Generalmente el tamaño de la fase discreta tiene alguna dimensión lineal entre 1 nanómetro y 1 micra. Son estos tamaños tan pequeños los que dan a las emulsiones sus importantes e interesantes propiedades. La ciencia que trata con las emulsiones es

multidisciplinaria, ya que involucra física, química, biología, etc. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

La emulsión utilizada como agente estabilizador para este proyecto es emulsión catiónica de rotura lenta (CSS1) tiene un componente de asfalto residual de 60%, que significa que el 60% de volumen de la emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% del volumen que es agua.

Para tal efecto se adquirió la emulsión cuyo proveedor en Bolivia tiene sus oficinas en la ciudad de Santa Cruz (QUIMITEC Asfaltos S.A.), el cual cumple con las especificaciones técnicas como material para estabilización de suelos para capas base.

2.4.1 Historia de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones del tipo asfáltico aparecieron en el mercado a principios del siglo XX en diferentes lugares y con usos muy diversos. A principios de 1900 (en 1905) se empleó por primera vez una emulsión asfáltica en la construcción de carreteras en la ciudad de Nueva York; la emulsión utilizada es del tipo aniónica y se empleó en lugar de los usuales caminos fabricados con material pétreo, como una alternativa para evitar el polvo cuando transitaban los vehículos.

En 1914 el estado de Indiana en Los Estados Unidos, comenzó a realizar trabajos de reparación de caminos empleando estas emulsiones aniónicas. En ese mismo año, en Hamburgo, Alemania, se construyó una carpeta asfáltica con un tratamiento superficial de varias capas, empleando una emulsión estabilizada la cual reacciona activamente con la arcilla del substrato pétreo.

Las emulsiones del tipo aniónicas se comenzaron a emplear en Europa en 1925. En la fabricación de estas se aprovecharon los ácidos nafténicos contenidos en el asfalto para que actuaran como el agente emulsificante en el momento de agregar agua con sosa cáustica al sistema y someterlo a una vigorosa agitación.

Las emulsiones asfálticas se comenzaron a utilizar en México de 1930 a 1935 para la construcción de caminos. El gran inconveniente que tuvieron fue el largo tiempo de rompimiento de la emulsión, que en la época de lluvias causaba muchos retrasos y graves

problemas de construcción. Por este motivo, los asfaltos rebajados ganaron la preferencia del constructor.

Las emulsiones asfálticas del tipo catiónicas aparecieron en Europa en 1953 y en Estados Unidos hasta 1958. Aparentemente, su aplicación inicial en la construcción de caminos coincidió con la aparición de nuevos productos químicos tenso-activos en el mercado, los cuales tienen, adicionalmente, otros usos como en el campo de las pinturas, en la industria petrolera, en la industria textil, etc.

Al principio, tales emulsiones se usaron únicamente en la construcción de tratamientos superficiales, como riego de liga y de sello. Al reconocerse la ventaja de las emulsiones catiónicas sobre las aniónicas y los rebajados, se inició la búsqueda de un emulsificante que produjera una emulsión de rompimiento lento, capaz de mezclarse con una granulometría para base o para carpeta.

Las emulsiones catiónicas se conocieron en México en el año de 1960. En ese año se hicieron varias pruebas y los ingenieros mexicanos presentaron en el Congreso Panamericano de Carreteras en Bogotá, Colombia, un trabajo titulado: “Primeras investigaciones realizadas en México con emulsiones asfálticas catiónicas”.

En 1973, los países árabes, poseedores de la mayoría del petróleo mundial, aumentaron el valor del barril de petróleo crudo resultando afectados los derivados del mismo, entre ellos los solventes empleados en los asfaltos rebajados; esto provocó un incremento en el uso mundial de las emulsiones asfálticas.

Actualmente los países con mayor producción de emulsiones asfálticas son, en orden de importancia: Estados Unidos, Francia, España y Japón. Entre estos cuatro países se fabrica un 40% aproximadamente de la producción mundial de emulsión asfáltica, que se estima actualmente próxima a los dieciséis millones de toneladas, de la que más del 85% es del tipo catiónico (Rodríguez Talavera, 2001).

2.5. Componentes de las emulsiones asfálticas

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 cemento asfáltico y solución jabonosa que a su vez está compuesta por (agua y agente emulsificante).

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.

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. Como el caso de lavarse las manos llenas de grasa con un jabón. Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas.

El objetivo es lograr una 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 al entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o al ser distribuida sobre la superficie a trabajar. La rotura es la separación del agua del asfalto, al curar el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la impermeabilidad propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado (Rodríguez Talavera, 2001).

2.5.1. Asfalto

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

El asfalto 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. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales.

Este es el elemento básico de la emulsión y, en la mayoría de los casos, constituye entre un 50 y un 75% de la emulsión. La química del asfalto es una materia compleja, y no es necesario para el caso, examinar todas sus propiedades. Algunas de las propiedades sí afectan significativamente la emulsión final, sin embargo, no hay una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad con que él puede ser emulsionado. Si bien la dureza de la base del cemento asfáltico puede variar, la mayoría de las emulsiones es hecha con asfalto (Gonzales Escobar et. al, 2007).

2.5.2. Agua

El agua es de mucha importancia y puede contener minerales u otros elementos que afectan la producción de emulsiones asfálticas estables, estas impurezas pueden presentarse en solución o en suspensión coloidal. Preocupa principalmente la presencia de iones de calcio y magnesio, que favorecen a la formación de una emulsión catiónica estable, sin embargo, pueden ser perjudiciales para las emulsiones aniónicas.

El uso de aguas impuras puede resultar en un desequilibrio en los componentes de la emulsión, lo que puede afectar de forma adversa la performance o causar la rotura prematura. Por este motivo, se debe de hacer un control estricto de la calidad del agua para un determinado tipo de emulsión a fabricar.

La calidad del agua utilizada en la estabilización con emulsión asfáltica es importante para garantizar el correcto desempeño de la emulsión. Se debe verificar los niveles de pH del agua, y más aún la compatibilidad del agua con la emulsión. Se deben seguir para este tipo de materiales las mismas especificaciones para la calidad del agua que tiene el concreto y otros materiales para caminos (Wirtgen GmbH, 2012).

2.5.3. Los emulsificantes

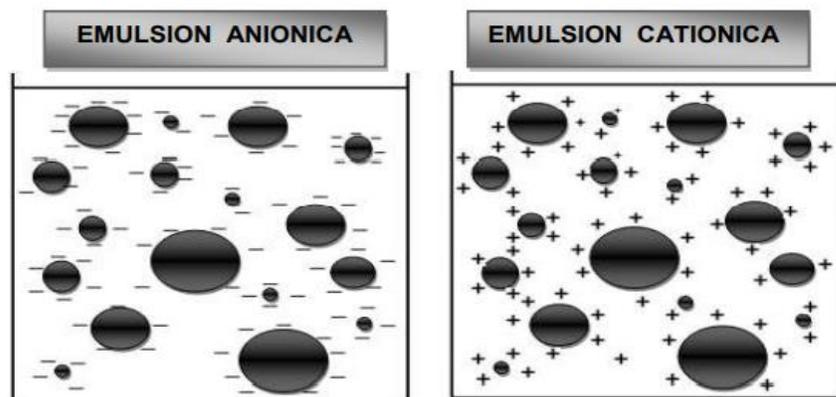
Este componente representa una cantidad muy pequeña en la emulsión pero tiene gran influencia porque depende de este producto químico conocido como “Surfactante” que determina si la emulsión se clasifica como aniónica, catiónica o no iónica. El emulsificante mantiene en suspensión a las partículas del asfalto y controla la rotura oportuna. El surfactante controla la tensión superficial entre el área de contacto entre las partículas de asfalto y el agua. Existen gran variedad de agentes emulsificantes su selección se la realiza basada en la compatibilidad con el cemento asfáltico utilizado.

En las primeras emulsiones asfálticas se utilizó como agente emulsificante materiales como sangre de buey, arcillas y jabones, el incremento de la necesidad de emulsiones generó la investigación de materiales nuevos más eficientes, en la actualidad son sustancias químicas vendidas comercialmente.

La mayoría de emulsificantes catiónicos (cargados positivamente) están compuestos por aminas, grasas, que se las convierte en jabón con la incorporación de ácidos como el ácido clorhídrico. Otro agente emulsificante catiónico se forma con sales cuaternarias de amonio, disueltas en agua sin necesidad de agregar ácidos. Los fabricantes de emulsiones tienen sus propios procedimientos para incorporar los agentes a la emulsión, una forma de agregar es combinar el agente con el agua antes de mezclar con el asfalto en el molino coloidal, otros pueden combinar el agente con asfalto.

2.6. Clasificación de las emulsiones asfálticas

Figura 2.6. Representación de una emulsión aniónica y catiónica



Fuente: Instituto Mexicano del transporte

2.6.1 Emulsiones aniónicas

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa (ver figura 2.6).

2.6.2. Emulsiones catiónicas

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva (ver figura 2.6.) (Rodríguez Talavera y otros, 2001).

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, estas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

2.7. Tipos de emulsión

2.7.1. Emulsiones de rotura rápida (RS) y (QS)

Las emulsiones RS se utilizan principalmente en tratamiento de superficies. Estas emulsiones interactúan rápidamente con el agregado, y revierten la emulsión a asfalto. Este tipo de emulsiones produce películas resistentes y algunos grados (RS-2 y CRS-2) tienen altas viscosidades, para prevenir el escurrimiento, y que una vez formada la capa, esta no se desprende con facilidad. Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones de rociado, tales como en bacheos, sellos arenosos y tratamientos superficiales (Mercado, R, Bracho, C, Avendaño, J, 2008, Emulsiones Asfálticas, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela).

Las emulsiones de rotura rápida QS han sido desarrolladas para lechadas asfálticas (slurry seals). Las emulsiones catiónicas CQS (CRRQS) son ampliamente utilizadas por su versatilidad con un vasto rango de agregados y por sus características de rápida rotura (ASPHALT INSTITUTE, ASPHALT EMULSION MANUFACTURERS ASSOCIATION, Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, USA).

2.7.2 Emulsiones de rotura media (MS)

Son diseñadas para ser mezcladas con agregados, ya sea en frío o en caliente, y también para el tratamiento de superficies. Estas emulsiones no se rompen inmediatamente al contacto con el agregado, y por esta razón, algunas pueden ser elaboradas en una planta y la mezcla resultante, transportada al lugar de la pavimentación.

Las emulsiones MS han sido usadas con éxito en mezclas de emulsiones de grado abierto, en reciclado de pavimentos y en mezclas en frío en plantas centrales (Mercado, R, Bracho, C, Avendaño, J, 2008, Emulsiones Asfálticas, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela).

2.7.3. Emulsiones de rotura lenta (SS)

Son diseñadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura buen cubrimiento con grados densos, de agregados con un alto

contenido de finos. Su aplicación se extiende, además de la pavimentación, a otros usos industriales. Para tales propósitos, la viscosidad de las emulsiones es baja y puede ser reducida aún más con la adición de agua. Otras aplicaciones de estas emulsiones incluyen bases de grado denso y bases para estabilización (Mercado, R, Bracho, C, Avendaño, J, 2008, Emulsiones Asfálticas, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela).

Tabla 2.2. Clasificación de las emulsiones

Clasificación	Contenido de asfalto % en masa	Tipo de rompimiento	Polaridad
EAR-55	55	Rápido	Anionica
EAR-60	60	Rápido	Anionica
EAM-60	60	Medio	Anionica
EAM-65	65	Medio	Anionica
EAL-55	55	Lento	Anionica
EAL-60	60	Lento	Anionica
EAI-60	60	Para impregnación	Anionica
ECR-60	60	Rápido	Catiónica
ECR-65	65	Rápido	Catiónica
ECR-70	70	Rápido	Catiónica
ECM-65	65	Medio	Catiónica
ECL-65	65	Lento	Catiónica
ECI-60	60	Para impregnación	Catiónica
ECS60	60	Sobre estabilizada	Catiónica

Fuente: Manual Serie – 19. Instituto del Asfalto.

2.8. Rompimiento y curado de las emulsiones asfálticas

2.8.1. Rompimiento

Cuando se usan emulsiones asfálticas, es necesario tener control sobre la estabilidad de la emulsión, o sea, se tiene que poder controlar el rompimiento de la misma. Pasado un tiempo determinado, el cual depende de la situación en particular que se esté trabajando, las emulsiones tienen que desestabilizarse para que el asfalto se deposite como una capa sobre el material pétreo.

Este fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene el material pétreo (Gonzales Escobar y otros, 2007).

Dicha carga neutraliza la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran tamaño; estos agregados son los que se depositan sobre el material pétreo formando una capa asfáltica.

Durante este proceso el agua es eliminada del sistema asfalto-pétreo. En el proceso de desestabilización, la emulsión como va perdiendo agua, pasa por una emulsión inversa en donde el asfalto forma la fase continua y el agua la fase discreta, es decir, se forman pequeñas gotas de agua en el interior del asfalto, las cuales posteriormente son eliminadas cuando es depositada la capa de asfalto.

En el tipo de emulsión aniónica, los factores que influyen en la ruptura son la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo.

La ruptura de la emulsión de tipo catiónica se produce por la absorción de la parte polar del emulgente por los agregados, provocando la ruptura de la emulsión y haciendo que las partículas del asfalto se adhieran inmediatamente a las partículas del material pétreo, aun en presencia de humedad.

La forma de rompimiento de estas últimas en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa del agregado pétreo; adicionalmente permite proseguir los trabajos de asfaltado en regiones con climas húmedos o durante una temporada de lluvias, garantizando la apertura de caminos al tránsito en un corto período de tiempo.

En la figura 2.7, podemos observar el proceso de ruptura de una emulsión en tres pasos: primero se observa la emulsión, enseguida cuando se inicia el rompimiento y después cuando se produce la ruptura completa y queda el material pétreo cubierto por el asfalto (Gonzales Escobar y otros, 2007).

Figura 2.7. Ruptura de una emulsión asfáltica sobre un material pétreo



Fuente: Gonzales Escobar 2007

2.8.2. Curado

Durante el curado se da el desplazamiento del agua que incrementa la rigidez y la resistencia a la tensión de la mezcla. Este factor determina el tiempo necesario para que la mezcla tenga suficiente cohesión entre partículas y la rigidez para soportar las cargas de tránsito.

Dentro de los factores que pueden afectar el tiempo de rompimiento y el curado de la mezcla están: porcentaje de absorción del agregado, contenido de humedad del agregado durante el mezclado, contenido de humedad para mezclado y compactación, granulometría, cantidad, tipo y grado de emulsión, energía compactación, composición mineral del agregado, intensidad de la carga eléctrica del agregado, presencia de relleno mineral activo, y temperatura del agregado y el aire (Wirtgen GmbH, 2012).

2.9. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas

Tabla 2.3. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas (CSS1)

Ensayos	Método (ASTM)	Unidad	Especificación
Viscosidad de Saybolt Furol a 25°C	(D-244)	SSF	0-90
Sedimentación, máx.	(D-6930)	% en peso	5
Tamizado (0,84 mm), máx.	(D-6933)	% en peso	0,1
Resistencia al Agua (cobertura), mín.	-	%	-
Adhesividad en agregado seco, mín.	-	%	80
Adhesividad en agregado húmedo, mín.	-	%	-
Carga de la partícula	(D-244)	-	positiva
Demulsibilidad, mín.	(D-6936)	% en peso	-
destilación			
Solvente destilado	(D-6997)	% en volumen	-
Residuo seco, máx.	(D-6997)	% en masa	65
Ensayo de residuo Asfáltico			
Penetración a 25°C (100 gr e 5s)	(D-5)	0,1 mm	40-150
Contenido de Asfalto , mín.	(D-2042)	% en peso	97
Ductilidad a 25°C, mín.	(D-113)	cm	-
Viscosidad Brookfliend a 135 °C, SP 21, 20 RPM, mín.	-	Cp	
Punto de Ablandamiento	-	C	
Recuperación Elástica a 25 °C, 20 cm, mín.	-	%	

Fuente: Documento Técnico No. 23 “Emulsiones Asfálticas”. Sanfandila, Qro, 2001. Secretaría de comunicaciones y Transporte. (SCT). Instituto mexicano del Transporte.

2.10. 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). (Rodríguez Talavera y otros, 2001).

- 1.** Es un ligante asfáltico que no es contaminante ni es peligroso, ya que contiene del 35% al 40% de agua como solvente.
- 2.** Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.
- 3.** 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.
- 4.** 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.
- 5.** Se aplica en un lapso muy corto de tiempo, lo que permite la pronta funcionalidad de la obra en que se esté usando.
- 6.** Presenta un bajo costo de la fase dispersante, que es el agua.
- 7.** Se emplean materiales pétreos locales, lo que elimina la transportación de este tipo de materiales por grandes distancias.
- 8.** El equipo de aplicación es mucho más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente.
- 9.** Por su aplicación en frío, ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases tóxicos a la atmósfera.
- 10.** El empleo del agua como solvente no crea problema de su desperdicio, ya que es recuperable.

2.11. Usos y aplicaciones de las emulsiones asfálticas

Tabla 2.4. Usos de las emulsiones asfálticas

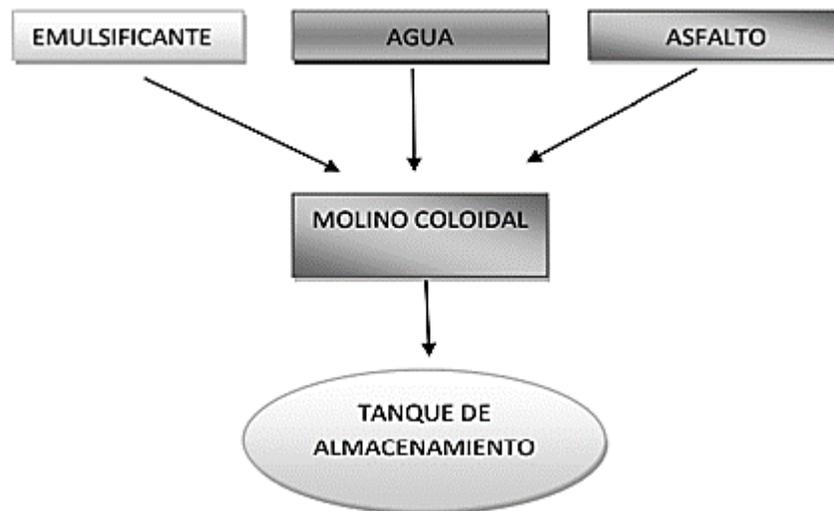
tratamiento de superficie	Reciclado de asfalto	Otras aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Riego • Pulverizado • Sellado con arena • Lechadas • Micro aglomerado • Cape seal 	<ul style="list-style-type: none"> • Frío in-situ • Full depth • Caliente in-situ • En planta central 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización(suelo y base) • Riegos de liga • Bacheo de mantenimiento • Paliativos de polvo • Riegos de imprimación • Sellado de fisuras • Recubrimiento de protección

Fuente: Asphalt institute; AEMA. 2001

2.12. Elaboración de emulsión

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 Figura 2.8. (Rodríguez Talavera y otros, 2001).

Figura 2.8. Elaboración de emulsión

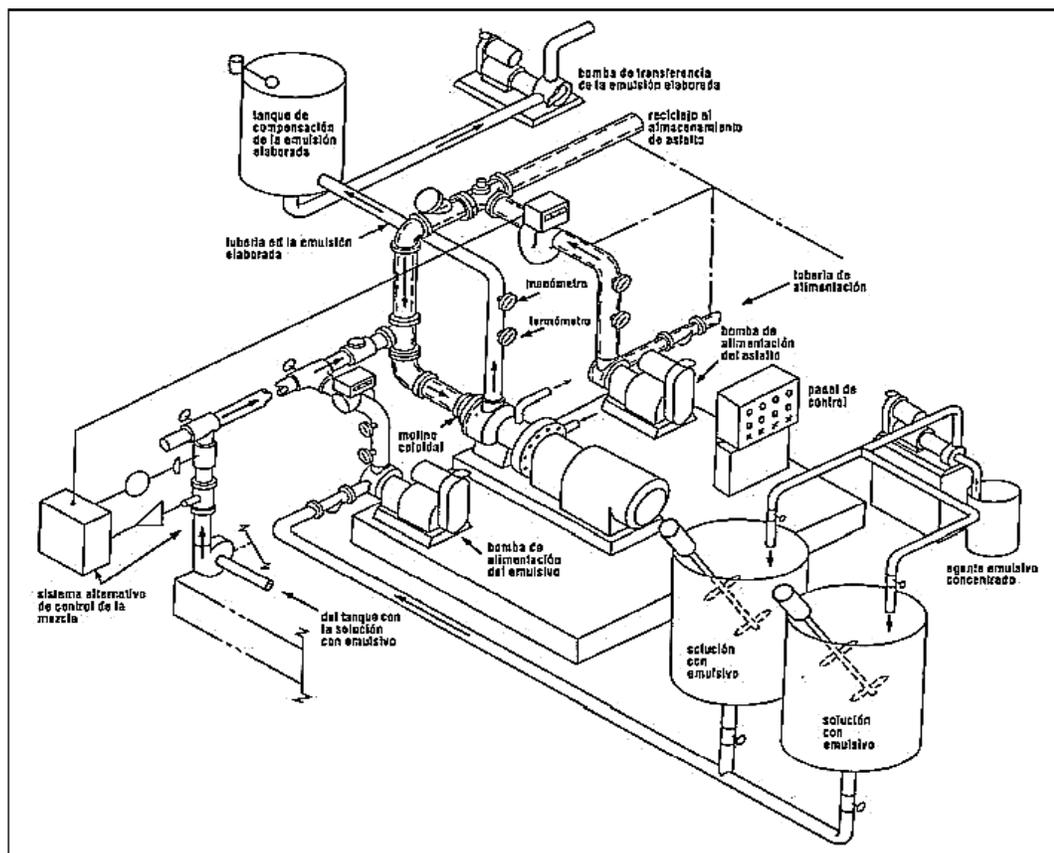


Fuente: Documento técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del transporte. Sanfandila, Qro, 2001.

