

CAPÍTULO I
DISEÑO TEÓRICO Y
METODOLÓGICO

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1. Introducción

En la actualidad las vías de comunicación tienen una función esencial y es de facilitar el transporte tanto de personas como de bienes con total comodidad y seguridad haciendo necesaria la provisión de una red que satisfaga estas necesidades, sin embargo, todo esto se encuentra sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos factores, conjuntamente con el envejecimiento natural de los materiales hacen que el pavimento sufra un proceso progresivo de deterioro. Por tanto, este envejecimiento y deterioro del pavimento asfáltico implica la disminución gradual de los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al paso del tiempo es necesario una operación de conservación.

La rehabilitación o reconstrucción de las vías durante o al final de su vida útil es de gran importancia debido a que involucra importantes inversiones por los recursos que moviliza. El costo necesario para su manutención, así como los problemas ambientales que incluyen el agotamiento de recursos naturales (agregados y aglutinantes asfálticos), justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio.

Por eso, el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en la mezcla de pavimentos asfálticos es una estrategia, y parte de una alternativa sostenible en los pavimentos. Varios estudios han demostrado que agregar materiales reciclables al pavimento puede reducir los impactos ecológicos y sociales y así también reducir los costos del ciclo de vida de la misma manera.

Sin embargo, para obtener tales beneficios, se debe asegurar la durabilidad de la mezcla asfáltica, siempre que la selección y proporción de los materiales asfálticos, agregados pétreos y rap deben lograr al menos un desempeño similar al de la mezcla virgen. En este caso, uno de los problemas que surgen al utilizar rap es que el asfalto se oxida gradualmente provocando que su rigidez aumente, lo que hace que su ductilidad disminuya y sea más propensa a fracturarse, a consecuencia de esto se espera que las mezclas que tengan un contenido de rap puedan ser más susceptibles al agrietamiento.

Un diseño adecuado de las mezclas con rap se debe considerar la rigidez – flexibilidad del material asfáltico presente en el rap, material asfáltico virgen y las proporciones de estos materiales en la mezcla final. Seleccionar el material asfáltico virgen implica muchas veces la modificación de los asfaltos con aditivos, que, combinándose con el asfalto envejecido del RAP, disminuye la susceptibilidad de agrietamiento en las mezclas asfálticas con RAP. A partir del trabajo de Kandhal *et al.*, una investigación realizada por Texas A&M por Glover y Davison (2005) presentan un nuevo parámetro para evaluar la durabilidad del asfalto. El parámetro inicial de Glover y Davison considero una forma mecánica para correlacionar la ductilidad.

1.2. Justificación

Este proyecto de aplicación pretende principalmente dar un aporte, que permita el interés en la realización de más investigaciones para poder verificar las ventajas del uso de mezclas asfálticas con RAP, evaluando sus propiedades mecánicas por lo que se realizara un estudio experimental que nos ayude a comprender de manera certera el comportamiento de este tipo de materiales.

Debido a que en nuestro país el uso de materiales reciclados en la industria de la construcción crece a un paso muy lento, se pretende sumar este estudio a la práctica con el fin de brindar el conocimiento suficiente sobre el comportamiento de mezclas asfálticas con RAP, vale la pena comenzar a incorporar estas mezclas para verificar las bondades que pueden aportar al mejoramiento de nuestros pavimentos.

Existen un sin fin de pavimentos en des uso que se encuentran votados a los costados de las carreteras o en cualquier otro lugar que no sea apto, estos desechos presentan elevadas toxinas que dañan a los suelos orgánicos, erosionándolas y haciéndolas vulnerables para el cultivo de alguna vegetación. Al reutilizar el RAP, se disminuye el impacto ambiental que pueden generar estos desechos cuando son votados en cualquier lugar, es por eso que se pretende reutilizar este RAP, de esta forma se puede generar una nueva solución para estos desechos, dándole así una nueva utilidad.