2.12.1. Equipo básico para la elaboración de la Emulsión

El equipo básico para preparar emulsiones incluye un dispositivo mecánico de alta velocidad, de altas tensiones de corte (Usualmente un molino coloidal) para dividir el asfalto en pequeñas gotitas. Un diagrama de una típica planta de elaboración de emulsiones asfálticas se muestra en la (figura 2.9) También se necesita un tanque para la solución del emulsivo y un tanque para el asfalto caliente, bombas, y medidores de caudal. El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz o 1000-6000 RPM) con gálipos de paso en el orden de 0,25 mm a 0,50 mm Típicamente, las gotitas de las emulsiones asfálticas tienen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano esto es alrededor de 0,001mm a 0,010 mm Comúnmente se emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de la emulsión. El tamaño de las gotas de asfalto depende la energía mecánica unitaria aplicada por el molino coloidal (Rodríguez Talavera y otros, 2001).

Figura 2.9. Diagrama de una planta de elaboración de emulsión asfáltica.



Fuente: Rodríguez Talavera 2001

2.12.2. Proceso de emulsificación

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñas gotitas. Al mismo tiempo, se ingresa en el molino coloidal el agua conteniendo el agente emulsivo. El asfalto que ingresa en el molino coloidal se calienta para alcanzar una baja viscosidad; la temperatura del agua se ajusta para optimizar el proceso de emulsificación.

Estas temperaturas varían, dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y de la compatibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo.

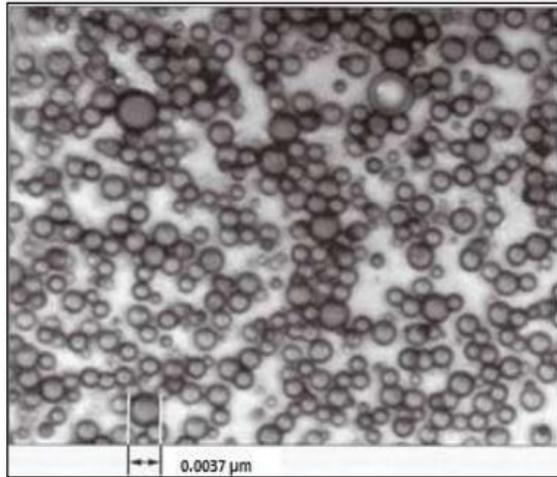
Debido a que la temperatura de la emulsión al abandonar el molino debe ser inferior al punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas extremadamente altas, al menos que se emplee un enfriador. Luego, la emulsión es usualmente bombeada a tanques de almacenamiento a granel. Estos tanques pueden estar equipados con agitadores mecánicos para mantener la uniformidad de la emulsión.

El método de incorporación del emulsivo al agua varía de acuerdo con el procedimiento empleado por el fabricante. Para ser solubles en agua, algunos emulsivos, como las aminas, deben mezclarse y reaccionar con el ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. La mezcla de emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente al agua caliente que contiene ácidos o álcali, y es agitado hasta su completa disolución.

Las proporciones de asfalto y de solución emulsificante deben medirse con exactitud. Esto se hace normalmente con medidores de caudal; pero también pueden controlarse las proporciones verificando la temperatura de cada fase y la descarga del molino. Si se usa el método de regulación de temperatura, a partir de los componentes se calcula la temperatura deseada de salida de la emulsión ya elaborada; así se controla el porcentaje de contenido de asfalto.

El tamaño de las partículas de asfalto es un factor vital en la elaboración de una emulsión estable. Una fotografía a nivel microscópico de una típica emulsión (ver figura 2.10.) pone en evidencia estos promedios de tamaños de partículas (Gonzales Escobar y otros, 2007).

Figura 2.10. Tamaños y distribución de las partículas de en una emulsión



Fuente: Gonzales Escobar 2007

Menor de 0,0001 mm (1 μm).....	28%
0,001 – 0,005 mm (1 – 5 μm).....	57%
0,005 – 0,010 mm (5 – 10 μm).....	15%

Estas gotitas de asfalto de tamaño microscópico se dispersan en el agua en presencia del emulsivo tensión-activo (surfactante). El surfactante produce un cambio en la tensión superficial en el área de contacto entre las gotitas de asfalto y el agua, permitiendo así que el asfalto permanezca en suspensión. Las partículas de asfalto, todas con similares cargas eléctricas, se repelen entre sí, lo que ayuda a mantenerlas suspendidas.

2.13. Métodos de diseño de mezclas asfálticas en frío

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos de 38 mm (1,5”), y

está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con gradación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 mm (2 ½”) de alto y 102 mm (4”) de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son: la densidad - análisis de vacíos, la prueba de estabilidad - flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos. Este método de diseño está basado en la investigación desarrollada en la universidad de Illinois usando un Método Marshall modificado de diseño de mezcla y un ensayo de Durabilidad húmeda (Garnica Anguas y otros 2004).

Los criterios de ensayos recomendados, son aplicables para mezclas de agregados para base granular de bajos volúmenes de tráfico, conteniendo emulsión asfáltica y agregados minerales de gradación densa. Este método de diseño es recomendado para mezclas en camino o elaboradas en planta, preparadas a temperatura ambiente.

La caracterización del material sin estabilizar comprende inicialmente, la determinación de la curva granulométrica y el índice de plasticidad (I.P.). Esto para evaluar si el material es apto para este tratamiento. Las granulometrías recomendadas para este tipo de estabilización se muestran en la Tabla 2.6. Para tratamientos con emulsión asfáltica no se recomienda un I.P. mayor a 10. No obstante, en estos casos es posible pre-tratar con cal hidratada para reducir el I.P., antes de la estabilización con emulsión asfáltica.

El procedimiento del método de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

- Caracterización de agregados
- Caracterización de emulsión asfáltica
- Contenido de agua para la mezcla y compactación
- Variación del contenido de asfalto
- Selección del contenido óptimo de asfalto

Tabla 2.5. Criterios de Diseño de Mezclas Asfálticas Método Marshall

Método de diseño	Valores límite	
	Mínimo	Máximo
MARSHALL (AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14)		
1. Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen		
1.1 Con emulsión asfáltica	50	75
1.2 Con asfaltos líquidos		
2. Estabilidad de acuerdo al uso de la mezcla	75	75
2.1. Para bacheo	500 libras	
2.2. Para pavimentación	750 libras	
3. Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulgada)	8	16
4. Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada	3	18
5. Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 Resistencia retenida		
5.1. Con emulsión asfáltica	50(%)	
5.2. Con asfaltos líquidos	75(%)	

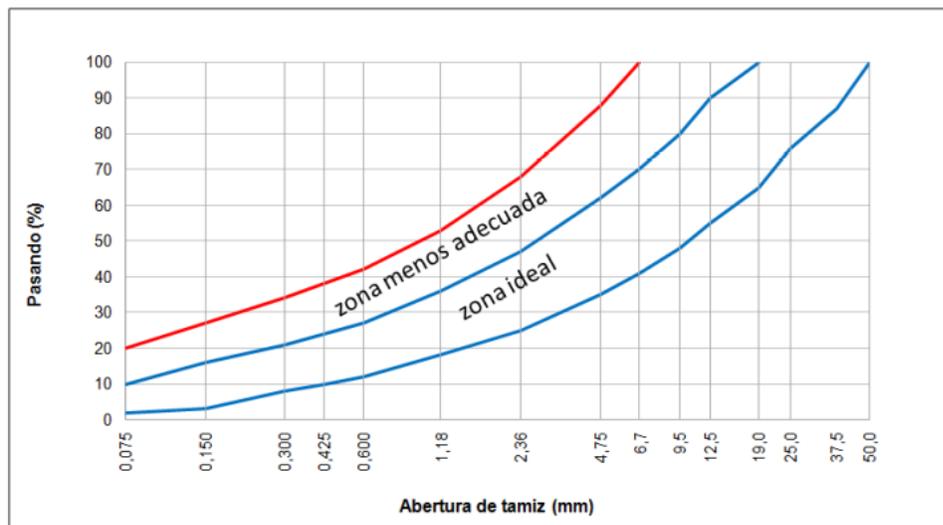
Fuente: Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. Dirección general de caminos, ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda. República de Guatemala.

2.13.1. Caracterización de agregados

2.13.1.1. Granulometría

La metodología Marshall utiliza una gráfica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas (Garnica Anguas y otros 2004).

Figura 2.11. Bandas granulométricas



Fuente: Asphalt Academy, 2009

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior) comúnmente llamado uso granulométrico. Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

Tabla 2.6. Especificaciones para granulometría

Tamices (mm)	Tamices	% Mínimo	% Máximo
50	2"	100	100
37,50	1 1/2"	87	100
25,00	1"	77	100
19,00	3/4"	66	99
12,50	1/2"	57	87
9,50	3/8"	48	74
4,75	Nº4	25	55
2,00	Nº10	8	21
0,425	Nº40	3	16
0,075	Nº200	2	9

Fuente: Asphalt Academy, 2009

2.13.1.2. Límites de atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de éstos es debido al científico sueco Albert Maurita Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

2.13.1.2.1. Límite líquido (ASTM D-4318, AASHTO T-89)

Es el contenido de agua, expresado en porcentaje a los 25 golpes del aparato de casa grande respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado.

Equipo a utilizar

- Balanza electrónica de precisión 0,01 gr
- Horno a temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Recipientes pequeños enumerados
- Taras pequeña
- Copa de Casagrande
- Ranurador
- Muestra tamizada por la malla N°40
- Espátula

2.13.1.2.2. Límite plástico (ASTM D-4318, AASHTO T-90)

El límite plástico de un suelo es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad en el punto de transición entre los estados plásticos y semisólidos.

Equipo a utilizar

- Balanza electrónica de precisión 0,01 gr
- Horno a temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Recipientes pequeños enumerados
- 3 Taras pequeña
- Muestra tamizada por la malla N°40
- Base de vidrio

2.13.1.3. Ensayo de compactación (Proctor modificado AASHTO T-180)

El ensayo de compactación o Proctor se define como la determinación de la humedad óptima y su máxima densidad seca del material compactado.

Los suelos y mezclas de suelo-agregado usados como relleno en obras de ingeniería se compactan a cierto nivel, con el fin de lograr un comportamiento satisfactorio en términos

de su resistencia al corte, su compresibilidad o su permeabilidad. Así mismo, los suelos de fundación se compactan a menudo para mejorar sus propiedades de ingeniería. Los ensayos de compactación en el laboratorio suministran la base para determinar el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para que el suelo alcance el comportamiento requerido.

Equipo a utilizar

- Molde de 2124 cm³
- Collarín movable
- Base metálica con mecanismo de ajuste
- Martillo de 5 lb y altura de caída de 12"
- Enrasador metálico
- 5 bandejas con capacidad de 6,5 kg
- Probeta graduada de 1000 cm³
- Horno de temperatura 105-110°C
- Balanza de 0,1 y 0,01 gr de precisión
- Poruñas y otras menores

2.13.1.4. Ensayo de CBR (ASTM D-1883, AASHTO-193)

El C.B.R. (California Bearing Ratio), es una medida relativa de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de humedad y densidad controladas de tal manera que establecemos una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y capacidad de soporte o carga unitaria de los suelos principalmente utilizados como sub-rasantes, sub-bases y bases del pavimento de carreteras y aeropistas.

Equipo a utilizar

Equipo de compactación

- Molde cilíndrico de diámetro inferior a 6" y altura de 7" a 8"
- Collarín de 2" de altura
- Base perforadora
- Disco espaciador de acero de 2,5" de altura
- Pistón o martillo de 10 lb y altura de caída de 18"

Equipo para el hinchamiento

- Plato y vástago con altura regulable
- Trípode y extensómetro
- Pesas anulares o en forma de herradura de 5 lb

Prueba de penetración

- Pistón cilíndrico de 3" cuadradas de sección
- Aparato para aplicar la carga
- Anillo dinamométrico con extensómetro calibrado
- Equipo misceláneo; balanzas, horno, tamices, papel filtro, etc.

2.13.1.5. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D-2419)

El equivalente de arena está definido como el porcentaje de arena propiamente tan con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculantes, partículas arcillosas. Este método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena.

Establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4,75 mm (Nº 4).

Equipo a utilizar

- Probeta graduada

De 30 ± 1 mm de diámetro interior y aproximadamente 400 mm de alto, graduado en milímetros hasta una altura de 380 mm (o graduada en mililitros hasta una capacidad de 270 ml) y provisto de un tapón hermético de caucho.

- Pisón

Compuesto por los siguientes elementos: Una varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 450 mm de largo, con hilo en ambos extremos. Un pie de bronce troncocónico, de 25 mm de diámetro basal y 20 mm de altura, con una perforación central con hilo para conectarlo a la varilla. Un par de guías que mantengan centrada la varilla en el eje de la probeta. Una sobrecarga cilíndrica de acero laminado en frío de 50 mm de diámetro y 53 mm de altura, con una perforación central con hilo para conectarla a la varilla. Esta sobrecarga debe ser

rectificada de modo que el conjunto de varilla, pie, guías y sobrecarga tenga una masa de $1\text{kg} \pm 5\text{gr}$.

- Sifón
- Recipiente de medida de 85 ± 5 ml de capacidad
- Tamiz
- Recipiente para preparar el reactivo
- Agitados mecánico
- Herramientas y accesorios (botellas para reactivo, regla de enrase)
- Solución de ensayo

2.13.1.6. Peso específico del agregado grueso (ASTM D-127, AASHTO T-85)

Este ensayo tiene como objeto la determinación del peso específico aparente y el peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por medio de 24 horas a temperatura ambiente.

Equipo a utilizar

- Balanza
- Horno
- Canastillo metálica hecha de la malla N° 4
- Estanque (debe permitir contener con holgura el canastillo porta muestra)
- Recipientes

2.13.1.7. Peso específico del agregado fino (ASTM D-128, AASHTO T-84)

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

Equipo a utilizar

- Balanza
- Horno
- Recipientes

- Matraz de 500 ml de capacidad
- Molde cónico
- Pisón

2.13.1.8. Desgaste de los Ángeles (ASTM C-131, AASHTO T-96)

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia al desgaste de agregados debido a que estos deben de resistir la producción, colocación y compactación y sobre todo los esfuerzos ejercidos durante la vida de servicio.

El ensayo consiste en tomar una muestra de agregado grueso e introducirla en la Máquina de los Ángeles, junto con las cargas abrasivas, que depende de los porcentajes retenidos en cada malla. Se hace rotar a 500 revoluciones durante 15 minutos. Finalizado la rotación, el material debe ser tamizado por la malla N°12, se lava y se pesa, calculando de esta manera el porcentaje de desgaste.

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los ángeles.

Equipo a utilizar

- Balanza
- Juego de tamices 1, 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N°4
- Horno
- Esferas de acero (carga abrasiva)
- Máquina de los ángeles

2.13.2. Caracterización de emulsión asfáltica (CSS1)

2.13.2.1 Ensayo de residuo por destilación (ASTM D-6997, NBR-14376)

Esta prueba tiene por objeto determinar las proporciones de agua y residuo asfáltico que contiene la emulsión.

Este método de prueba se utiliza en procedimientos para una determinación rápida de porcentaje de residuos en emulsiones asfálticas compuestas principalmente de una base asfáltica semisólida o líquida, agua y un agente emulsionante.

Equipo a utilizar

- Destilador

De aleación de aluminio. De aproximadamente 241 mm de altura por 95 mm de diámetro interno, con tapa y abrazadera.

- Empaque

Una variedad de materiales de empaque puede usarse para sellar el destilador, siendo capaces de resistir la temperatura máxima que se alcanza durante la destilación.

Fuentes de calor. Tienen orificios en la periferia interna y tres separadores, para asegurar el centrado del quemador alrededor del destilador.

- Equipo de conexión

Consta de un tubo de conexión de vidrio o metal de aproximadamente 12 mm, una camisa de estaño, y un tubo condensador de vidrio enfriado por agua con una chaqueta metálica o de vidrio de boro silicato, el tubo metálico de conexión puede fijarse a la tapa por medio de un accesorio roscado de compresión. El tubo de conexión de vidrio puede sujetarse a la tapa por medio de un corcho o tapón de silicona. Pueden usarse otros condensadores de vidrio o de metal de 12 mm aproximadamente, siempre que la longitud mojada sea de 400 a 550 mm Probeta graduada: De 100 ml, con intervalos de graduación de 1,0 ml.

- Termómetro ASTM 7C

Según lo que se indica en la especificación ASTM E1 (Especificación ASTM para termómetros de líquido en vidrio), o cualquier otro dispositivo termométrico de igual precisión.

- Balanza

Capaz de pesar 3500 gr con una precisión de $\pm 0,1$ gr.

- Tapones

Usar tapones de corcho (envuelto en papel de aluminio) o silicona para mantener el dispositivo de medición de temperatura en posición, sellar los orificios y asegurar el tubo de conexión a la cubierta del destilador.

- Tubería de caucho

Tubería resistente al calor y de un tamaño adecuado para asegurar la junta vidrio – vidrio en la conexión del tubo y el condensador.

- Tamiz

De 300 micras, para capturar materiales extraños cuando se sospeche su existencia.

2.13.2.2. Ensayo de sedimentación (ASTM D-244, AASHTO T59-97)

La finalidad del ensayo de sedimentación es detectar la tendencia de las partículas de asfalto a perder la estabilidad, esto se produce en el tiempo del almacenamiento de la emulsión. Esto le proporciona al consumidor un elemento de protección contra separaciones del asfalto y el agua en las emulsiones asfálticas inestables, durante cierto tiempo de almacenamiento.

Equipo a utilizar

- Dos cilindros de vidrio de 500 ml con base ajustada o moldeada, tapones de corcho o vidrio u otro medio adecuado que los selle herméticamente y que tengan un diámetro externo de 50 ± 5 mm y graduación de 5 ml.
- Pipeta de vidrio; un sifón y pipeta de 60 ml de forma opcional.
- Balanza como se especifica en el numeral 8 del Método A0304.
- Horno como se especifica en el numeral 9 del Método A0304.

2.13.2.3. Ensayo de ductilidad (ASTM D-113, AASHTO T51-00)

El objetivo de este ensayo es determinar la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida. El ensayo consiste en someter al residuo asfáltico a un ensayo de tracción, luego de que ha sido llevado en un baño de agua a la temperatura de prueba. Finalmente, se estira a una velocidad normalizada hasta que la muestra se rompa. La distancia a la cual se rompe la muestra se le llama ductilidad.

Equipo a utilizar

- Moldes

El Molde debe ser hecho de bronce, los extremos b y b' son conocidos como sujetadores, y las partes a y a' como lados del molde.

- Placa

Para el llenado de los moldes, se dispondrá de una placa de bronce plana, provista de un tornillo lateral de sujeción.

- Baño de agua

Un baño de agua que pueda mantener la temperatura de ensayo con una variación máxima de 0,1° C. Su volumen no será inferior a 10 litros y estará equipado con una placa perforada para la colocación de los especímenes, situada a una distancia mínima de 50 mm del fondo y 100 mm de la superficie.

- Ductilímetro

El aparato se denomina ductilímetro y en esencia, consta de un tanque de agua en el que se sumergen los especímenes, provisto de un mecanismo de arrastre que no produzca vibraciones, capaz de separar a la velocidad especificada un extremo de la probeta del otro, que permanece fijo. La tolerancia máxima admitida en la velocidad especificada será del 5%.

2.13.2.4. Ensayo de viscosidad S.F. (ASTM D-244, AASHTO T59- 97)

Este método determina empíricamente la resistencia al escurrimiento de asfaltos líquidos y otros productos derivados de petróleo, mediante un aparato que recibe el nombre de viscosímetro saybolt.

El ensayo consiste en verter la muestra en el tubo del viscosímetro y después se deja caer al matraz. Se toma el tiempo en llegar al aforo y se registra como segundos Saybolt Furol (ssf).

Equipo a utilizar

- Viscosímetro saybolt
- Baño
- Termómetro para el viscosímetro
- Embudo con filtro
- Matraz recibidor
- Cronómetro

2.13.2.5. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D-36, NBR-6560)

En este ensayo se determinará el punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 200 °C, utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30 a 80 °C).

El ensayo consiste en calentar a una velocidad controlada dos discos horizontales de material bituminoso, que soportan cada uno de ellos una bola de acero. Cuando los discos se ablanden lo suficiente, dejarán caer las bolas de acero cubiertas con el material bituminoso desde una distancia de 1". El promedio de las dos temperaturas registradas se le llama punto de ablandamiento.

Equipo a utilizar

- Anillos de bronce
- Bolas de acero
- Guías de contacto de las bolas
- Recipiente de vidrio
- Soporte de anillos y montaje completo
- Termómetros

2.13.2.6. Ensayo de peso específico del asfalto residual (ASTM D244-09)

Se entiende como peso específico de un material la relación de su peso a una temperatura determinada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura generalmente a los 25 grados centígrados.

El peso específico de los asfaltos sólidos se determina por inmersión directa en agua mientras que la de los semisólidos, líquidos y emulsificados se los determina por medio del picnómetro y desplazamiento.

La gravedad específica además de indicar sobre la calidad y origen del material bituminoso sirve para determinar las equivalencias de los pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación y para algunos cálculos importantes en el diseño de mezclas bituminosas.

Equipo a utilizar

- Picnómetros
- Baño de agua
- Termómetro Balanza
- Agua destilada

2.13.2.7. Ensayo de penetración (ASTM D-5, NBR-6576)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

Equipo a utilizar

- Penetrómetro

Cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm El peso del vástago será de $47,5 \pm 0,05$ gr El peso total de la aguja y el vástago será de $50,0 \pm 0,05$ gr Para cargas totales de 100 gr y 200 gr, dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo, se estipulan pesas de $50,0 \pm 0,05$ gr y $100,0 \pm 0,05$ gr. La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

- Aguja de penetración

La aguja es de acero inoxidable templado y duro, grado 440-C o equivalente, HRC 54 a 60; debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1,00 y 1,02 mm. Será simétricamente afilada en forma cónica, con un ángulo entre 8,7 y 9, 7° con respecto al largo total del cono, el que debe ser coaxial con el cuerpo recto de la aguja. La variación total axial de la intersección del cono y la superficie recta no debe exceder de 0,2 mm. La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0,14 y 0,16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja con una tolerancia de 2°.

La aguja debe montarse en un casquete de metal no corrosivo, que tenga un diámetro de $3,2 \pm 0,05$ mm y una longitud de 38 ± 1 mm. La longitud expuesta de la aguja estándar debe estar comprendida entre 40 y 45 mm.

La aguja debe estar rígidamente montada en el casquete. La carrera (lectura del indicador de penetración total) de la punta de la aguja y cualquier porción de la aguja relativa al eje del casquete, no deberá exceder de 1 mm.

- Cápsulas
- Baño de agua
- Termómetro
- Cronómetro

2.13.3. Preparación de especímenes de ensayo

Para todos los ensayos del diseño en laboratorio se requiere eliminar los sobre tamaños que se retienen en la malla 19 mm (3/4"). Sin embargo, debe sustituirse ese porcentaje con material pasando 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2"), para compensar el tamaño eliminado. Asimismo, se divide el material en las siguientes fracciones (Wirtgen GmbH, 2012):

Pasando la malla 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2").

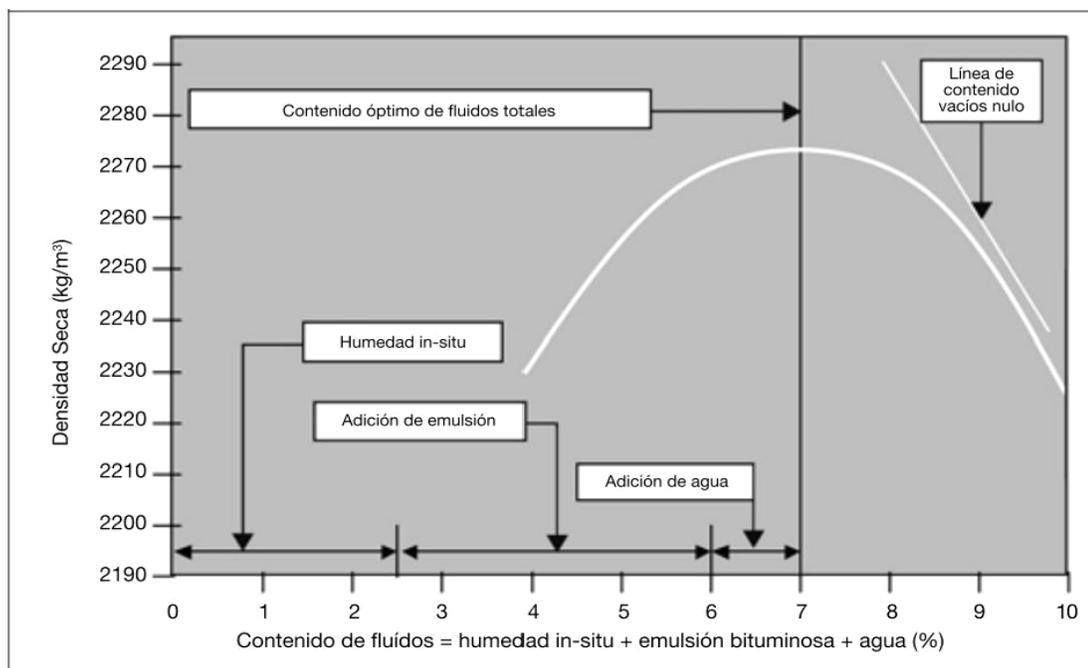
Pasando la malla 12,5 mm (1/2") y retenido en la malla 4,75 mm (N° 4).

Pasando la malla 4,75 mm (N° 4).

2.13.4. Contenido total de fluidos

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el “Contenido Total de Fluidos” es utilizado con base en el Contenido Óptimo de Humedad, definido de la relación humedad/densidad. La densidad máxima se alcanza con el contenido óptimo de humedad, el cual es el resultado de la combinación del agua en el material granular, el agua contenida en la emulsión asfáltica, más el agua adicionada. Tanto los componentes del agua como del asfalto de una emulsión actúan como un lubricante para ayudar a la compactación. (Figura 2.12.)

Figura 2.12. Contenido de fluidos totales



Fuente: Wirtgen group

Inicialmente se debe determinar el contenido de humedad que posee el material granular a estabilizar. La cantidad de agua que se adiciona será igual al contenido óptimo de humedad obtenido del ensayo de la relación humedad-densidad (Proctor) menos el porcentaje de agua en la emulsión y el porcentaje de humedad en el material.

Por ejemplo:

Porcentaje óptimo de humedad (Proctor)=	5,0%
Porcentaje de humedad en agregado =	-1,0%
Porcentaje de agua en la emulsión, con respecto al contenido de emulsión	
<u>Total de la mezcla=</u>	<u>-2,0%</u>
Porcentaje de agua a adicionar=	2,0%

Nota: No se está considerando el porcentaje del asfalto residual (asfalto dentro de la emulsión con respecto al contenido de emulsión total en la mezcla)

2.13.5. Mezclado y compactación de especímenes de ensayo

Mezclar el material granular con el agua respectiva hasta que quede homogéneo, luego se mezcla lentamente por 30 segundos con la mitad de la emulsión, dejando reposar la mezcla por 15 segundos, nuevamente se mezcla la otra mitad de la emulsión para completar la totalidad de fluidos por 30 segundos vigorosamente, finalmente se compacta el espécimen en el mazo Marshall.

Elaborar al menos 6 especímenes, por medio de compactación Marshall (AASHTO T 245) a 75 golpes por cara, para cada % de asfalto residual sobre peso de agregado seco (2,0, 2,5, 3,0, 3,5).

Pesar material suficiente para alcanzar una altura de compactación de $(63,5 \pm 1,5)$ mm, (usualmente 1200 gr).

El material mezclado con emulsión se prepara preferiblemente en mezcladoras tipo "pugmill", o batidoras de laboratorio. El uso de estos equipos va orientado al tipo de mezclado que pueda tener el material en el campo.

La densidad que se logre con la compactación es de vital importancia para el desempeño final de la mezcla. El método de compactación que se emplee en el laboratorio debe reproducir la densidad que se obtendrá en el campo, así como la orientación de las partículas después de la compactación. En ciertos países como Sudáfrica se ha venido utilizando compactación con martillo vibratorio, ya que éste representa de mejor forma las características anteriores. En Estados Unidos, generalmente se utiliza compactación giratoria Superpave, donde se compactan especímenes de 150 mm de diámetro a 30 giros,

una presión de 600 kpa y un ángulo de 1,25° (Pennsylvania Department of Transportation, 2012). Por otro lado, la compactación Marshall es la más común en los laboratorios y es más fácil su implementación; dónde se compactan especímenes de 100 mm de diámetro con 75 golpes por cara. No obstante, la compactación Marshall es la que es menos representativa del proceso de compactación en sitio.

En otras investigaciones se sugiere compactar al 100% de la densidad máxima obtenida con el Próctor modificado (Wirtgen GmbH, 2012).

2.13.6. Curado de especímenes de ensayo

El curado es el proceso donde las capas mezcladas y compactadas eliminan el agua por medio de evaporación, neutralización de la carga del asfalto en la emulsión, y la disipación de presión de poro inducida por la compactación.

Después de compactar el espécimen, quitar el collarín y el plato base, y sin remover el espécimen del molde, dejar en el molde por aproximadamente 24 horas a temperatura ambiente.

Posterior a las 24 horas se debe remover cuidadosamente los especímenes de los moldes

Con cuidado se colocan los especímenes en una bandeja plana y lisa y cure por 72 horas a 40 °C en horno (Moloto, 2010).

2.13.6. Evaporación del agua

El agua comienza a evaporarse durante las primeras fases del curado, cuando la superficie de la mezcla compactada está expuesta e interactúa con el medio ambiente (Moloto, 2010).

El curado es el proceso donde las capas mezcladas y compactadas eliminan el agua por medio de evaporación, neutralización de la carga del asfalto en la emulsión, y la disipación de presión de poro inducida por la compactación (Moloto, 2010).

2.13.7. Análisis de densidad y vacíos

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad, es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua.

La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pe^3), se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m^3 o $62,416 \text{ lb/pe}^3$). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto, las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

Los porcentajes de vacíos están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que éstos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico.

2.13.8. Determinación estabilidad y fluencia Marshall

Estabilidad y flujo Marshall según la norma AASHTO T-245 Este ensayo está dirigido a medir la resistencia a la deformación del suelo ya estabilizado con la emulsión asfáltica, se realiza principalmente por conocer el comportamiento de la emulsión en sí cuando el suelo ya está estabilizado. La fluencia mide la deformación bajo carga que ocurre en la emulsión asfáltica.

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

2.14. Daño por humedad

El daño provocado por la humedad o el agua es un fenómeno complicado de deterioro en los pavimentos asfálticos y su principal manifestación se conoce como stripping o pérdida de recubrimiento.

Esta parte tiene como objetivo conocer el efecto del agua y el fenómeno de stripping en las mezclas asfálticas, los deterioros asociados al daño por humedad, los mecanismos que

lo producen e indagar en algunos métodos de ensayos relacionados para evaluar dicho daño.

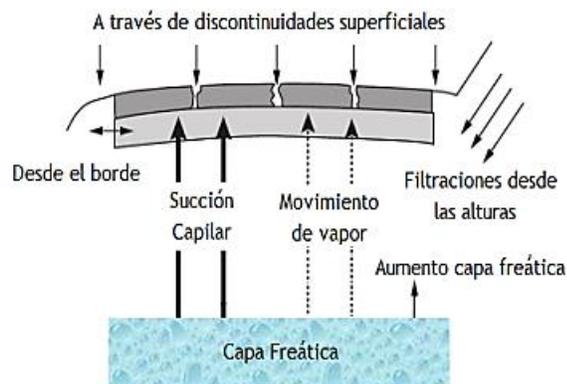
2.14.1. Fuentes de humedad

La presencia de agua en un pavimento de asfalto es inevitable. En la Figura 2.13. se observa que diversas fuentes pueden conducir a la presencia de agua en el interior de las capas de la estructura que componen los pavimentos.

La precipitación atmosférica en forma de lluvia, granizo, niebla o rocío es la fuente más común, debido a que el agua entra directamente al interior de los suelos a través de superficies discontinuas, como grietas y los vacíos de aire interconectados. Además, el agua también puede hacer ingreso por los bordes y las juntas entre capas asfálticas adyacentes formadas durante la construcción, siendo esta una vía de fácil acceso.

Alternativamente, el agua puede ingresar en la estructura de pavimento debido a la ascensión capilar de agua proveniente de la superficie inferior del pavimento, causado por un aumento en el nivel freático.

Figura 2.13. Fuentes de humedad en un pavimento asfáltico



Fuente: <https://www.slideshare.net/mobile/castilloaroni/modulo-5-consideracionessobre-drenaje-en-los-pavimentos-fernando-snchez-sabogal>

2.14.2. Principales deterioros asociados al daño por humedad

Existen deterioros asociados de manera directa con el daño por humedad en los pavimentos asfálticos, los cuales son el raveling y el stripping.

El raveling es la desintegración progresiva de la superficie del pavimento asfáltico causado por la pérdida de ligante y/o el desprendimiento de los áridos. Los pequeños movimientos de áridos a causa del tráfico o movimiento del agua, desarrollan suficientes esfuerzos de tracción y tensiones que exceden la resistencia de rotura que posee el ligante asfáltico. Un raveling en un nivel leve a moderado se tiene la pérdida del árido fino y mientras que en un nivel severo incluye la pérdida de árido grueso. Este fenómeno se produce por, la humedad o derrame de solventes (aceites o combustibles) que inducen la separación de la película de ligante asfáltico de la superficie del árido.

2.14.3. La oxidación del ligante asfáltico

La pobre o mala compactación durante la construcción e insuficiente contenido de ligante en la mezcla. El raveling causado por el tráfico se produce generalmente durante el clima frío o húmedo, cuando la rigidez del ligante asfáltico es alta. También puede ser causado por la acción abrasiva de los neumáticos, especialmente en las intersecciones y zonas de estacionamientos.

El stripping, de acuerdo a la literatura contiene varias definiciones. El instituto del asfalto lo define como, la ruptura de la unión adhesiva entre la superficie del árido y el ligante asfáltico. Tradicionalmente, la mayoría de los investigadores han asociado la acción del agua en la definición de este fenómeno muy recurrente en los pavimentos asfálticos.

En definitiva, el agua o humedad tiende a acelerar estos tipo de deterioros mencionados, ya que a través de las micro fisuras o micro poros generados en la película de ligante a causa de un envejecimiento de este, se permite el ingreso de agua en la interfaz áridoligante, produciendo el despegue de ambos constituyentes y finalmente el desprendimiento de los áridos en la mezcla.

CAPÍTULO III

Diseño de mezclas para materiales estabilizados con emulsión asfáltica

CAPÍTULO III

DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

3.1. Diseño de mezclas asfálticas en frío (CSS1)

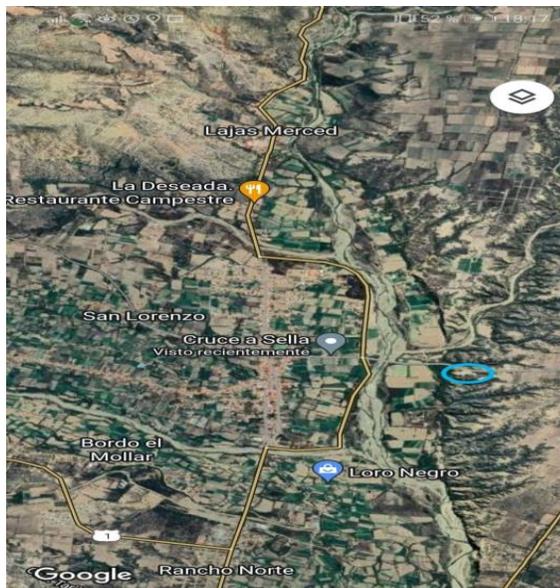
En el presente capítulo se muestran las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla en estudio propuesta, estas se le harán a las muestras de material pétreo obtenidas en banco de material, se presenta el procedimiento para la caracterización de la Emulsión, aclarando que estos ensayos fueron realizados bajo la respectiva norma que los ampara.

El procedimiento del método de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

- Caracterización de agregados
- Caracterización de la emulsión asfáltica
- Contenido de agua para la mezcla y compactación
- Variación del contenido de asfalto residual
- Selección del contenido óptimo de asfalto

3.2. Ubicación de suelo a ser estabilizado con emulsión asfáltica (CSS1)

Figura 3.1. Ubicación satelital de banco de áridos



Fuente: Elaboración propia

Para realizar la evaluación del suelo estabilizado con emulsión, se procede a tomar muestras de la cantera del Cruce de Sella ubicado en la provincia Méndez de la ciudad de Tarija. A continuación, un detalle de la ubicación satelital del punto evaluado.

3.3. Caracterización de suelo

3.3.1. Análisis granulométrico (ASTM D-422, AASHTOO T-88)

Procedimiento

Este ensayo tiene el objetivo de conocer la gradación del material, desde la grava y arena hasta el material fino. Se debe pesar una muestra de 5000 gr de material seco, a debe dejarse en un horno a una temperatura de 110 °C durante 24 hrs para seguidamente verter la muestra en una batería de tamices y colocarla en una tamizadora durante 5 minutos, esto para que cada grano pase por cada malla de cada tamiz y se quede en el retenido para que después se pueda clasificar.

Figura 3.2. Proceso de tamizado



Fuente: Elaboración propia

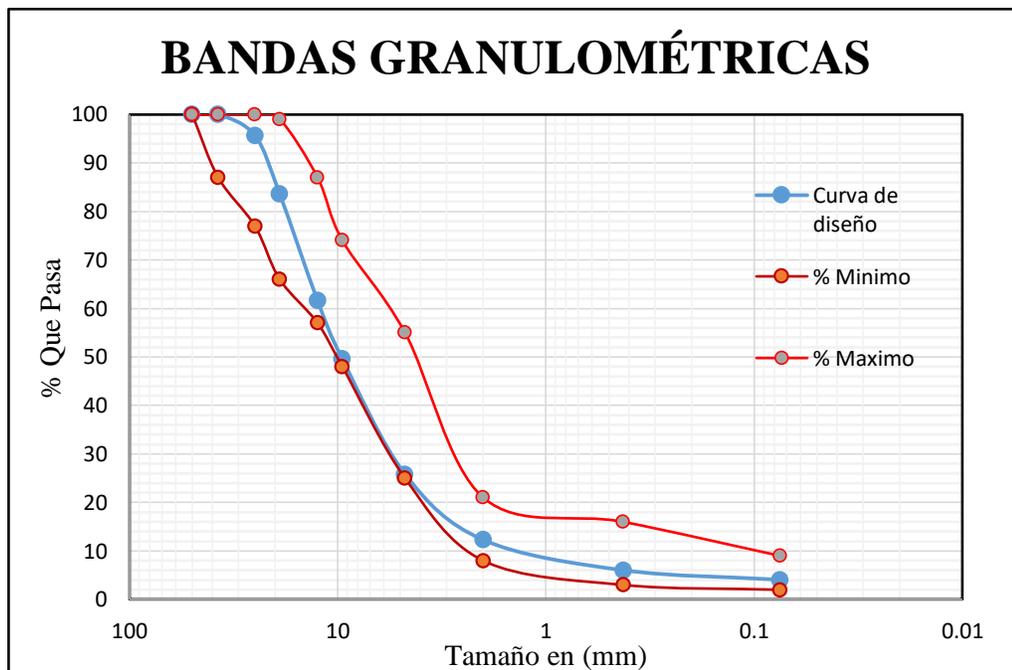
Muestra 1

Tabla 3.1. Especificaciones para la granulometría

Tamices (mm)	Tamices	% Mínimo	% Que pasa del total	% Máximo
50	2"	100	100,0	100
37,50	1 1/2"	87	100,0	100
25,00	1"	77	95,7	100
19,00	3/4"	66	83,6	99
12,50	1/2"	57	61,6	87
9,50	3/8"	48	49,6	74
4,75	N°4	25	25,8	55
2,00	N°10	8	12,3	21
0,425	N°40	3	6,0	16
0,075	N°200	2	4,1	9

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1. Bandas granulométricas



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS:	GW	Suelo gravoso con poca presencia de fino, bien graduado.
AASHTO:	A-2-4 (0)	

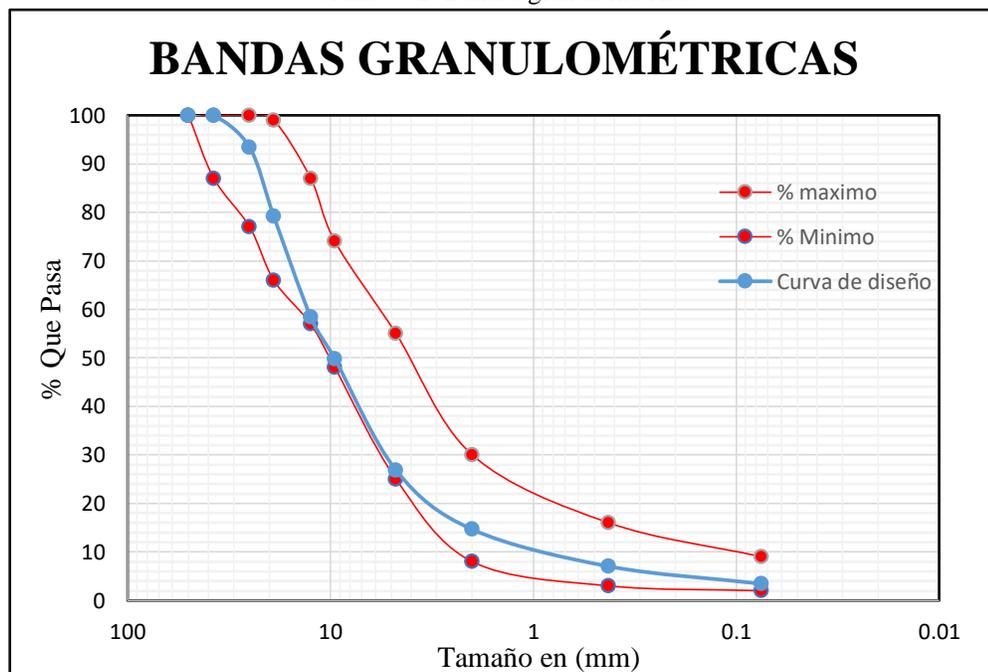
Muestra 2

Tabla 3.2. Especificaciones para la granulometría

Tamices (mm)	Tamices	% Mínimo	% Que pasa del total	% Máximo
50	2"	100	100,0	100
37,50	1 1/2"	87	100,0	100
25,00	1"	77	93,4	100
19,00	3/4"	66	79,2	99
12,50	1/2"	57	58,4	87
9,50	3/8"	48	49,8	74
4,75	Nº4	25	26,9	55
2,00	Nº10	8	14,6	21
0,425	Nº40	3	7,0	16
0,075	Nº200	2	3,4	9