Es así que al usar el reciclado de los pavimentos asfálticos deteriorados (RAP) se pretende disminuir el costo de la carpeta asfáltica, cumplir con las exigencias medioambientales y

que la implementación de RAP se convierta en una alternativa cada vez más utilizada por las empresas constructoras de caminos.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problemática

El problema principal de pavimentos asfálticos es la gran cantidad de recursos financieros que se invierte en las reparaciones para alcanzar la vida útil y de servicio en condiciones adecuadas en las carreteras.

Las mezclas asfálticas convencionales utilizadas en la construcción tienen propiedades y características que en la actualidad no son suficientes para satisfacer las necesidades debido al incremento de flujo vehicular, por esta razón buscamos soluciones que ayuden a mejorar las características de los asfaltos y su comportamiento.

El pavimento flexible de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la climatología, estos dos factores junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que la carpeta sufra un proceso progresivo de deterioro, lo cual conlleva a una disminución paulatina de los niveles de seguridad y confort del tráfico que sobrepasan ciertos valores y hacen necesaria la conservación de las vías, por ello surgen nuevas técnicas para crear mezclas asfálticas más resistentes, de mejores características, ya que las mezclas convencionales limitan las mismas.

Las fallas de fisuración que presenta un pavimento flexible debido a las cargas de tráfico, rigidización de mezclas asfálticas, variación brusca de temperatura, causando contracción y dilatación del pavimento asfáltico. Motivo por el cual se busque alternativas de nuevas mezclas asfálticas que disminuyan o contraigan los efectos descritos.

1.3.2. Problema

¿Será que a través de la incorporación de RAP en las mezclas asfálticas se podrá lograr un comportamiento cuyas propiedades sean similares al de una mezcla convencional y ésta pueda ser utilizada?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Realizar la aplicación del parámetro Glover - Rowe para la optimización de RAP en una mezcla asfáltica en caliente, para su reutilización en carpetas asfálticas.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Profundizar en el conocimiento de los pavimentos, su estructura, características, comportamiento y evaluación.
- Realizar ensayos de caracterización a los agregados y del cemento asfáltico e identificar si cumplen con las especificaciones técnicas descritas en la norma para ser utilizados en la elaboración de mezclas.
- Determinar por medio del parámetro de Glover Rowe el porcentaje óptimo de Rap y evaluar su factibilidad.
- Realizar la dosificación de la mezcla para encontrar un contenido de RAP que sea óptimo con el fin de obtener una mezcla de mejores condiciones técnicas.
- Elaborar y evaluar probetas de investigación con distintos porcentajes de rap para determinar el porcentaje más óptimo.
- Analizar los resultados obtenidos mediante pruebas de laboratorio con el propósito de obtener los valores de la condición estructural de la mezcla con la incorporación de RAP.
- Establecer las conclusiones y las recomendaciones de la investigación realizada aplicando el parámetro Glover Rowe en mezclas asfálticas con RAP incorporado.

1.5. Hipótesis

Si incorporamos a una mezcla convencional de pavimento, con aplicación del parámetro de Glover Rowe y distintos porcentajes de RAP, entonces podemos evaluar y analizar sus propiedades y comportamiento que tiene la mezcla asfáltica, cuyos resultados permitirían tomar decisiones técnicas más adecuadas para su empleo.

1.6. Definición de variables independientes y dependientes

- Variable Independiente

Mezclas Asfálticas con la incorporación de RAP

- Variable dependiente

Mezclas Asfálticas

1.6.1. Operacionalización de variables

Tabla 1. Variable Dependiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Dimensión	Dimensión
Mezcla Asfáltica con incorporación de RAP	Esta mezcla se basa en la incorporación de un porcentaje de RAP	Caracterización de las Mezclas Asfálticas	Estabilidad, deformación, porcentajes de vacíos, peso volumétrico	Metodología Marshall

Fuente: Elaboración propia

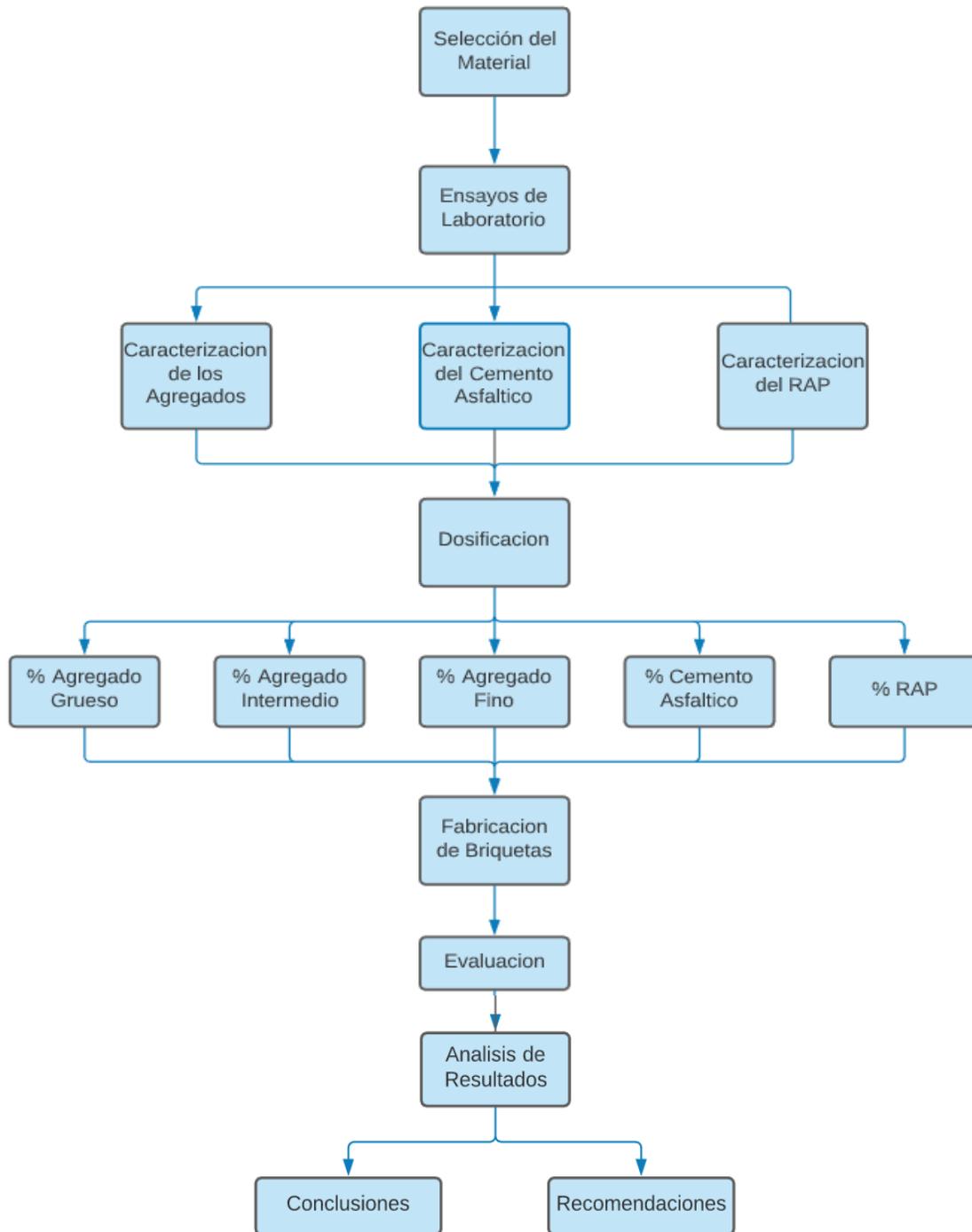
Tabla 2. Variable Independiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Dimensión	Dimensión
Mezcla Asfáltica	Esta formada por una combinación de agregados pétreos, ligante hidrocarbonado	Caracterización de las Mezclas Asfálticas	Cemento Asfáltico convencional	Metodología Marshall

Fuente: Elaboración propia

1.7. Procedimiento de aplicación

Figura 1. Flujograma de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva



Fuente: Elaboración propia

Para este proyecto, se pretende realizar un estudio de propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas cuando a estas se le adicionen RAP; se procederá a hacer el análisis implementando rap en distintos porcentajes, cuyos porcentajes se determinará mediante el parámetro de Glover Rowe se pretende elaborar un mínimo de 30 muestras Evaluar su comportamiento.