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2. Bandas granulométricas



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS:	GW	Suelo gravoso con poca presencia de fino, bien graduado.
AASHTO:	A-1-a (0)	

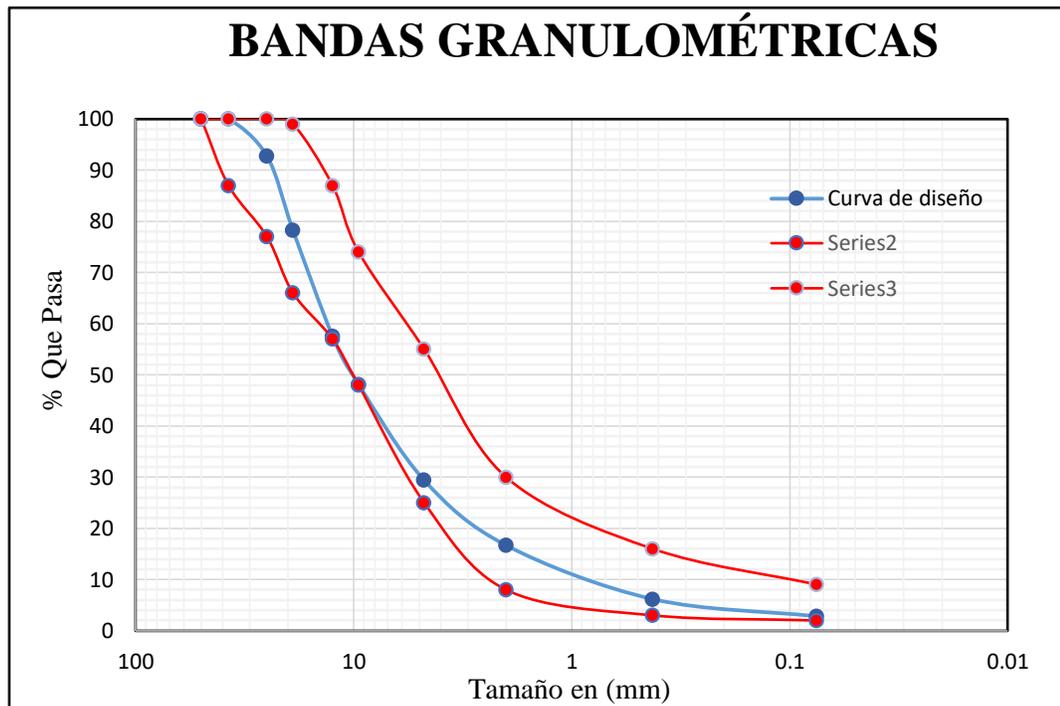
Muestra 3

Tabla 3.3. Especificaciones para la granulometría

Tamices (mm)	Tamices	% Mínimo	% Que pasa del total	% Máximo
50	2"	100	100,0	100
37,50	1 1/2"	87	100,0	100
25,00	1"	77	92,8	100
19,00	3/4"	66	78,3	99
12,50	1/2"	57	57,6	87
9,50	3/8"	48	48,1	74
4,75	N°4	25	29,4	55
2,00	N°10	8	16,7	21
0,425	N°40	3	6,2	16
0,075	N°200	2	2,8	9

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3. Bandas granulométricas



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS:	GW	Suelo gravoso con poca presencia de fino, bien graduado.
AASHTO:	A-1-a (0)	

3.3.2. Límites de atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de éstos es debido al científico sueco Albert Maurita Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

3.3.2.1. Límite líquido (ASTM D-4318, AASHTO T-89)

Es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado.

Procedimiento

Se tamiza una cantidad representativa que pase la malla N°40, de cada muestra a ensayar, en la tara pequeña se coloca una porción de material tamizado y se coloca agua hasta lograr una pasta homogénea. Con una espátula flexible, se coloca la pasta homogénea en la copa Casagrande y se enraza hasta que moldee una superficie ovalada en la copa Casagrande, se procede a trazar un canal sobre el centro de la copa Casagrande con el acanalador, hasta formar dos pequeños taludes y se retira los excesos de muestras con la espátula flexible se rota la manivela de la copa Casagrande hasta que logremos unir las 2 partes que trazamos con el acanalador y así se determinara la cantidad de golpes que se necesitara para unir las 2 mitades luego que se haya unido estas dos partes se procede a retirar con la espátula flexible la porción unida y se coloca en un recipiente pequeño numerado, se anota su peso total, se lleva el recipiente pequeño al horno a secar por 24 horas una temperatura de 100 a 105 °C.

Después de las 24 horas se registra el peso total seco de la manera antes mencionada se repite la misma operación para tres ensayos con la misma masa del material, agregándole agua suficiente para tener un estado de mayor fluidez, con el fin de obtener los números de golpes requeridos (10, 20, 30,40) para cerrar las dos mitades de la ranura del suelo.

Muestra 1

Figura 3.3. Aparato de casa grande para límite líquido



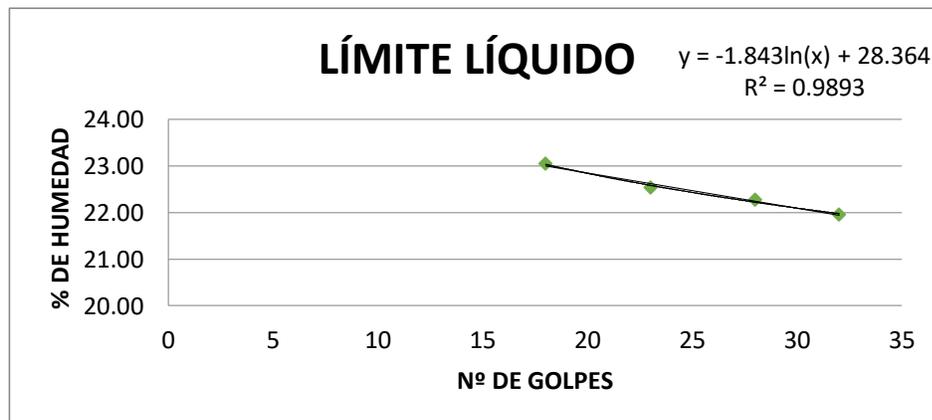
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	18	23	28	32
Suelo húmedo + cápsula	32,19	28,62	26,48	27,32
Suelo seco + cápsula	28,52	25,81	23,98	24,6
Peso del agua	3,67	2,81	2,5	2,72
Peso de la cápsula	12,6	13,34	12,76	12,21
Peso suelo seco	15,92	12,47	11,22	12,39
Porcentaje de humedad	23,05	22,53	22,28	21,95

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Contenido de humedad a 25 golpes



Fuente: Elaboración propia

Muestra 2

Figura 3.4. Suelo saturado para límite líquido



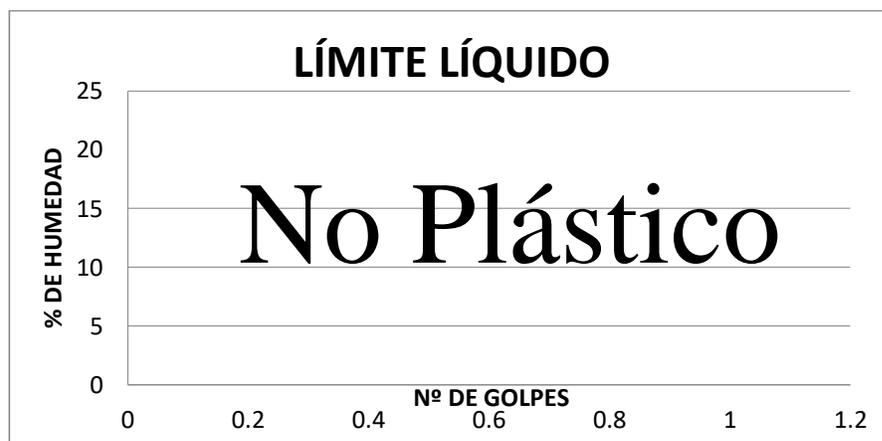
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes				
Suelo húmedo + cápsula				
Suelo seco + cápsula	No Plástico			
Peso del agua				
Peso de la cápsula				
Peso suelo seco				
Porcentaje de humedad				

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Contenido de humedad a 25 golpes



Fuente: Elaboración propia

Muestra 3

Figura 3.5. Suelo saturado para límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6. Límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes				
Suelo húmedo + cápsula				
Suelo seco + cápsula	No Plástico			
Peso del agua				
Peso de la cápsula				
Peso suelo seco				
Porcentaje de humedad				

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Contenido de humedad a 25 golpes



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Límite plástico (ASTM D-4318, AASHTO T-90)

Procedimiento

Con una masa homogénea y moldeable de la muestra se realiza rollitos de 3 mm de diámetro el moldeo o amasado de la muestra se la debe realizar hasta que en el rollito muestre unas pequeñas grietas o fisuras, esto significara el límite plástico del material. En un recipiente pequeño enumerado se colocará pequeñas porciones de la muestra, ya agrietada, y posteriormente se anota el peso total registrado en la balanza electrónica se coloca el recipiente con la muestra al horno por 24 horas, después de las 24 horas se registra el peso total seco los pasos antes mencionados se lo realizaran para 2 muestras más.

Muestra 1

Figura 3.7. Enrollado de suelo para límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Límite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + cápsula	16,92	17,38	16,49
Peso de suelo seco + cápsula	16,38	16,76	15,99
Peso de cápsula	12,72	12,62	12,59
Peso de suelo seco	3,66	4,14	3,40
Peso del agua	0,54	0,62	0,50
Contenido de humedad	14,75	14,98	14,71

Fuente:Elaboración propia

Muestra 2 y 3

Figura 3.8. Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Límite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + cápsula			
Peso de suelo seco + cápsula			
Peso de cápsula	No Plástico		
Peso de suelo seco			
Peso del agua			
Contenido de humedad			

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4. Índice de plasticidad (IP)

Es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico, es decir indica el rango dentro del cual se puede variar el contenido de humedad dentro de una condición plástica.

Tabla 3.9. Índice de plasticidad

Límites de atterberg	(%)	(%)
Límite líquido	22	
Límite plástico	15	
Índice de plasticidad	7	10 máx.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Ensayos de Compactación (Proctor modificado AASHTO T-180)

Procedimiento

Se procedió a tamizar la muestra por la malla $\frac{3}{4}$ ", para lo cual es necesario preparar 4 muestras de 5500 gr se coloca sobre el recipiente metálico la muestra, se la esparce y se mezcla para obtener una muestra homogénea, luego la dividimos en 4 porciones iguales, y se la colocó en el horno por 24 horas después de las 24 horas se prepara el molde cilíndrico y se asegura de tal manera que no se afloje al momento de realizar la compactación con el martillo, luego se tomó una de las pequeñas porciones divididas y las coloco en el molde y se realizó la compactación con 56 golpes por cada capa para las muestras se añadió agua en cantidades de 135, 270, 495, 660 ml.

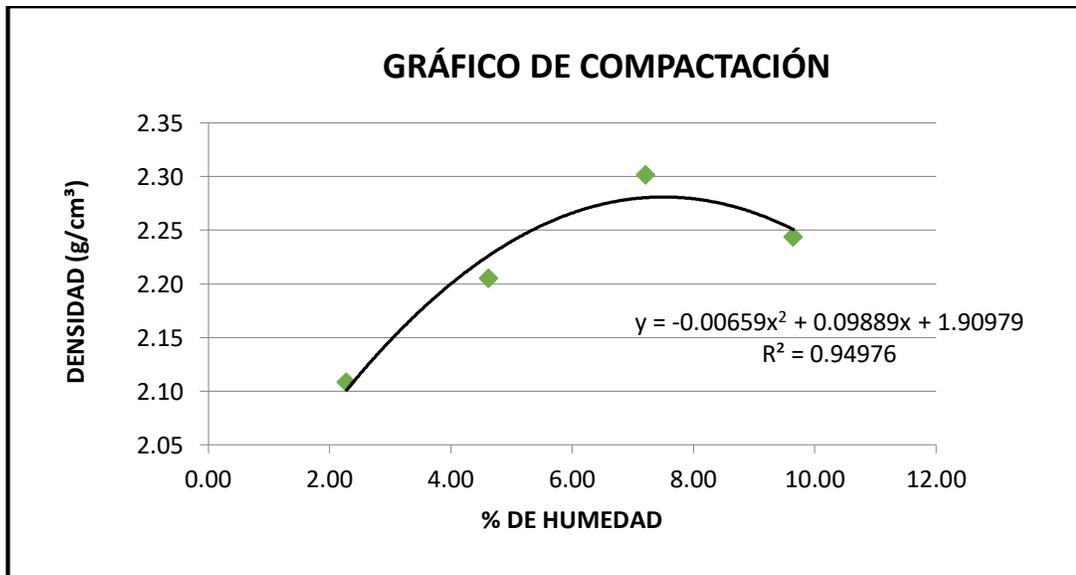
Una vez que culmine la compactación de las 5 capas, se retira el collarín superior y se enrasa con la ayuda de una regla metálica, se toma el peso de la muestra más molde en la balanza electrónica el material es retirado del molde y se retira una muestra en una capsula tomando su peso para posteriormente ser colocada en el horno por 24 horas para determinar la humedad de compactación registrando su peso.

Figura 3.9. Compactando muestra



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.7. Curva de compactación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10. Resultado de ensayo de compactación

Densidad máxima	2,28	gr/cm ³
Humedad óptima	7,5	%

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Ensayo de CBR (ASTM D-1883, AASHTO-193)

El C.B.R. (California Bearing Ratio), es una medida relativa de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de humedad y densidad controladas de tal manera que establecemos una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y capacidad de soporte o carga unitaria de los suelos principalmente utilizados como sub-rasantes, sub-bases y bases del pavimento de carreteras y aeropistas.

Procedimiento Compactación y Sumersión.

Como en el ensayo proctor (modificado), primero se tamizará por la malla $\frac{3}{4}$ " y se preparan 4 muestras de material con 5500 gr para el ensayo, se prepara la muestra en el recipiente metálico y se le añade la cantidad de agua según la humedad óptima del Proctor modificado se mezcla bien hasta obtener el material en condición de humedad óptima conseguida con el Proctor y se divide en 4 muestras iguales se prepara los moldes cilíndricos con el collarín, espaciador y papel filtro en la parte superior del espaciadors se llena en el molde en cinco capas y compactamos según los números de golpes a emplearse para este ensayo (12, 25, 56) respectivamente. Una vez compactado se retira el collarín y se enraza con la regla metálica, se voltea y se quita el disco espaciador y luego se registra su peso se coloca nuevamente el collarín, las pesas, para luego sumergirlas en la piscina luego se toma la lectura inicial con la que fue sumergida, y cada 24 horas se tomarán lecturas por 4 días consecutivos.

Procedimiento: resistencia a la penetración

Luego que pasaron los 4 días de inmersión del espécimen, se retira de la piscina y se quita el agua sobrante inclinado los cilindros y se espera que drene toda el agua acumulada en los moldes, para luego dejar 15 minutos al ambiente se pesa nuevamente (sin collarín) y se registra su peso saturado. Se colocan nuevamente las pesas sobre el espécimen para simular las sobrecargas del pavimento se coloca el molde con la muestra en la prensa hidráulica y se ajusta bien hasta que se asiente perfectamente antes de aplicarle la sobrecarga del pistón se ajusta el dial de carga y se encera el extensómetro digital que mide la deformación se inicia la penetración, y se toman las lecturas que estén entre: 5 a 0,25" y se anota en la hoja de apuntes luego tomadas las lecturas se suelta la carga aplicada y se retira el molde de la prensa hidráulica antes de terminar el ensayo, en un recipiente

pequeño se escoge una pequeña muestra de la parte superior e inferior del molde, se anota su peso y se coloca al horno por 24 horas. Registramos el peso seco de las muestras extraídas (superior e inferior) y anotamos.

Figura 3.10. Realización del ensayo CBR e inmersión de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Lectura con extensómetro y ensayo de penetración



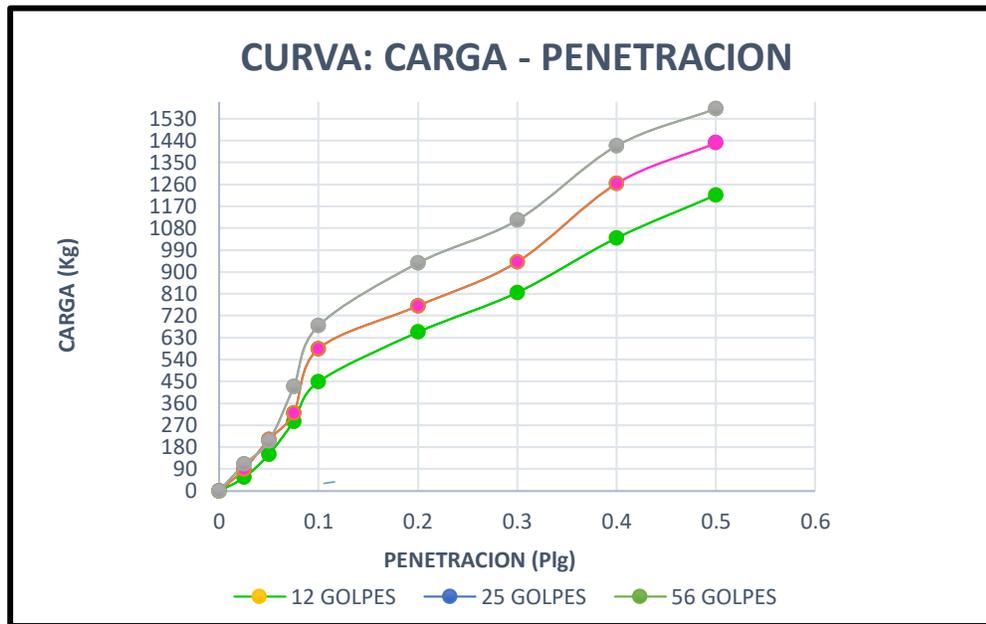
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12. Ensayo de penetración y eextracción de muestra



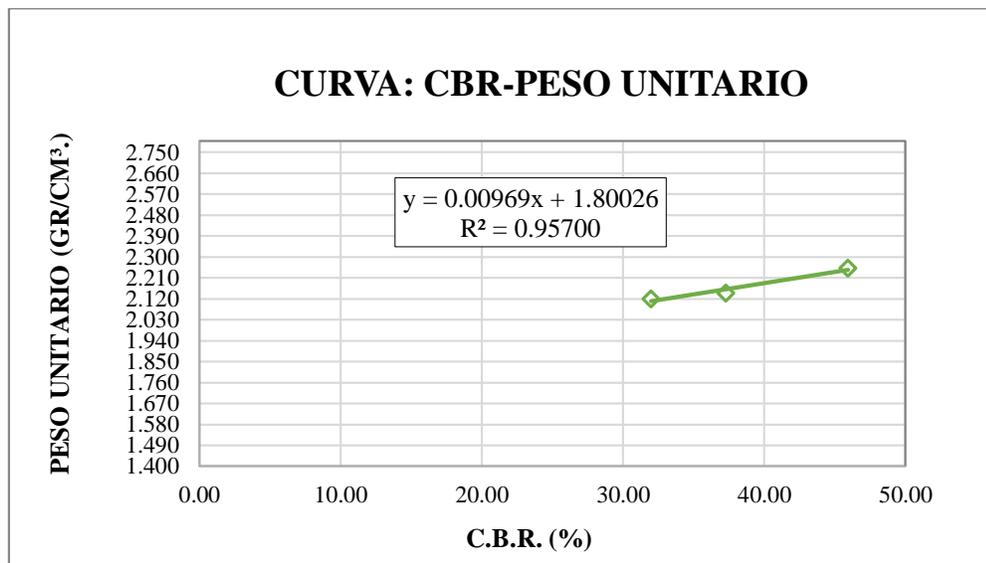
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.8. Curva de penetración



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.9. Peso unitario vs CBR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Resultado del ensayo de CBR

CBR 95% D. Máx.	CBR 95%
37,74	25-80

. Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D-2419)

Procedimiento

Se derrama la solución de trabajo de cloruro de calcio (CaCl_2) en la probeta plástica graduada con la ayuda del sifón, desde una altura de $101,6 \pm 2,54$ cm sobre la mesa de trabajo con un embudo se vierte la muestra del material el tamiz de 4,75mm (tamiz N°4), previamente secado al horno y medido en el recipiente cilíndrico metálico, en la probeta de plástico transparente graduada y posteriormente se deja reposar durante 10 minutos (periodo de humedecimiento) pasado los 10 minutos se tapa la probeta con el tapón de caucho, después se deja soltar el material del fondo invirtiendo parcialmente la probeta se agita en forma horizontal a 90 ciclos en un tiempo aproximado de 30 segundos, con la finalidad de que las partículas del material se dispersen uniformemente en toda la solución de trabajo de cloruro de calcio, finalizada la operación de agitación, se coloca la probeta verticalmente en la mesa de trabajo y después se remueve el tapón se procede a la irrigación colocando el tubo irrigador en la parte superior de la probeta, se afloja la pinza de la manguera y se deja fluir la solución de trabajo por la boca de la probeta, mientras se lavan los finos de las paredes de la probeta y del tapón, esta acción se la hace hasta que esté lleno a la altura de 382 mm (15”), posteriormente se deja en reposo por 20 minutos, pasado los 20 minutos del periodo de sedimentación, se procede a tomar la lectura de arcilla se coloca el pisón lastrado (conjunto conformado con disco de asentamiento, una barra metálica y un contrapeso cilíndrico), para dividir la arena de la arcilla, suavemente se lo desliza hasta que llegue a descansar sobre la arena, después dirige el disco indicador, que está el extremo superior, hacia las paredes graduadas de la probeta, luego se resta 254 mm (10”) del nivel indicado por el borde superior del indicador y registre este valor como la lectura de la arena si las lecturas de arcilla y arena están entre líneas, se registrará la lectura inmediatamente superior.