Se iniciará con la ubicación y extracción del material, los materiales a usar para la mezcla asfáltica serán el cemento asfáltico, agregados, rap; todos estos materiales serán adquiridos de la planta de Charaja perteneciente al SEDECA de la ciudad de Tarija. el RAP será extraído de un lugar en el tramo Tarija – San Andrés el mismo será triturado y posterior y caracterizado.

Una vez seleccionado el material, se procederá a ser caracterizados para su aplicación. Para caracterizar al cemento asfáltico se deben realizar diversos ensayos, entre ellos se mencionarán los que se realizarán:

- Penetración
- Ductilidad
- Viscosidad
- Ensayo para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland

Con todos estos ensayos se pretende determinar que el cemento asfáltico cumpla con todas las especificaciones que indica la normativa. Posterior a esto, se debe caracterizar a los agregados y rap, con la finalidad de estos cumplan con sus especificaciones que se requiere. Para esto se prevé de realizar los siguientes ensayos:

- Granulometría
- Equivalente de Arena
- Método para determinar la resistencia al desgaste mediante la máquina De Los Ángeles
- Determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso
- Determinación Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino

- Determinación Índice de Aplanamiento y Alargamiento de Agregados para Carreteras

Una vez caracterizados los materiales, se realizará su debida dosificación y mezclado, para poder elaborar las briquetas con los diferentes porcentajes de RAP y someterlas al ensayo del Marshall, y una vez ejecutado el ensayo del Marshall se procederá a evaluar..

Finalmente, se realizará el analisis de resultados para poder establecer las conclusiones de la investigación.

1.8. Alcance de la investigación

El proyecto de aplicación considera realizar un estudio que consiste en la determinación de RAP para una mezcla asfáltica en caliente, es decir, se pretende reutilizar los materiales en desuso y para ello poder incorporarlo a las mezclas asfálticas Vírgenes.

El primer capítulo es de introducción al tema en estudio y en él se definen los aspectos principales del trabajo, así como los antecedentes del estudio y lo que el estudiante propone hacer todo fundamentado correctamente, también este capítulo se plantea la justificación del por qué se propone el proyecto, se describe la situación problemática y se definen los objetivos a ser realizados.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto.

En el tercer capítulo, se realizará toda la aplicación práctica de todos los ensayos a realizar, como ser, la caracterización de los materiales a utilizar, caracterización del cemento asfáltico, fabricación de briquetas y ensayo Marshall

Para el desarrollo de esta investigación primero se procederá a la extracción de la muestra de RAP que será de la carretera Tarija - San Andrés.

Se desarrollará cada ensayo para la caracterización de los agregados, RAP y del cemento asfáltico.

Las briquetas serán elaboradas con cemento asfáltico de penetración 85-100, para agregados gruesos de 3/4", 3/8" y agregado fino que cumplan las especificaciones de la

norma de la ABC., para el cemento asfáltico los ensayos de densidad, ductilidad, penetración, punto de inflamación y punto de ablandamiento. Para los agregados que cumplan las especificaciones de peso específico, desgaste de los ángeles y equivalente de arena.

Posteriormente se evaluarán los resultados obtenidos de las prácticas de laboratorio para poder hacer la aplicación de nuestra mezcla en la plataforma y volver a evaluar, luego a través de tablas comparativas hare uso de la estadística descriptiva para el tratamiento de datos.

Finalmente se establecen las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. Fundamentación teórica

2.1 Pavimentos

2.1.1 Definición

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y constituyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados para darle al usuario comodidad, seguridad, rapidez, y economía.

Los pavimentos necesitan una estructura para que los esfuerzos generados por el tránsito, se vayan disipando a través de las diferentes capas, y lleguen los esfuerzos admisibles a la capa Subrasante.