Por ejemplo, si la lectura de arcilla es 7,85 se anotará 7,9 para la lectura de arena de 3,33 se anotará 3,4 para mayor precisión este procedimiento se lo repite para 3 muestras del material, el equivalente de arena será el promedio de los 3 valores obtenidos por cada ensayo.

Figura 3.13. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Resultado de ensayo

Equivalente de arena (%)	Norma
68,54	> 50%

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Peso específico del agregado grueso (ASTM D-127, AASHTO T-85)

Procedimiento

La muestra consiste aproximadamente de 5 kg de material separado por el método de cuarteo y de manera que todo el material quede retenido sobre el tamiz de 3/8.

Se lava el material a fin de remover el polvo o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas, luego se sumerge la muestra por un periodo de 24 horas, se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta q la película de agua haya desaparecido de la superficie, se obtiene después el peso de la muestra con sus partículas saturadas, la muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra sumergida, se seca la muestra en el horno por 24 horas a 105 °C luego se deja enfriar y se registra su peso.

Figura 3.15. Muestra saturada y secado superficial



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Peso de la muestra (SSS) y muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Muestra seca y peso de muestra seca



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Resultados de peso específico de grava y gravilla

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico S.S.S. (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2,44	2,55	2,74	4,55
2,43	2,53	2,72	4,42

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Peso específico del agregado fino (ASTM D 128, AASHTO T84)

Procedimiento

Se pesa aproximadamente 1500 gr para tres muestras de material, y se sumerge en agua durante 24 horas, transcurrido ese tiempo se seca el material hasta alcanzar la condición de saturado con superficie seca, lo cual se verifica cuando el material se desmorona al quitar el cono donde la muestra fue colocada y compactada. De esta condición se extrae 500 gr de muestra y se coloca en un matraz que se llena con agua y es pesada, luego la misma se seca al horno, y se determina el peso seco.

Figura 3.18. Suelo saturado y muestra superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19. Matraz+muestra+agua



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de peso específico del agregado fino

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico S.S.S. (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2,31	2,41	2,58	4,21

Fuente: Elaboración propia

3.3.8. Desgaste de los ángeles (ASTM C-131, AASHTO T-96)

Procedimiento

Se introduce la muestra junto con las esferas de acero en cilindro, se tapa y ajusta la abertura del cilindro (tambor rotativo), de la máquina de los Ángeles se acciona la máquina con las revoluciones de acuerdo según al método durante 30 minutos. Terminado el tiempo de rotación, se saca la muestra y se tamiza por la malla N°12 se lava y se seca al horno a una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas el material retenido en el tamiz N°12 pasado las 24 horas se pesa el material.

Figura 3.20. Ensayo de abrasión de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Muestra después de ser ensayada



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15. De pesos de agregado y número de esferas según la gradación

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{final}}} * 100$$

Tabla 3.16. Resultado de ensayo de desgaste de los ángeles

Material	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación (ASTM)
A	5000	3515,9	29,68	35% Máx.
B	5000	5000,0	0,00	35% Máx.
C	5000	5000,0	0,00	35% Máx.
D	5000	5000,0	0,00	35% Máx.

Fuente: Elaboración propia

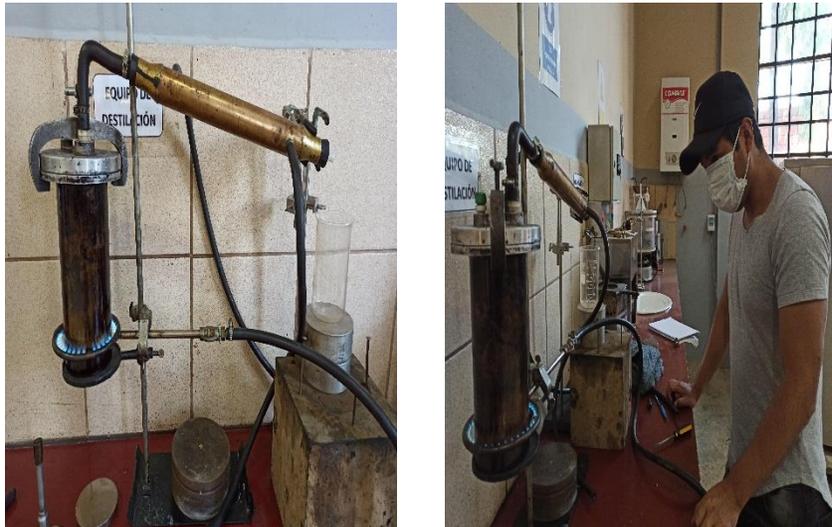
3.4. Caracterización de la emulsión asfáltica

3.4.1. Ensayo de residuo por destilación (ASTM D-6997, NBR-14376)

Procedimiento

El ensayo se realiza colocando una cantidad de 200 gramos emulsión asfáltica en un matraz de destilación conectado a un condensador. El asfalto fluidificado se calienta gradualmente hasta una temperatura especificada y se anota la cantidad de disolvente destilada a diversas temperaturas. Cuando se alcanza la temperatura de 360 °C se mide la cantidad de asfalto restante y se expresa como porcentaje en volumen de la muestra original.

Figura 3.22. Proceso de destilado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17. Resultado de ensayo de destilación

Residuo (%)	ASTM-D6997	
	Mínimo	Máximo
61,37	60	65

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Ensayo de sedimentación (ASTM D-244, AASHTO T59-97)

Procedimiento

Se debe colocar dos muestras de 500 ml en diferentes tubos de vidrio debidamente graduados, dejándolos tapados durante cinco días, posteriormente a ello se debe tomar pequeñas muestras de las partes inferior y superior de cada tubo, depositarlas en un frasco y pesarlas respectivamente. Calcular la diferencia de pesos con los resultados obtenidos, si en caso hay, entre el contenido de cemento asfáltico de las partes superior e inferior, proveyendo de esta manera una medida del asentamiento.

Figura 3.23. Reposo de emulsión de 5 días



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18. Resultado de ensayo

Sedimentación (%)	ASTM-D244	
	Mínimo	Máximo
2,40	-	5

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Ensayo de ductilidad (ASTM D-113, AASHTO T51-00)

Procedimiento

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes. Se vierte el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire. Se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de 25°C durante otros 30 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo. Se pone en marcha el ductilímetro, el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada, hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que se haya separado ambas pinzas hasta ese instante. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de 25 +/- 0,5 °C y a una velocidad de 5 cm/mín +/- 5%.

Figura 3.24. Realización del ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19.Resultado de ensayó de ductilidad

N°	Ductilidad (cm)	Promedio (cm)	ASTM-D113	
			Mínimo	Máximo
1	130	121,67	100	-
2	115			
3	120			

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM D-244, AASHTO T59- 97)

Procedimiento

Ensayo a 25 °C (77 °F) (Para emulsiones con porcentaje de agua mayor del 35%) Se agita bien la muestra para que no se formen burbujas y viértala en un frasco de 100 cm³, el cual se coloca en un baño de agua a la temperatura de 25°C durante 30 minutos mezclando al final la muestra, para lo cual se invierte el frasco varias veces, pero lentamente para evitar que se forme espuma vierta la muestra dentro del viscosímetro a 25°C se echa en el viscosímetro bien limpio, una pequeña cantidad a través del tamiz de 850 mm (N° 20), dejando que fluya por el tubo de salida para el desperdicio coloque el tapón, el cual debe estar unido a un cordel que facilite su remoción, en la cámara de aire del viscosímetro se vierte la muestra a través del tamiz de 850 mm (N° 20) directamente en el tubo del viscosímetro hasta que sobrepase el borde de rebose del tubo se agita la muestra con un termómetro de viscosidad equipado con soporte, mediante un movimiento circular de 30 a 50 rpm en el plano horizontal, hasta que la temperatura de la emulsión alcance la del ensayo y permanezca durante 1 minuto dentro de +/- 0,05 °C de la misma, se coloca el frasco receptor de tal manera que la emulsión cae del viscosímetro golpee el cuello del mismo, se retira rápidamente el tapón del fondo del viscosímetro y en el mismo instante se pone en funcionamiento el cronómetro, el Cual se detiene en el momento en que el fondo del menisco alcance la marca de graduación del frasco receptor, anotándose la lectura del cronómetro.

Figura 3.25. Realización de ensayo de viscosidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Resultado de ensayó de viscosidad

N°	Viscosidad (seg)	Promedio (seg)	ASTM-D244	
			Mínimo	Máximo
1	25,4	24,34	0	90
2	23,1			
3	24,5			

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D-36, NBR-6560)

Procedimiento

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una temperatura determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Figura 3.26. Temperatura a 4°C y residuo en anillos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27. Calentado de muestra y conclusión de ensayo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Resultado de ensayo de punto de ablandamiento

Esfera N°	Punto de ablandamiento °C	Promedio °C	ASTM-D36	
			Mínimo	Máximo
1	59	61,83	55	-
2	61,5			
3	65			

Fuente: Elaboración propia

3.4.6. Ensayo de peso específico de residuo asfáltico (ASTM D244-09)

Procedimiento

Se limpia el picnómetro para su calibración, esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración. Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa C. El peso del picnómetro vacío, se designa por A. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B. Posteriormente verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C. Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25°C mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

Figura3.28.Ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22. Resultados de peso específico de asfalto residual

Peso específico (gr)	ASTM D244-09	
	Mínimo	Máximo
1,04	1	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.4.7. Ensayo de penetración (ASTM-D5, NBR-6576)

Procedimiento

Se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 gramos de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente hasta que este fluido se lo coloca en 3 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en el baño María por una hora a de 25°C una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Figura 3.29. Realización de ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23. Resultado de ensayo de penetración

Penetración (0,1mm)	ASTM-D5	
	Mínimo	Máximo
57,67	40	150

Fuente: Elaboración propia

3.5. Resultados de los ensayos de caracterización de los materiales

3.5.1. Resultados de los ensayos realizados a los Agregados pétreos

Se presenta los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida por la norma.

Tabla 3.24. Resultados de los ensayos de los agregados pétreos

Ensayos	Método	Resultados	Unidad	Especificación
Límite líquido	(ASTM D-4318)	22	(%)	35 (%) Máx.
Límite plástico	(ASTM D-4318)	15	(%)	
Índice de plasticidad	(ASTM D-4318)	7	(%)	10 (%) Máx.
CBR a 95 (%)	(AASHTO T193)	37,74	(%)	25-80
Proctor modificado	(AASHTO T-180)		(%)	
Densidad máxima seca	(AASHTO T-180)	2,28	(%)	
Contenido óptimo de humedad	(AASHTO T-180)	7,5	(%)	
Equivalente de arena	(ASTM D-2419)	68,54	(%)	50 (%) Mín.
Peso específico y absorción del agregado grueso	(ASTM D 127)	2,74	(%)	
			(%)	
Peso específico y absorción del agregado fino	(ASTM D 128)	2,58	(%)	
			(%)	
Abrasión de los ángeles	(ASTM C 131)	29,68	(%)	35 (%) Máx.

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Resultados de los ensayos realizados a la Emulsión asfáltica (CSS1)

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que siguen las especificaciones propuestas por la norma.

Tabla 3.25. Resultados de los ensayos de emulsión asfáltica (CSS1)

Ensayos	Método (ASTM)	Resultados	Unidad	Especificación
Viscosidad de Saybolt Furol a 25°C	(D-244)	24,34	(SSF)	0-90
Sedimentacion, máx.	(D-6930)	2,40	(%)	5
Carga de la partícula	(D-244)	-	-	positiva
Solvente destilado	(D-6997)	36,83	(%)	-
Residuo seco, máx.	(D-6997)	61,37	(%)	65
Penetración a 25°C, (100 g e 5s)	(D-5)	57,67	(mm)	40-150
Ductilidad a 25°C, mín.	(D-113)	121,67	(cm)	100(mín.)
Punto de Ablandamiento	(D-36)	61,83	(°C)	55(mín.)

Fuente: Elaboración propia

3.6. Diseño de mezcla asfáltica en frío para emulsión asfáltica 60-40 (CSS1)

Existen diferentes métodos para el diseño de mezclas asfálticas en frío empleando emulsiones, la mayoría de estas son modificaciones del método Marshall para mezclas en caliente. A continuación se mencionan el método utilizado.

3.6.1. Objetivo del método

El objetivo del método es determinar la cantidad Óptima de asfalto residual, el óptimo es la cantidad mínima de emulsión que puede estabilizar a los agregados para que se cumplan las normativas de diseño y económicamente establezca el material granular con el fin de dar resistencia o estabilidad requerida para soportar las aplicaciones de cargas repetidas sin una deformación permanente excesiva o rotura por fatiga volver a la mezcla lo suficientemente inerte a los efectos de cambios de humedad.

3.7. Procedimientos

Material y equipo

- Grava gravilla y arena
- Emulsión asfáltica (CSS1)
- Papel parafinado
- Balanza de precisión de 0,1 gr
- Equipo misceláneo. (Brochas para limpieza, cepillo, espátulas de 4", charolas de lámina galvanizada, palas manuales, cucharas y cuchilla)
- Báscula digital con precisión de 1 gr
- Pipeta plástica o de vidrio
- Moldes para briquetas
- Martillo mecánico manual Marshall
- Gato hidráulico
- Prensa Marshall

3.7.1. Contenido óptimo de agua para la mezcla

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el "Contenido Total de Fluidos" es utilizado con base en el Contenido Óptimo de Humedad, definido de la relación humedad/densidad. La densidad máxima se alcanza con el contenido óptimo de humedad, el cual es el

resultado de la combinación del agua en el material granular, el agua contenida en la emulsión asfáltica, más el agua adicionada. Tanto los componentes del agua como del asfalto de una emulsión actúan como un lubricante para ayudar a la compactación.

Inicialmente se debe determinar el contenido de humedad que posee el material granular a estabilizar. La cantidad de agua que se adiciona será igual al contenido óptimo de humedad obtenido del ensayo de la relación humedad-densidad (Proctor) menos el porcentaje de agua en la emulsión y el porcentaje de humedad en el material.

Objetivo

Determinar el porcentaje de agua que permita un recubrimiento mínimo óptimo de las bases estabilizadas con emulsión asfáltica.

Tabla 3.26. Contenido óptimo de fluidos totales

Porcentaje total de fluidos					
Porcentaje óptimo de humedad (Proctor) (%)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Porcentaje de humedad en agregado (%)	1	1	1	1	1
Residuo asfáltico (%)	2	2,5	3	3,5	4
Emulsión asfáltica 60/40 (CSS1) (%)	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Agua a adicionar (gr)	62,48	58,48	54,48	50,48	46,48

Fuente: Elaboración propia

3.8. Dosificación de la mezcla para agregado pétreo

Para todos los ensayos de diseño en laboratorio se requiere eliminar los sobre tamaños que se retienen en la malla 19 mm (3/4"). Sin embargo, debe sustituirse ese porcentaje con material pasando 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2"), para compensar el tamaño eliminado. Asimismo, se divide el material en las siguientes fracciones (Wirtgen, 2012):

- Pasando la malla 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2").
- Pasando la malla 12,5 mm (1/2") y retenido en la malla 4,75 mm (Nº 4).
- Pasando la malla 4,75 mm (Nº 4).

Figura 3.30. Proceso de tamizado para obtener las fracciones deseadas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27. Fracciones para conformar capa base según granulometría

Análisis por tamiz			Cantidad de material a ser incluido en una muestra de 12 kg		
Tamices	Tamaño tamiz (mm)	(%) que pasa	Pasando 4,75 (mm)	Pasando 12,5 mm Retenido 4,75 mm	Pasando 19 mm Retenido 12,5 mm
3/4"	19,0	81,1	$(36,4/100*12000)$ $=3410,8$	$(64,8-36,4/100*12000)$ $=4377,5$	$(81,1-64,8/100*12000)$ $=1959,6$
1/2"	12,5	64,8			
Nº4	4,75	36,4			

Fuente: Elaboración propia

3.8.1. Porcentajes para mezcla según granulometría

En base a los parámetros de granulometría exigidos para la elaboración material estabilizados con asfalto, expuestas en la tabla 3.21., con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de los agregados (grava, gravilla, arena) con la finalidad de cumplir con los requisitos planteados.

Agregado grueso (Grava de 3/4) 20%

Agregado grueso (Gravilla de 3/8) 35%

Agregado fino (Arena) 45%

3.9. Dosificación de la mezcla con emulsión asfáltica 60/40 (CSS1)

Tabla 3.28. Cantidad de agregados y emulsión asfáltica

Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	3,33	4,17	5	5,8	6,7
Porcentaje de residuo asfáltico (%)	2	2,5	3	3,5	4
Porcentaje de agregado (%)	98	97,5	97,0	96,5	96
Peso de residuo asfáltico (gr)	24,00	30,00	36,00	42,00	48,00
Peso de grava (gr)	235,2	234,0	232,8	231,6	230,4
Peso de gravilla (gr)	411,6	409,5	407,4	405,3	403,2
Peso de arena (gr)	529,2	526,5	523,8	521,1	518,4
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración propia

3.10. Procedimiento para la construcción de briquetas

Elaboramos 6 especímenes, por medio de compactación Marshall (AASHTO T 245) a 75 golpes por cara, para cada % de asfalto residual sobre peso de agregado (2,0, 2,5, 3,0, 3,5).

3.10.1. Cantidad de material pétreo para cada briqueta

Pesamos el material de acuerdo a los porcentajes para la mezcla según su granulometría alcanzando los 1200 gramos los cuales van variando de acuerdo a que el residuo asfáltico va aumentado, para llegar a una altura de compactación de $(63,5 \pm 1,5)$ mm.

Figura 3.31. Cantidades de material para cada briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.10.2. Mezcla de agregados con emulsión asfáltica

Mezclamos el material granular con el agua respectiva hasta que quede homogéneo, luego se mezclamos lentamente por 30 segundos con la mitad de la emulsión, dejando reposar la mezcla por 15 segundos, nuevamente se mezclamos la otra mitad de la emulsión para completar la totalidad de fluidos por 30 segundos vigorosamente, para luego ser compactada en el mazo Marshall.

Figura 3.32. Mezcla de materiales a temperatura ambiente



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33. Mezcla de materiales a temperatura ambiente



Fuente: Elaboración propia

3.10.3. Compactación de la muestra

Preparamos el molde y mazo Marshall limpiando el molde, collar, plato base y la cara de compactación del mazo. Colocamos papel filtro en el fondo del molde el equipo de compactación debe mantenerse a temperatura ambiente colocar la mezcla en el molde y damos 15 espatulazos alrededor del perímetro del molde y 10 en el centro, acomode la mezcla de la parte superior de manera que quede en forma de cono, se debe asegurando el papel filtro, compactamos el material aplicando 75 golpes por cara con el compactador Marshall.

Figura 3.34. Colocado y compactado de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Después de compactar el espécimen, quitamos el collarín y el plato base, y sin remover el espécimen del molde, dejamos en el molde por aproximadamente 24 horas a temperatura ambiente para evitar posibles daños en la muestra compactada posterior a las 24 horas se debe remover cuidadosamente los especímenes de los moldes.

Figura 3.35. Muestra compactada y desmoldada



Fuente: Elaboración propia

3.10.4. Curado de especímenes de ensayo

El curado es el proceso donde las capas mezcladas y compactadas eliminan el agua por medio de evaporación, neutralización de la carga del asfalto en la emulsión, y la disipación de presión de poro inducida por la compactación.

Con cuidado se colocan los especímenes en una bandeja plana y lisa y cure por 72 horas a 40 °C en horno.

Figura 3.36. Curado de especímenes



Fuente: Elaboración propia

3.10.5. Determinación de la altura y densidad

3.10.5.1. Altura de briquetas

Primero se debe realizar la limpieza de las briquetas evitando que tenga aristas o material desprendido, luego con un vernier se debe proceder a obtener las medidas de las alturas o espesor de la briqueta midiendo en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección por altura.

Figura 3.37. Medición de briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.10.5.2. Densidad de los especímenes

Para ello se determinará el peso seco de los especímenes (W_s) donde se pesa directamente en la balanza.

Figura 3.38. Peso seco del espécimen



Fuente: Elaboración propia

Se mide el peso de las briquetas (SSS.) dejando sumergido en agua por un tiempo mínimo de 30 minutos a una temperatura de 25°C determinando así el peso (W_{ss}), se saca del agua, se seca con un paño, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seca, y se determina su peso.

Figura 3.39. Briquetas sumergidas a 25 °C



Fuente: Elaboración propia

El peso sumergido se mide cuando se sumerge la briqueta en el agua a 25 °C

Figura 3.40. Peso sumergido de briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.10.6. Estabilidad y fluencia de briquetas secas y saturadas

Después de que la densidad se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21 °C y 38 °C (70 a 100 °F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Figura 3.41. Briquetas a 25 °C antes de la prueba



Fuente: Elaboración propia

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

3.10.6.1. Estabilidad seca y saturada

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto (2" / minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura donde se anota como valor de Estabilidad Marshall.

Este ensayo está dirigido a medir la resistencia bajo cargas impuestas a la deformación del suelo ya estabilizado con la emulsión asfáltica, se realiza principalmente para conocer el comportamiento de la emulsión en sí cuando el suelo ya está estabilizado.

La estabilidad se calcula para cada grupo de briquetas después del curado, sin olvidar que primero ensayaremos un grupo de tres briquetas por porcentaje de emulsión en seco y luego de 1 día ensayaremos las tres briquetas restantes sometidas a saturación en agua a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, para simular la influencia de la humedad.

Al igual que en el ensayo en seco, para las muestras sometidas en inmersión se prepararon muestras a contenidos de asfaltos residuales que varían en 0,5%, con valores de 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, 4% y 4,5%. Estas muestras fueron compactadas y curadas exactamente igual que las muestras ensayadas en seco, pero después del curado de 72 horas, las muestras fueron sometidas a inmersión durante 24 horas.

Figura 3.42. Estabilidad y fluencia de los especímenes



Fuente: Elaboración propia

Los valores que obtuvimos para aquellas muestras que no tenían exactamente la altura 65 +/- 1,5 mm corregimos, aplicando factores de corrección. En base al volumen de la briqueta, calculando la estabilidad corregida de acuerdo a tablas, los valores de Estabilidad corregida para cada grupo de muestras elaboradas con el mismo contenido de asfalto, se promedian, tomándose dicho promedio como valor de estabilidad para ese contenido de asfalto para ser graficado.

Tabla 3.29. Resultados de ensayo de estabilidad

Asfalto residual (%)	Estabilidad seca (libras)	Estabilidad saturada (libras)	Pérdida estabilidad (%)
2	2355,09	1190,77	49,4
2,5	2973,75	1756,26	40,9
3	3653,18	2296,34	37,1
3,5	3761,91	2722,40	27,6
4	3924,28	2607,90	33,5

Fuente: Elaboración propia

3.10.6.2. Flujo

El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad, los valores de flujo obtenidos para todas las muestras elaboradas con determinado contenido de asfalto, se promedian, deberá también descartarse aquel valor que difiera notablemente del promedio si lo hay.

Tabla 3.30. Resultados del ensayo de flujo

Asfalto residual (%)	Flujo seco (1/100")	Flujo saturada (1/100")
2	10,33	11,00
2,5	11,33	13,33
3	14,00	15,00
3,5	15,67	16,75
4	17,67	13,00

Fuente: Elaboración propia

3.11. Ensayo Marshall para mezclas asfálticas en frío

Para realizar el respectivo análisis del ensayo, a continuación se presentan los siguientes cuadros y Gráficas donde se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 3.31. Pesos específicos de todos los materiales

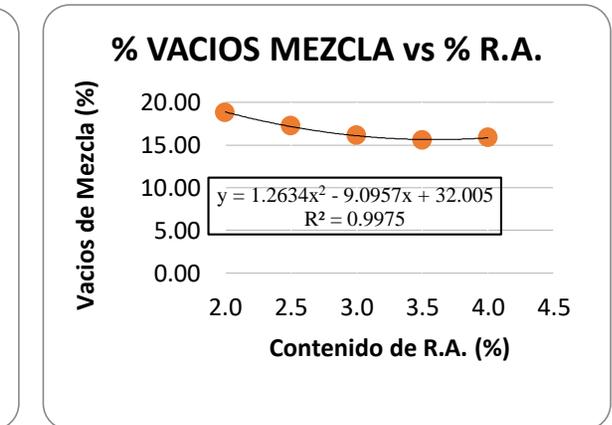
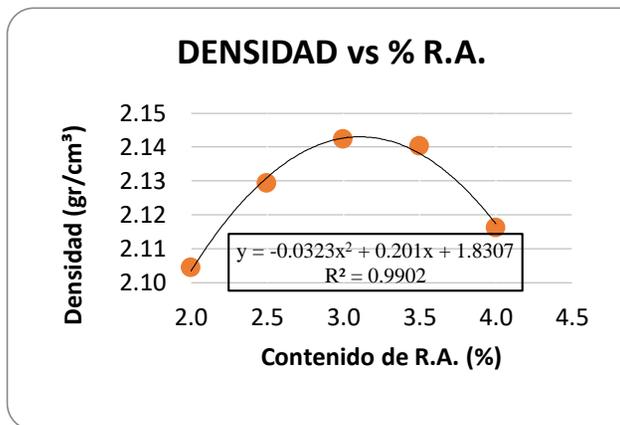
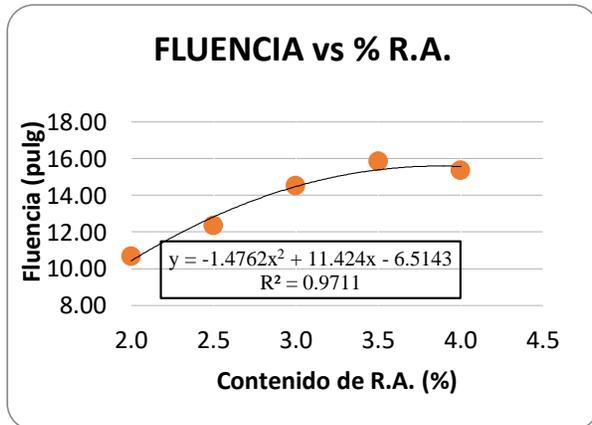
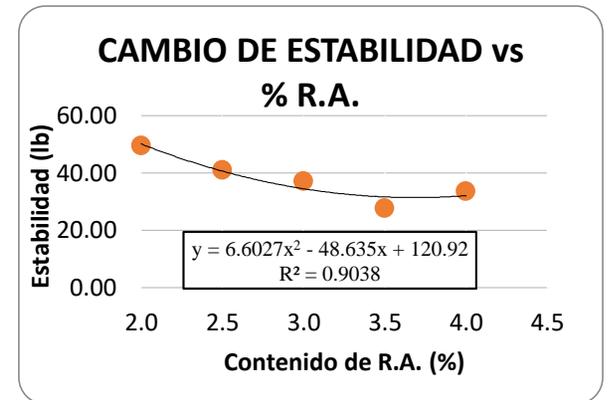
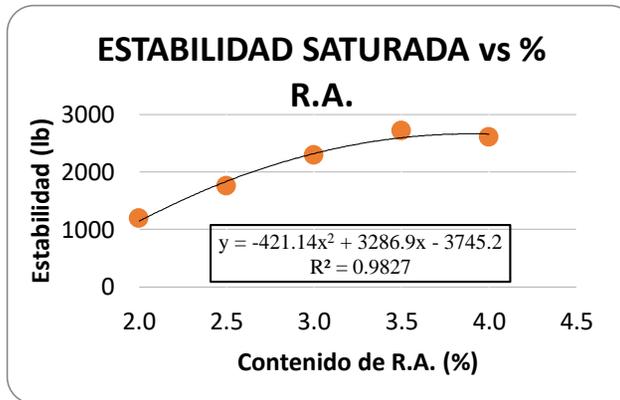
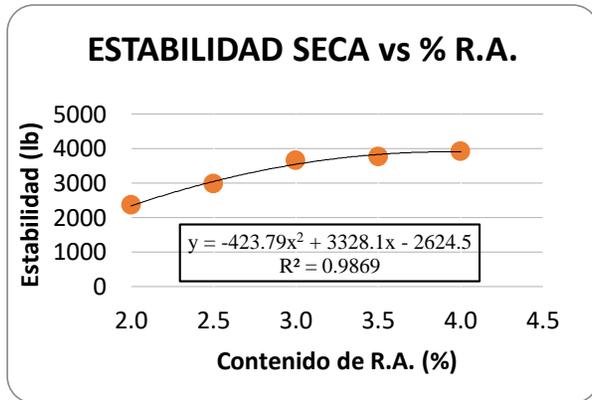
Pesos específicos			
	Material	P.E. (gr/cm³)	Dosificación (%)
Agregados	grava	2,74	20
	gravilla	2,72	35
	arena	2,58	45
Emulsión asfáltica	E.A. (CSS1) 60/40	1,04	
Peso específico total			
		P.E. (gr/cm³)	Porcentaje de agregado
Material retenido Tamiz N° 4		2,73	65
Material pasa Tamiz N° 4		2,58	35
Total		2,67	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32. Planilla de ensayo Marshall de emulsión asfáltica (CSS1)

Planilla de diseño Marshall																					
N° de probeta	Estado de ensayo	altura de probeta	% Emulsión		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
			% Asfalto Residual en la mezcla	% Agua Incluida	seco	Sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%	grs	grs	grs	cc	grs/cm³	grs/cm³	grs/cm³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulg.
1	Seco	6,47	2,00	7,5	1202,4	1214,4	647	567,4	2,12	2,10	2,59	18,83	22,87	17,69	940	2513,01	0,97	2437,62	2355,09	9	10,67
2		6,53			1204,1	1215,5	640	575,5	2,09						915	2445,69	0,96	2338,81		12	
3		6,32			1203,6	1212,5	635	577,5	2,08						850	2270,66	1,01	2288,82		10	
1	Saturado	6,53	2,00	7,5	1205,2	1279,4	700	579,4	2,08	2,13	2,57	17,24	22,36	22,89	525	1395,50	0,96	1334,52	1190,77	11	12,33
2		6,62			1204,2	1275,5	705	570,5	2,11						430	1139,68	0,94	1070,62		12	
3		6,64			1207,6	1271,5	707	564,5	2,14						470	1247,39	0,94	1167,19		10	
4	Seco	6,37	2,50	7,5	1205,4	1216,0	650	566,0	2,13	2,14	2,55	16,10	22,28	27,74	1225	3280,46	1,00	3264,06	2973,75	13	14,50
5		6,49			1210,9	1218,5	654	564,5	2,15						1150	3078,50	0,97	2970,75		11	
6		6,53			1207,2	1218,9	643	575,9	2,10						1050	2809,22	0,96	2686,46		10	
4	Saturado	6,57	2,50	7,5	1203,6	1262,0	697	565,0	2,13	2,14	2,55	16,10	22,28	27,74	720	1920,59	0,95	1822,26	1756,26	12	15,83
5		6,53			1205,3	1264,5	700	564,5	2,14						670	1785,95	0,96	1707,91		13	
6		6,59			1206,2	1268,9	705	563,9	2,14						690	1839,81	0,95	1738,62		15	
7	Seco	6,39	3,00	7,5	1184,5	1199,0	650	549,0	2,16	2,14	2,55	16,10	22,28	27,74	1369	3668,22	0,99	3631,54	3653,18	14	14,50
8		6,36			1188,0	1204,1	655	549,1	2,16						1415	3792,09	1,00	3782,61		13	
9		6,37			1186,0	1201,6	648	553,6	2,14						1330	3563,20	1,00	3545,39		15	
7	Saturado	6,56	3,00	7,5	1199,2	1254,9	694	560,9	2,14	2,14	2,55	16,10	22,28	27,74	904	2416,07	0,95	2296,96	2296,34	15	14,50
8		6,55			1196,5	1252,2	690	562,2	2,13						915	2445,69	0,95	2329,52		14	
9		6,51			1197,4	1250,6	687	563,6	2,12						882	2356,83	0,96	2262,56		16	
10	Seco	6,39	3,50	7,5	1197,9	1217,9	665	552,9	2,17	2,14	2,53	15,55	22,76	31,65	1499	4018,29	0,99	3978,10	3761,91	17	15,83
11		6,44			1195,2	1212,2	662	550,2	2,17						1330	3563,20	0,98	3483,03		14	
12		6,33			1196,5	1214,4	660	554,4	2,16						1420	3805,55	1,01	3824,58		16	
10	Saturado	6,52	3,50	7,5	1196,4	1240,6	678	562,6	2,13	2,14	2,53	15,55	22,76	31,65	1025	2741,90	0,96	2627,01	2722,40	16	15,83
11		6,52			1194,2	1254,0	682	572,0	2,09						1100	2943,86	0,96	2820,51		15	
12		6,54			1197,5	1247,2	685	562,2	2,13						1065	2849,61	0,95	2719,67		17	
13	Seco	6,42	4,00	7,5	1189,4	1204,7	650	554,7	2,14	2,12	2,52	15,88	24,02	33,89	1456	3902,50	0,98	3834,20	3924,28	19	15,33
14		6,35			1186,0	1207,1	657	550,1	2,16						1489	3991,36	1,00	3991,36		16	
15		6,37			1187,3	1203,5	655	548,5	2,16						1480	3967,12	1,00	3947,29		18	
13	Saturado	6,53	4,00	7,5	1190,4	1232,4	665	567,4	2,10	2,12	2,52	15,88	24,02	33,89	1015	2714,97	0,96	2596,33	2607,90	12	15,33
14		6,47			1188,0	1246,5	670	576,5	2,06						1030	2755,36	0,97	2672,70		14	
15		6,51			1191,0	1239,3	665	574,3	2,07						995	2661,11	0,96	2554,67		13	
Especificaciones					Mínimo				2			3						750		8	
					Máximo				3			18						-		16	

Gráficas 3.10. De ensayo Marshall con (CSS1)



Fuente: Elaboración propia

3.12. Porcentaje óptimo de residuo asfáltico

El contenido óptimo de asfalto residual es el resultado de realizar el análisis de los gráficos propuestos para la emulsión y convertir ese porcentaje óptimo de emulsión a porcentaje de asfalto residual, el porcentaje que existe de asfalto en la emulsión, en este caso 60% .

Existen muchos criterios para evaluar una mezcla asfáltica uno de estos criterios es el de promediar los valores recomendables de las propiedades evaluadas, que se usó en este caso particular de la estabilización de materiales con emulsión asfáltica.

Este valor óptimo debe ser definido según la mejor combinación de la estabilidad Marshall (seca y saturada), cambio de estabilidad, flujo y la densidad.

Tabla. 3.33. Porcentaje óptimo de acuerdo a gráficas

Ensayo	Residuo asfáltico
Cambio de estabilidad (%)	3,68
Estabilidad seca (%)	3,93
Estabilidad saturada (%)	3,90
Densidad (%)	3,11
Flujo (%)	3,87
Porcentaje óptimo de residuo asfáltico (%)	3,70

Fuente: Elaboración propia

3.13. Elaboración de briquetas Marshall con contenido óptimo de R. A.

3.13.1. Contenido óptimo de agua para la mezcla

Tabla 3.34. Contenido óptimo de fluidos totales

Porcentaje total de fluidos	
Porcentaje óptimo de humedad (Proctor) (%)	7,5
Porcentaje de humedad en agregado (%)	1
Residuo asfáltico (%)	3,7
Emulsión asfáltica 60/40 (CSS1) (%)	6,17
Agua a adicionar (gr)	48,88

Fuente: Elaboración propia

3.13.2. Dosificación de la mezcla de emulsión asfáltica 60/40 (CSS1)

Tabla 3.35. Cantidad de agregados y emulsión asfáltica

Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	6,17
Porcentaje de residuo asfáltico (%)	3,7
Porcentaje de agregado (%)	96,3
Peso de residuo asfáltico (gr)	44,40
Peso de grava (gr)	231,12
Peso de gravilla (gr)	404,46
Peso de arena (gr)	520,02
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.14 .Ensayo Marshall para mezclas asfálticas en frío (CSS1)

Para realizar el respectivo análisis del ensayo, a continuación se presentan el siguiente cuadro y Gráficas donde se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 3.36. Pesos específicos de todos los materiales

Pesos específicos			
	Material	P.E. (gr/cm³)	Dosificación (%)
Agregados	grava	2,74	20
	gravilla	2,72	35
	arena	2,58	45
Emulsión asfáltica	E.A. (CSS1) 60/40	1,04	
Peso específico total			
		P.E. (gr/cm³)	Porcentaje de agregado
	Material retenido Tamiz N° 4	2,73	65
	Material pasa Tamiz N° 4	2,58	35
	Total	2,67	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Planilla con contenido óptimo de emulsión asfáltica (CSS1)

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	Sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad final	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	grs	grs		grs	cm³	grs/cm³	grs/cm³	grs/cm³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras
1	5,96	6,34	6,19	1085,9	1087,4	618	469,4	2,31	2,31	2,43	4,92	18,18	72,94	1098	2938,47	1,04	3064,83	3064,83	14	14,00
2	5,96	6,34	6,86	1198,5	1199,8	686	513,8	2,33	2,33	2,43	4,13	17,50	76,41	1548	4150,23	0,88	3670,47	3670,47	12	12,00
3	5,96	6,34	6,68	1160,6	1163,7	665	498,7	2,33	2,33	2,43	4,35	17,69	75,41	1020	2728,43	0,93	2530,62	2530,62	24	24,00
4	5,96	6,34	6,89	1196,0	1197,7	684	513,7	2,33	2,33	2,43	4,31	17,65	75,59	1047	2801,14	0,88	2461,64	2461,64	17	17,00
5	5,96	6,34	6,93	1209,7	1211,3	694	517,3	2,34	2,34	2,43	3,89	17,29	77,52	1155	3091,96	0,87	2694,03	2694,03	13	13,00
6	5,96	6,34	7,02	1201,2	1203,5	693	510,5	2,35	2,35	2,43	3,29	16,78	80,38	1071	2865,77	0,85	2448,51	2448,51	15	15,00
7	5,96	6,34	7,01	1206,8	1210,0	682	528,0	2,29	2,29	2,43	6,06	19,16	68,37	1026	2744,59	1,27	3485,63	3485,63	10	10,00
8	5,96	6,34	7,00	1192,1	1197,4	685	512,4	2,33	2,33	2,43	4,38	17,71	75,28	1047	2801,14	0,86	2403,66	2403,66	15	15,00
9	5,96	6,34	7,16	1195,3	1210,8	691	519,8	2,30	2,30	2,43	5,49	18,67	70,60	914	2443,00	0,83	2024,76	2024,76	11	11,00
10	5,96	6,34	6,93	1192,6	1196,5	673	523,5	2,28	2,28	2,43	6,37	19,42	67,22	1210	3240,07	0,87	2823,07	2823,07	13	13,00
11	5,96	6,34	6,21	1089,3	1091,7	620	471,7	2,31	2,31	2,43	5,09	18,32	72,24	1101	2946,55	1,04	3055,57	3055,57	9	9,00
12	5,96	6,34	6,95	1211,3	1215,6	697	518,6	2,34	2,34	2,43	4,00	17,39	76,99	1170	3132,35	0,87	2717,63	2717,63	17	17,00
13	5,96	6,34	6,69	1168,1	1171,3	672	499,3	2,34	2,34	2,43	3,85	17,25	77,71	1003	2682,66	0,93	2481,46	2481,46	14	14,00
14	5,96	6,34	6,85	1197,6	1199,3	683	516,3	2,32	2,32	2,43	4,66	17,96	74,03	945	2526,47	0,89	2239,21	2239,21	18	18,00
15	5,96	6,34	6,94	1193,9	1196,2	677	519,2	2,30	2,30	2,43	5,49	18,67	70,59	1204	3223,91	0,87	2802,87	2802,87	12	12,00
16	5,96	6,34	7,16	1197,1	1199,8	675	524,8	2,28	2,28	2,43	6,25	19,32	67,66	1002	2679,96	0,83	2221,15	2221,15	11	11,00
17	5,96	6,34	7,12	1194,3	1197,6	681	516,6	2,31	2,31	2,43	4,98	18,23	72,67	991	2650,34	0,84	2214,89	2214,89	15	15,00
18	5,96	6,34	7,07	1189,7	1191,5	675	516,5	2,30	2,30	2,43	5,33	18,53	71,24	1089	2914,24	0,85	2462,53	2462,53	13	13,00
19	5,96	6,34	7,21	1196,5	1199,1	684	515,1	2,32	2,32	2,43	4,53	17,84	74,61	1118	2992,33	0,82	2461,19	2461,19	13	13,00
20	5,96	6,34	6,84	1191,9	1194,3	683	511,3	2,33	2,33	2,43	4,19	17,55	76,12	1133	3032,72	0,89	2693,36	2693,36	16	16,00
21	5,96	6,34	6,22	1089,4	1093,1	630	463,1	2,35	2,35	2,43	3,31	16,80	80,27	1013	2709,59	1,04	2804,42	2804,42	12	12,00
22	5,96	6,34	6,83	1175,3	1179,5	678	501,5	2,34	2,34	2,43	3,68	17,11	78,50	916	2448,38	1,27	3109,45	3109,45	19	19,00
23	5,96	6,34	6,78	1192,7	1195,9	677	518,9	2,30	2,30	2,43	5,53	18,70	70,43	967	2585,72	0,90	2333,61	2333,61	10	10,00
24	5,96	6,34	6,81	1187,9	1180,3	674	506,3	2,35	2,35	2,43	3,57	17,01	79,03	1121	3000,41	0,90	2685,36	2685,36	8	8,00
25	5,96	6,34	6,90	1190,8	1194,1	693	501,1	2,38	2,38	2,43	2,33	15,95	85,39	1167	3124,28	0,88	2739,68	2739,68	16	16,00
26	5,96	6,34	6,94	1181,9	1185,6	676	509,6	2,32	2,32	2,43	4,68	17,97	73,97	1308	3503,96	0,87	3046,34	3046,34	12	12,00
27	5,96	6,34	7,03	1193,7	1197,1	683	514,1	2,32	2,32	2,43	4,57	17,87	74,45	1030	2755,36	0,85	2348,95	2348,95	10	10,00
28	5,96	6,34	6,92	1183,9	1190,3	685	505,3	2,34	2,34	2,43	3,70	17,13	78,38	1168	3126,97	0,87	2730,47	2730,47	13	13,00
29	5,96	6,34	7,11	1185,7	1189,8	681	508,8	2,33	2,33	2,43	4,22	17,57	75,99	1003	2682,66	0,84	2246,99	2246,99	15	15,00
30	5,96	6,34	6,89	1193,8	1195,9	677	518,9	2,30	2,30	2,43	5,44	18,63	70,78	1263	3382,79	0,88	2972,79	2972,79	11	11,00
Especificaciones			Mínimo			2			3						750			8		
			Máximo			3			18						-			16		

Fuente: Elaboración propia

3.15. Daño por humedad en suelos estabilizados con emulsión asfáltica

Este ensayo está dirigido a medir la resistencia bajo cargas impuestas a la deformación del suelo ya estabilizado con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, se realiza principalmente para conocer el comportamiento de la emulsión en diferentes tiempos de saturación de tal manera que podamos observar el daño por humedad cuando el suelo ya está estabilizado.

La estabilidad se calculó según norma para cada grupo de 3 briquetas después del curado, sin olvidar que primero ensayaremos un grupo de tres briquetas en seco, luego ensayamos en diferentes tiempos de saturación sometidas a 8, 16, 24, 72, horas en agua a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, para simular la influencia de la humedad.

3.16. Elaboración de briquetas para diferentes tiempos de saturación

3.16.1. Contenido óptimo de agua para la mezcla

Tabla 3.38. Contenido óptimo de fluidos totales

Porcentaje total de fluidos	
Porcentaje óptimo de humedad (Proctor) (%)	7,5
Porcentaje de humedad en agregado (%)	1
Residuo asfáltico (%)	3,7
Emulsión asfáltica 60/40 (CSS1) (%)	6,17
Agua a adicionar (gr)	48,88

Fuente: Elaboración propia

3.16.2. Dosificación de la mezcla de emulsión asfáltica 60/40 (CSS1)

Tabla 3.39. Cantidad de agregados y emulsión asfáltica

Porcentaje de emulsión asfáltica (%)	6,17
Porcentaje de residuo asfáltico (%)	3,7
Porcentaje de agregado (%)	96,3
Peso de residuo asfáltico (gr)	44,40
Peso de grava (gr)	231,12
Peso de gravilla (gr)	404,46
Peso de arena (gr)	520,02
Peso total de la briketa (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.17. Marshall para daño por humedad en suelos estabilizados con (CSS1)

Para realizar el respectivo análisis del ensayo, a continuación se presentan el siguiente cuadro y gráficas donde se resumen los resultados obtenidos.

Figura 3.43. Estabilidad y fluencia de los especímenes



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40. Pesos específicos de todos los materiales

Pesos específicos			
	Material	P.E. (gr/cm³)	Dosificación (%)
Agregados	grava	2,74	20
	gravilla	2,72	35
	arena	2,58	45
Emulsión asfáltica	E.A. (CSS1) 60/40	1,04	
Peso específico total			
		P.E. (gr/cm³)	Porcentaje de agregado
	Material retenido Tamiz N° 4	2,73	65
	Material pasa Tamiz N° 4	2,58	35
	Total	2,67	100

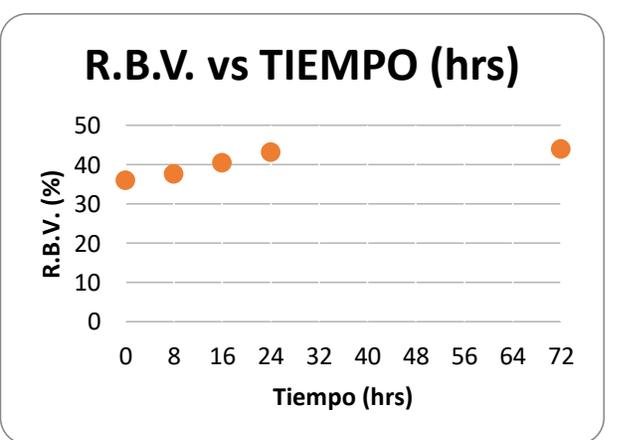
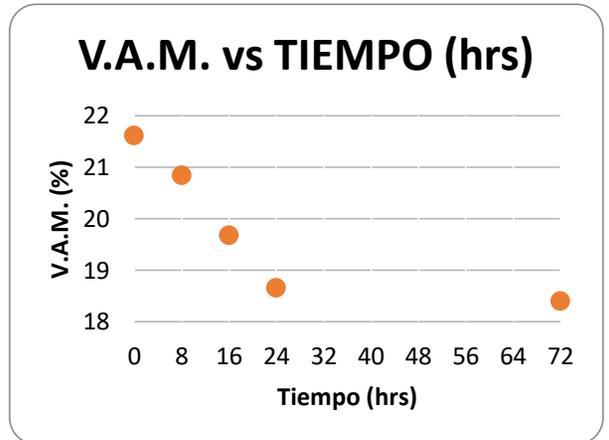
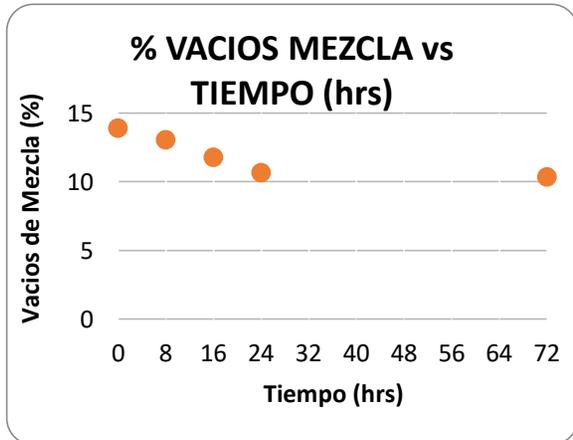
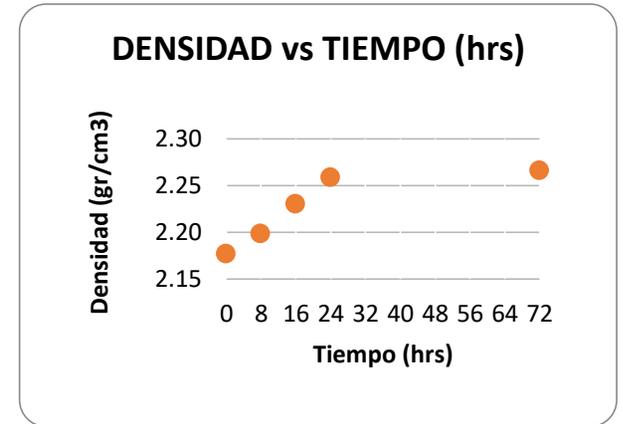
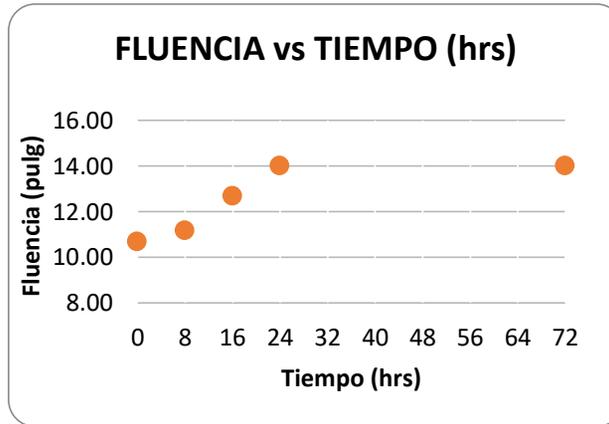
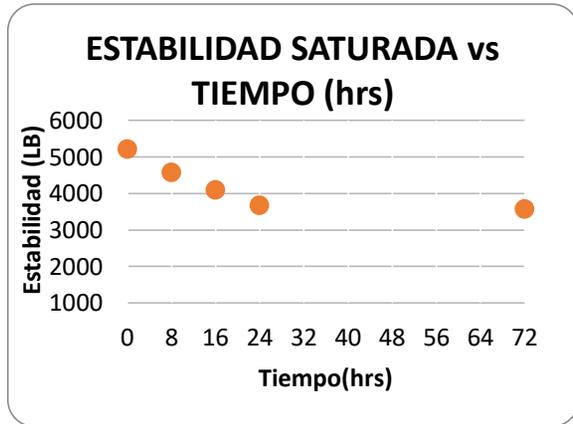
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41. Planilla Marshall daño por humedad

Planilla de diseño Marshall																					
N° de probeta	Estado de ensayo	altura de probeta	% Emulsión		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
			% Asfalto Residual en la mezcla	% Agua Incluida	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%	grs	grs	grs	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulg
1	0	6.41	3.70	7	1159.3	1165.7	625	540.7	2.14	2.18	2.53	13.87	21.61	35.83	1950.2	5233.22	0.99	5154.73	5199.36	12	12.33
2		6.54			1166.0	1170.4	634	536.4	2.17						2070	5555.87	0.95	5302.53		12	
3		6.48			1171.4	1175.6	630	545.6	2.15						1980	5313.52	0.97	5140.83		13	
1	8	6.53	3.70	7	1162.9	1172.6	640	532.6	2.18	2.20	2.53	13.01	20.83	37.54	1740	4667.25	0.96	4463.29	4569.11	11	12.00
2		6.62			1167.0	1175.0	646	529.0	2.21						1855	4976.92	0.94	4675.32		12	
3		6.64			1165.3	1176.5	648	528.5	2.20						1820	4882.67	0.94	4568.72		13	
1	16	6.37	3.70	7	1175.0	1179.0	640	539.0	2.18	2.23	2.53	11.74	19.67	40.33	1680	4505.68	1.00	4483.15	4088.38	14	12.67
2		6.49			1159.4	1161.2	649	512.2	2.26						1492	3999.44	0.97	3859.46		11	
3		6.53			1167.8	1174.6	655	519.6	2.25						1530	4101.76	0.96	3922.52		13	
1	24	6.47	3.70	7	1175.0	1179.8	656	523.8	2.24	2.26	2.53	10.62	18.65	43.08	1313	3517.43	0.97	3411.90	3670.46	12	13.33
2		6.33			1173.0	1175.6	659	516.6	2.27						1405	3765.16	1.01	3783.99		13	
3		6.39			1170.0	1172.2	655	517.2	2.26						1438	3854.03	0.99	3815.48		15	
1	72	6.39	3.70	7	1164.3	1168.5	654	514.5	2.26	2.27	2.53	10.32	18.39	43.85	1350	3617.06	0.99	3580.89	3654.20	14	13.33
2		6.36			1150.6	1155.8	652	503.8	2.28						1435	3845.95	1.00	3836.33		13	
3		6.37			1160.8	1164.6	649	515.6	2.25						1330	3563.20	1.00	3545.39		13	
Especificaciones					Mínimo					2		3						750		8	
					Máximo					3		18						-		16	

Fuente: Elaboración propia

Gráficas 3.11. De ensayo Marshall daño por humedad



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN
DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

4.1 Análisis e interpretación de resultados

En éste capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, realizados con los agregados utilizados, en base a la normativas además en muchos casos se coincide con normas internacionales comúnmente aceptadas en nuestro medio como las normas ASTM y AASHTO , donde se establecen las especificaciones que deben cumplir los agregados para su uso en bases estabilizadas con emulsión asfáltica y los ensayos de laboratorio de comprobación que sirvan para la aceptación de las mismas.

El presente análisis muestra los resultados basándonos propiedades de las bases estabilizada con emulsión según procedimientos propuestos por el Instituto del Asfalto en su publicación Manual Básico de Emulsiones.

Para el análisis de los datos se utilizaron procedimientos comunes como son la comparación de diferentes propiedades de la mezcla compactada contra el contenido de Emulsión Asfáltica.

4.2. Resultados de laboratorio obtenidos

4.2.1. Análisis Granulométrico

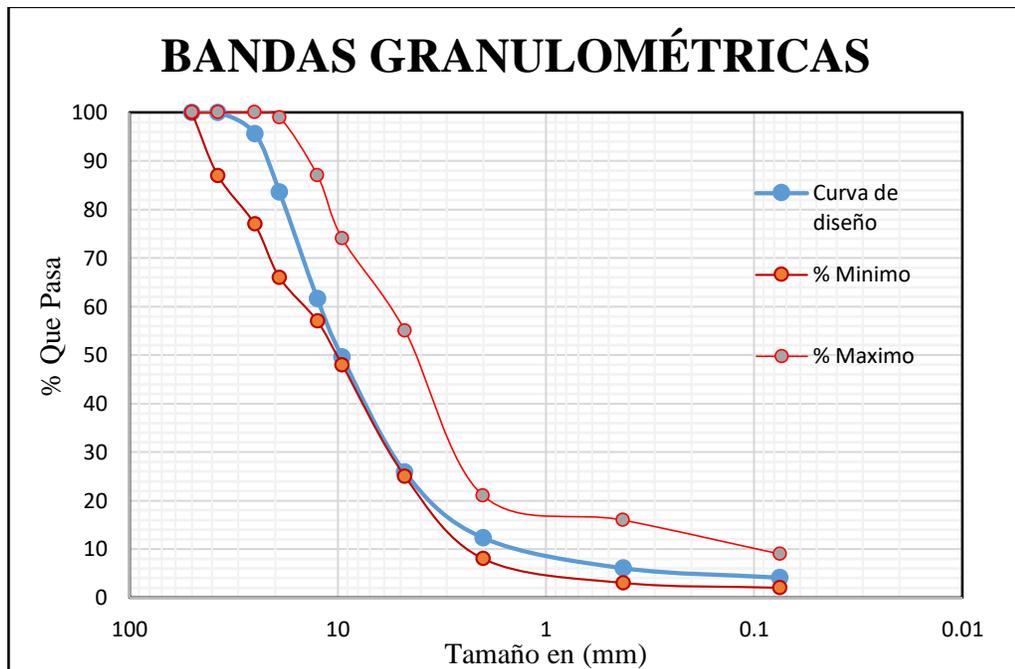
Se realizaron pruebas granulométricas a la muestra de agregados pétreos, utilizando la norma (ASTM D-422, AASHTO T-88), es importante analizar e interpretar los resultados obtenidos, estos se comparan con los criterios señalados en el Asphalt Academy, 2009 para bases estabilizadas con emulsión asfáltica la cual establece los límites de las granulometrías para los agregados empleados en este diseño. En el cuadro 4.1. se presentan los rangos requeridos de las gradaciones para los agregados pétreos. Comprobando el cumplimiento de normas se procede a la catalogación de este material para su uso como base estabilizada con emulsión.

Tabla 4.1. Rangos requeridos de granulometría

Tamices (mm)	Tamices	% Mínimo	% Que pasa del total	% Máximo
50	2"	100	100,0	100
37,50	1 1/2"	87	100,0	100
25,00	1"	77	95,7	100
19,00	3/4"	66	83,6	99
12,50	1/2"	57	61,6	87
9,50	3/8"	48	49,6	74
4,75	N°4	25	25,8	55
2,00	N°10	8	12,3	21
0,425	N°40	3	6,0	16
0,075	N°200	2	4,1	9

Fuente: Asphalt Academy, 2009

Gráfica 4.1. Bandas granulométricas



Fuente: Elaboración propia

Con base a los resultados del análisis granulométrico obtenido se puede verificar que el material pétreo empleado es apto para ser usado en el diseño de la mezcla.

4.2.2. Análisis de los resultados a los agregados pétreos

Con los respectivos resultados de cada una de las pruebas de laboratorio realizadas a los agregados pétreos, utilizados para el diseño de la mezcla en frío, se plantea a continuación el análisis e interpretación (comparación con criterios normados) para cada ensayo.

Tabla 4.2. Rangos y resultados de los agregados pétreos

Ensayos	Método	Resultados	Unidad	Especificación
Límite líquido	(ASTM D-4318)	22	(%)	35 (%) Máx.
Límite plástico	(ASTM D-4318)	15	(%)	
Índice de plasticidad	(ASTM D-4318)	7	(%)	10 (%) Máx.
CBR a 95 (%)	(AASHTO T193)	37,74	(%)	25-80
Proctor modificado	(AASHTO T-180)		(%)	
Densidad máxima seca	(AASHTO T-180)	2,28	(%)	
Contenido óptimo de humedad	(AASHTO T-180)	7,5	(%)	
Equivalente de arena	(ASTM D-2419)	68,54	(%)	50 (%) Mín.
Peso específico y absorción del agregado grueso	(ASTM D 127)	2,74	(%)	
			(%)	
Peso específico y absorción del agregado fino	(ASTM D 128)	2,58	(%)	
			(%)	
Abrasión de los ángeles	(ASTM C 131)	29,68	(%)	35 (%) Máx.

Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados se determinó, que el material empleado para el diseño, posee una buena aceptación debido a que los porcentajes de los ensayos en relación con la especificación cumplen con los rangos estipulados, por lo que se considera un excelente material para la construcción de capas base, ya que este debe ser capaz 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.

4.2.3. Análisis de resultados de la emulsión asfáltica (CSS1)

Una vez realizados los ensayos de caracterización de emulsión asfáltica 60/40 se tiene los resultados mostrados en la Tabla 4.3. Todos los datos se encuentran dentro del rango de confianza, cumpliendo con las especificaciones técnicas exigidas para garantizar la calidad de la emulsión asfáltica.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos de emulsión asfáltica (CSS1)

Ensayos	Método (ASTM)	Resultados	Unidad	Especificación
Viscosidad de Saybolt Furol a 25°C	(D-244)	24,34	(SSF)	0-90
Sedimentación, máx.	(D-6930)	2,40	(%)	5
Carga de la partícula	(D-244)	-	-	positiva
Solvente destilado	(D-6997)	36,83	(%)	-
Residuo seco, máx.	(D-6997)	61,37	(%)	65
Penetración a 25°C (100 g e 5s)	(D-5)	57,7	(mm.)	40-150
Ductilidad a 25°C, mín.	(D-113)	121,67	(cm.)	100(mín.)
Punto de Ablandamiento	(D-36)	61,83	(°C)	55(mín.)

Fuente: Elaboración propia

4.3. Análisis de los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall

4.3.1. Análisis de la estabilidad seca y húmeda vs asfalto residual

Los resultados logrados del ensayo se presentan en el cuadro 4.4.

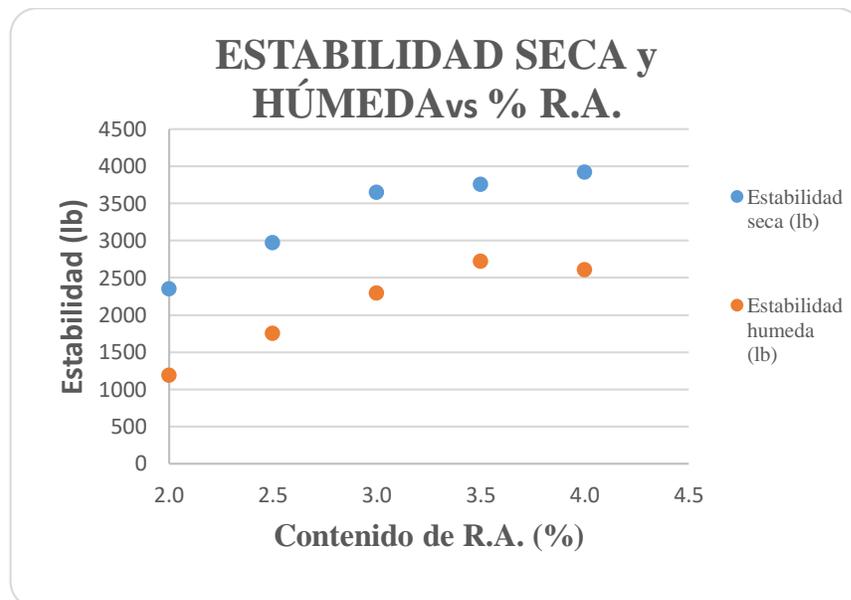
Analizando el gráfico de Estabilidad y comparando los resultados obtenidos de la Estabilidad húmeda contra la Estabilidad seca, se puede mencionar que existe una disminución de la estabilidad húmeda con respecto a la estabilidad seca (Pérdida de Estabilidad), esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante 1 día, esta condición nos permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión y adhesión en la mezcla. Básicamente se trató de poner de manifiesto uno de los mayores problemas que produce la presencia de agua en una mezcla asfáltica: la pérdida de cohesión con la consiguiente disminución de la capacidad portante de la misma. Con tal motivo se procedió a evaluar la resistencia de la mezcla compactada en su estado “seco” como así también luego de un determinado período de inmersión en agua, de modo de cuantificar desde este punto de vista los efectos, en los aspectos mecánicos originados por el contacto de la mezcla asfáltica con el agua.

Tabla 4.4. Análisis resultados de estabilidad seca y saturada

Asfalto residual (%)	Estabilidad seca (libras)	Estabilidad saturada (libras)	Pérdida estabilidad (%)
2	2355,09	1190,77	49,4
2,5	2973,75	1756,26	40,9
3	3653,18	2296,34	37,1
3,5	3761,91	2722,40	27,6
4	3924,28	2607,90	33,5

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2. Estabilidad seca y estabilidad saturada vs R.A.



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Análisis vacíos totales máximos vs asfalto residual

Los vacíos totales máximos (VTM) son los espacios intergranulares ocupados por el aire más humedad en la mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Los valores mostrados en la cuadro 4.5 son los equivalentes a cada contenido de asfalto residual, inicialmente los valores de VTM disminuyen de 18,83% hasta un valor mínimo de 15,55% al incrementar el contenido de asfalto residual como se presenta en el gráfico, luego aumenta hasta un máximo de 15,88% cuando el porcentaje de asfalto residual está en el punto más alto, exhibiendo una curva en forma de U. A medida que se incrementa el contenido de asfalto en la mezcla, esta se vuelve más

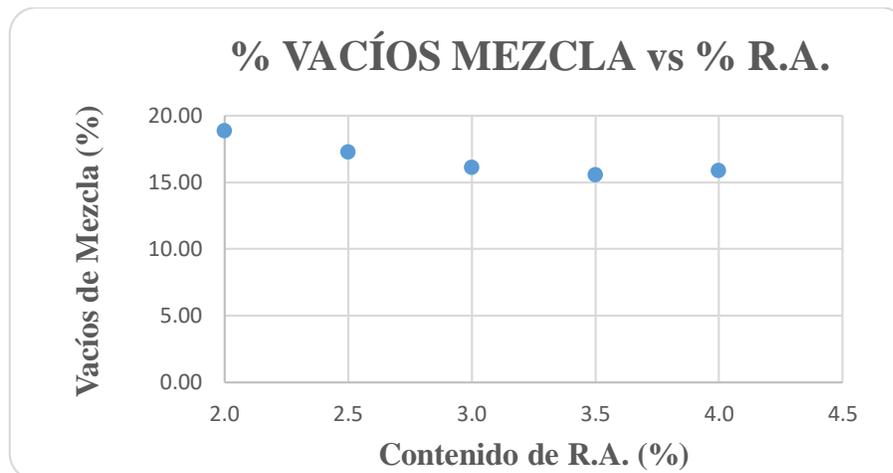
trabajable y se compacta más fácilmente, luego en algún punto del rango más bajo de Porcentaje de Asfalto Residual (2,5% - 4%), cuando el contenido de asfalto sigue aumentando, el VTM empieza a incrementarse debido a la mayor dificultad en la compactación, por consiguiente, la densidad de la mezcla disminuye al aumentar los VTM causados por el aumento excesivo del residuo asfáltico.

Tabla 4.5. Análisis de resultados de porcentaje de vacíos de mezcla

Asfalto residual (%)	% De vacíos de mezcla total (%)
2	18,83
2,5	17,24
3	16,10
3,5	15,55
4	15,88

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.3. Porcentaje de vacíos vs residuo asfáltico



Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Análisis de densidad vs asfalto residual

Otro aspecto considerado en el estudio fue la densidad de la briqueta. Una vez realizado el ensayo de las treinta (30) Briquetas se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 4.6.

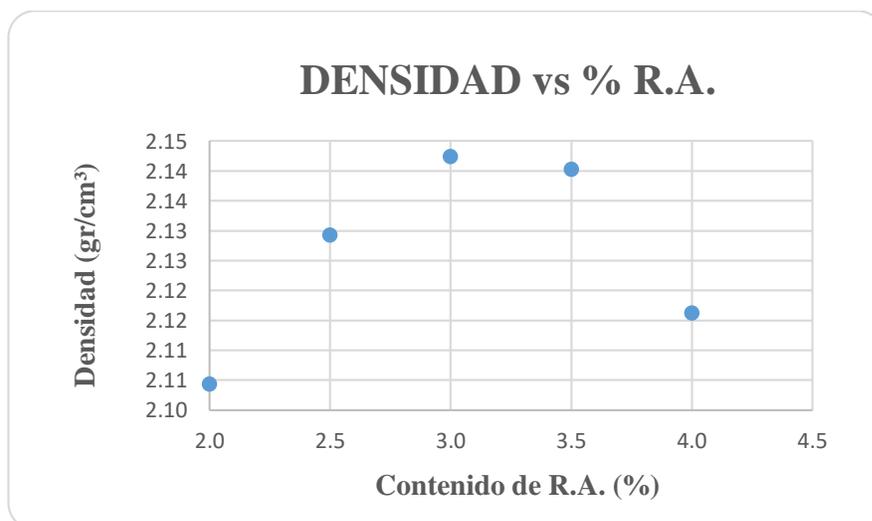
Los cuales cumplen con los requerimientos para ser utilizados como capas base y sub base que son aplicables únicamente a materiales que tienen densidades netas entre 2000 y 3000 Kg/cm³ donde se puede observar que inicialmente densidad va aumentando y que a medida que se incrementa el contenido de asfalto residual en la mezcla a partir del 3.5 % la densidad disminuye.

Tabla 4.6. Análisis de resultados de densidad

Asfalto residual (%)	Densidad promedio (gr/cm ³)
2	2,10
2,5	2,13
3	2,14
3,5	2,14
4	2,12

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.4. Densidad real vs residuo asfáltico



Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Análisis de la Pérdida de estabilidad (%) vs asfalto residual

Para las probetas elaboradas en el diseño de la mezcla (treinta briquetas) se emplearon dos (2) grupos de probetas, ambos grupos curados (72) horas en el horno, uno de estos grupos se ensayó en seco, el otro se sometió a inmersión durante 24 horas.

La pérdida de estabilidad para los contenido de Asfalto Residual como se muestra en la tabla 4.7 se encuentran bajo el mínimo establecido por la Norma (50 máx.), esta pérdida de estabilidad surge a partir de la diferencia de estabilidad al ensayar las briquetas en estado seco y estado húmedo se observa particularmente la tendencia a perder mayor estabilidad cuando el contenido de Asfalto Residual es muy bajo o muy alto sin embargo aun así estas pérdida se encuentran dentro del mínimo establecido significa, ya que bajo esta condición de humedad la mezcla tendería a mantener la cohesión interna.

Es conveniente comentar que, generalmente, para las emulsiones catiónicas y aniónicas, este valor (pérdida de estabilidad) disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto residual. (Instituto del asfalto).

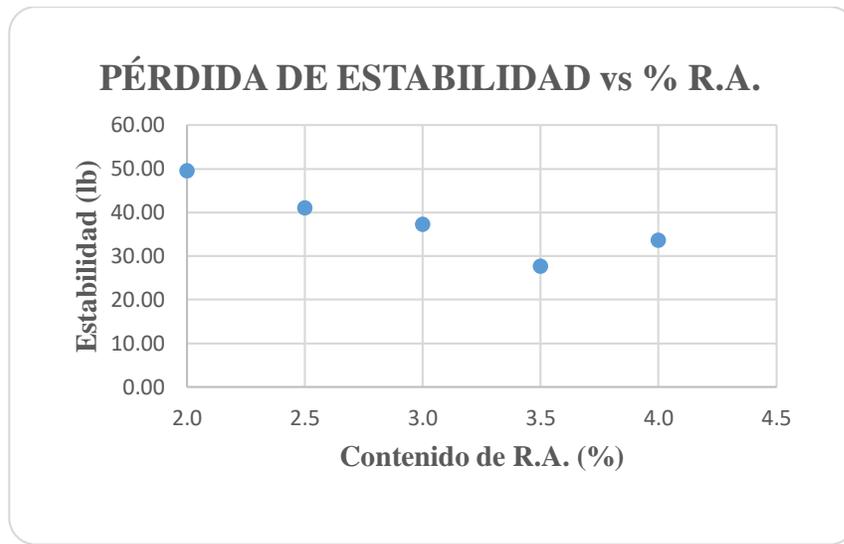
En nuestro caso esto no ocurre, como se muestra en el Gráfico; sin embargo, los valores de Pérdida de Estabilidad obtenido, están cumpliendo con las especificaciones para capas base, ya que estos valores no superan al máximo establecido en la Norma (50%).

Tabla 4.7. Análisis de resultados de la pérdida de estabilidad

Asfalto residual (%)	Pérdida estabilidad (%)
2	49,44
2,5	40,94
3	37,14
3,5	27,63
4	33,54

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.5. Cambio de estabilidad vs residuo asfáltico



Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Análisis de flujo de briqueta seca y húmeda vs asfalto residual

Los valores reportados del flujo en las pruebas tanto de briquetas húmedas como secas se muestran en la tabla 4.8.

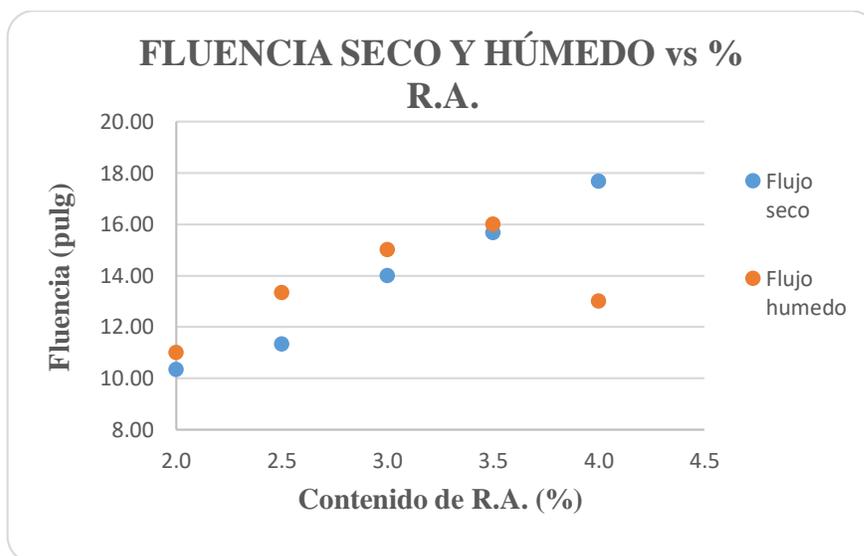
Como se muestra en el gráfico, los valores de flujo aumentan con los incrementos en el contenido de Asfalto Residual hasta un máximo de 17,67 1/100". El cual no está dentro del límite de la especificación (8 mín. – 16 máx.), sin embargo el valor de flujo para el contenido de asfalto residual óptimo presentó un valor de 15,63 1/100" el cual está dentro del límite de la especificación y para el cual el Contenido de Asfalto es 3,7%.

Tabla 4.8. Análisis del ensayo de flujo

Asfalto residual (%)	Flujo seco (1/100")	Flujo saturada (1/100")
2	10,33	11,00
2,5	11,33	13,33
3	14,00	15,00
3,5	15,67	16,75
4	17,67	13,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6. Fluencia vs residuo asfáltico



Fuente: Elaboración propia

4.3.6. Análisis de daño por húmeda vs tiempo

Los resultados logrados del ensayo se presentan en el cuadro 4.9.

Analizando el gráfico de Estabilidad y comparando los resultados obtenidos de la Estabilidad húmeda contra la Estabilidad seca, se puede mencionar que existe una disminución de la estabilidad húmeda con respecto a la estabilidad seca (Pérdida de Estabilidad) ya que la estabilidad disminuye de 5199.36 lb a 3565.34 lb, esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante 0.5,8,16,24,72 horas esta condición nos permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión y adhesión en la mezcla pero al obtener resistencias muy por encima de las normas establecidas de 750 lb y flujo de 8 a 16 (1/100”) determinamos que será una opción duradera y viable para aplicar en nuestro país. Básicamente se trató de poner de manifiesto uno de los mayores problemas que produce la presencia de agua en una mezcla asfáltica la pérdida de cohesión con la consiguiente disminución de la capacidad portante de la misma. Con tal motivo se procedió a evaluar la resistencia de la mezcla compactada en su estado “seco” como así también luego de unos determinados períodos de inmersión en agua, de modo de cuantificar desde este punto de vista los efectos, en los aspectos mecánicos originados por el contacto de la mezcla asfáltica con el agua .

Tabla 4.9. Análisis del ensayo de flujo

Asfalto residual (%)	Estabilidad seca (libras)	Estabilidad saturada (libras)	Pérdida estabilidad (%)
0,5	5199,36	5199,36	0
8	5199,36	4569,11	12,12
16	5199,36	4088,38	21,37
24	5199,36	3670,46	29,41
72	5199,36	3565,34	31,43

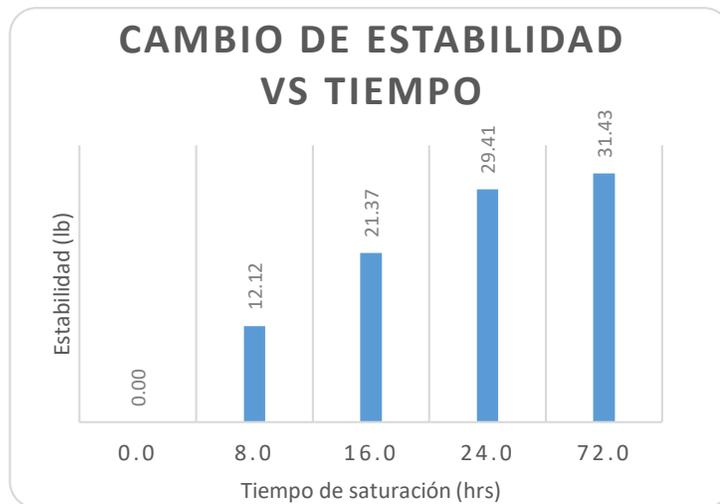
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7. Estabilidad saturada vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.8. Pérdida de estabilidad vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

4.3.7. Análisis estadístico

Para la validación de la hipótesis planteada en esta investigación a partir de los resultados obtenidos de la estabilidad en 30 briquetas con el porcentaje óptimo de 3,7 % de asfalto residual, se analizará tomando en cuenta el nivel de confiabilidad de 750 lb establecido por norma de los resultados de la mezcla.

Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es la técnica matemática que obtiene, organiza, presenta y describe un conjunto de datos con el propósito de facilitar el uso generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas. Además, calcula parámetros estadísticos como las medidas de centralización y de dispersión que describen el conjunto estudiado. Se usará este procedimiento para describir las características y comportamientos de cada uno y, de forma general, de los grupos de estudio mediante medidas de resumen, tablas y gráficos.

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.
Estabilidad (lb)	2665,84	2689,36	0	379,59
Flujo (1/100)"	13,60	13	13	3,34
Densidad (gr/cm ³)	2,32	2,32	2,33	0,023
Vacíos (%)	4,55	4,45	5,49	0,9376

4.3.7.1. Planteamiento de prueba de hipótesis

Para la validación de la hipótesis planteada en esta investigación a partir de los resultados obtenidos de la resistencia (estabilidad) de mezclas asfálticas frío, se analizará tomando en cuenta el nivel de confiabilidad de los resultados de 30 muestras rotas en la prensa Marshall.

Prueba de hipótesis

Hipótesis alternativa → Estabilidad media \geq estabilidad mínima 750 lb.

$$H_a: \bar{x} \geq \mu$$

$$H_a: 2665,84 \geq 750$$

Hipótesis nula → Estabilidad media $<$ estabilidad mínima 750 lb.

$$H_0: \bar{X} < \mu$$

$$H_0: 2665,84 < 750$$

Al realizar la prueba de la hipótesis planteada para esta investigación “El ensayo Marshall” indican que los especímenes de mezclas asfálticas elaboradas en frío, proporciona resistencias altamente confiables” se concluye que es válida la hipótesis.

4.3.7.2 Estadística inferencial

La estadística inferencial corresponde al tipo de conclusiones basadas en premisas que son totalmente verdaderas y comprobables, por lo cual los resultados son certeros, permitiendo establecer conclusiones seguras.

Media aritmética de la muestra

$$\bar{X} = 2665,84$$

4.3.7.2.1. Nivel de confianza al 90 % Z-student

El nivel de confianza es una probabilidad de que el valor medido se encuentre dentro de un intervalo de confianza, se lo expresa en porcentaje desde 90% hasta 99%.

\bar{X} = Media muestral

μ = Media poblacional

σ = Desviación típica

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma}$$

Media muestral

n = Tamaño de la muestra

xi = Valor de cada medición

$$\bar{X} = \frac{\sum xi}{n}$$

$$\bar{X} = 2665,84$$

Media poblacional

N = Tamaño de la población

x_i = Valor de cada medición

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N}$$

$$\mu = ?$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$S = 379,59$$

Desviación típica

$$\sigma^2 = \frac{S^2}{n}$$

$$\sigma = 69,30$$

Tamaño de la muestra

$$n = 30$$

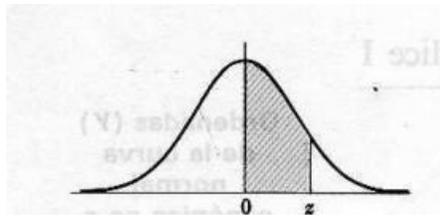
Nivel de confianza

$$\alpha = 90 \%$$

$$\alpha = 0,9$$

$$\alpha/2 = 0,45$$

$$Z = 1,64$$

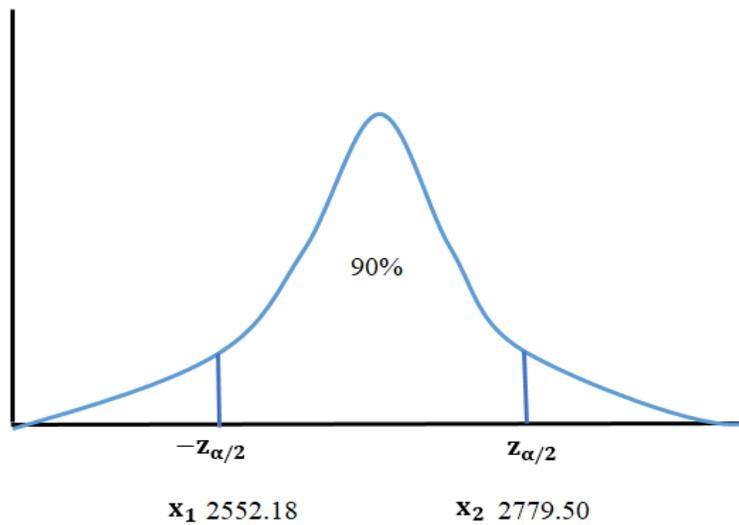


Variable z	Curva canónica entre 0 y z
1.6	0,4452
1.64	0,45
1.7	0,4554

Intervalo de confianza para μ

$$x_1 = \bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad x_2 = \bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Gráfica 4.9. Intervalos de confianza



Fuente: Elaboración propia

A partir de la media muestral (\bar{X}) generamos un intervalo de confianza dentro del cual tenemos un 90 % de seguridad que la media poblacional (μ) estará entre 2552,18 y 2779,50 lo cual nos da un nivel de confianza ya que la media poblacional está muy por encima de las 750 lb establecidos por norma. A lo cual los resultados de confiabilidad obtenidos en esta investigación cumplen con lo mencionado anteriormente, por lo tanto, se considera la validez de la hipótesis planteada

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de haber realizado el estudio investigativo sobre el diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en la metodología Marshall, se pueden considerar las siguientes conclusiones.

De acuerdo a los resultados de la investigación realizada se logró determinar que los parámetros mecánicos (estabilidad y flujo) obtenidos en la mezcla en frío, están dentro del rango que se demandan para un diseño, bajo la metodología Marshall por tanto a partir de esto se deduce que una mezcla en frío es aceptable para ser empleados en capas base.

Utilizando la mezcla de emulsión asfáltica (catiónica de rotura lenta CSS -1) y el material granular de la cantera se cumplió con los valores mínimos establecidos en el manual básico de emulsión asfáltica N° 19.

Aunque el porcentaje de finos sea adecuado, se recomienda que siempre deba utilizarse algún filler comercial como el cemento portland o la cal hidratada para poder minimizar el efecto perjudicial de la humedad.

Para este material es posible utilizar aún menores contenidos de asfalto residual que cumplan con las especificaciones, dado que los resultados obtenidos dieron muy por arriba de las mismas.

El empleo de bases estabilizadas con emulsión asfáltica es una gran alternativa para la pavimentación de vías y brinda la oportunidad de optimizar recursos con las ventajas de. Disminución del espesor de la carpeta asfáltica, la aplicación de la emulsión asfáltica se lo realiza a temperatura ambiente, disminuye el impacto ambiente, no libera ningún gas de hidrocarburo a la atmósfera.

La base granular al ser estabilizada con emulsión asfáltica, no fue necesario de incorporar un material filler (cemento, cal), debido a que la base granular existente tiene un índice de plasticidad menor al 10 % establecido por norma.

La estabilización de suelos con emulsión asfáltica es una opción viable debido a su gran versatilidad, respecto a su resistencia de acuerdo a resultados obtenidos se observa cierta

susceptibilidad al daño por humedad ya que la estabilidad disminuye de 5199.36 lb a 3565.34 lb después de un tiempo de saturación de 72 horas, pero al obtener resistencias muy por encima de las normas establecidas de 750 lb y flujo de 8 a 16 (1/100") determinamos que será una opción duradera y viable para aplicar en nuestro país.

5.2. Recomendaciones

Para realizar los ensayos de laboratorio se recomienda utilizar varias guías, tales como el manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, el Manual del instituto del asfalto, el Manual de laboratorio de asfaltos, etc., los cuales indican y dan recomendaciones acerca de cómo se debe de realizar los ensayos correctamente.

Utilizar emulsiones asfálticas, porque desde el punto de vista ecológico lo único que libera al medio ambiente es agua, por este motivo no es inflamable y las emanaciones de vapores de hidrocarburos hacia la atmósfera son casi nulas.

Aplicar la técnica de la preparación para mezclas en frío con emulsiones asfálticas ya que con un correcto curado obtenemos resultados que superan los límites de diseño En los diferentes usos de las emulsiones asfálticas, el de mezclas frías como tanto en estabilizaciones y mezclas asfálticas.

La estabilización de una base granular con emulsión asfáltica no es muy difundida en Bolivia, por lo que se recomienda hacer más estudios e investigaciones.

Se recomienda calcular el contenido óptimo de emulsión asfáltica y el contenido óptimo de agua de amasado ya que un suelo húmedo se mezcla con mayor facilidad con la emulsión que un suelo que está totalmente seco.

Cada vez que se piense realizar un proyecto de repavimentación, se recomienda tomar como alternativa la estabilización de una base granular ya que para el estudio realizado de este proyecto arrojó resultados positivos.

Se recomienda que su aplicación sea en épocas secas y soleadas, debido a que el clima ayudará a que la mezcla pueda eliminar más rápidamente el agua contenida y llegue de manera más acelerada a las resistencias adecuadas.