2.1.2 Estructura de los pavimentos

Un pavimento es un operador que funciona a base de respuestas, cuando es activado por funciones de excitación.

- Físicamente el pavimento es un sistema multicapa, construido por materiales de características mecánicas conocidas, dispuestos en capas de espesor conocido.
- De esta manera, el pavimento está caracterizado por las propiedades, disposición y cantidad de los materiales utilizados, así como de la calidad de la construcción.
- Cuando actúan sobre el pavimento funciones tales como las cargas producidas por el tránsito, se generan respuestas inmediatas del pavimento que obedecen leyes casi identificadas como estados de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones.
- El tiempo transcurrido hasta alcanzar las condiciones de falla constituye el ciclo de vida del pavimento, durante el cual, las condiciones y características del pavimento se degradan con el tiempo dando lugar a una curva de comportamiento, que refleja propiamente el nivel de servicio que el pavimento proporciona al usuario, lo cual tiene a su vez importantes implicaciones de tipo económico.

- El proyecto de un pavimento debe involucrar los aspectos de diseño estructural, materiales y su disposición, tránsito, clima, aspectos constructivos y estrategias de conservación, cuya eficiencia debe juzgarse a través de su evaluación beneficio costo.

2.1.3 Características de un pavimento

- Capacidad para soportar las cargas
- No crear problemas de posible deslizamiento de los usuarios
- Regularidad superficial longitudinal y transversal
- Debe presentar adecuadas condiciones respecto al drenaje
- Bajo nivel de ruido
- Bajo nivel de desgaste de las llantas
- Adecuadas propiedades de reflexión luminosa
- Apariencia agradable

La importancia de construir pavimentos resistentes:

Dado que un gran porcentaje de los accidentes automovilísticos que tienen lugar todos los días en las grandes ciudades están relacionados con el deterioro de las calles, resulta de gran importancia prolongar la vida de los pavimentos. Esto se logra estudiando potenciales cambios en sus diseños, de manera que el desgaste producido por los vehículos afecte tan sólo la capa superficial y no genere daños de tipo estructural. Es evidente que los beneficios de dichos avances repercutirían tanto en la seguridad vial como en la economía.

El pavimento como estructura de vías de comunicación terrestre, formada por una o más capas de materiales, que tiene como función el permitir el tránsito de vehículos:

- Con seguridad.
- Con comodidad.
- Con el costo óptimo de operación.
- Superficie impermeable.
- Color y textura adecuados.
- Resistencia a la repetición de cargas.
- Resistencia a la acción del medio ambiente.

- Que no transmita a la terracería esfuerzos mayores a su resistencia.

2.1.4 Tipos de pavimento

Básicamente existen dos tipos de pavimentos: rígidos y flexibles.

Pavimentos Asfálticos o Flexibles:

Cuando la superficie de rodamiento está constituida por una mezcla asfáltica. Las mezclas pueden ser de concreto asfáltico.

Pavimentos de Concreto o Rígidos:

La superficie de rodamiento está constituida por una mezcla de concreto- cemento.

2.1.4.1 Pavimentos flexibles

En general, están constituidos por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de sub-base las que usualmente son de material granular. Estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada subrasante.

Figura 2. Estructura de un pavimento flexible



Fuente: Adaptación Manual de “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”

MTC, 2013.

La capa de rodadura de un pavimento flexible puede construirse con un hormigón bituminoso, mezclas de arena y betún, o mediante tratamientos superficiales con riegos bituminosos.

Está sometida a los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico.

La capa de base se compone generalmente de áridos, que han sido tratados o no con cemento portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes.

Esta capa tiene como principal función, la de soportar las cargas aplicadas y distribuir estas cargas a la sub-base o al terreno.

La capa de sub-base se compone de materiales menor calidad y costo que los empleados en la capa de base. Se componen de materiales estabilizados o no, o de terreno estabilizado.

Las sub-bases transmiten cargas al terreno y en algunos casos pueden actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo y para prevenir la acción destructiva de las heladas.

2.1.5 Diferencias entre pavimentos de hormigón y asfalto

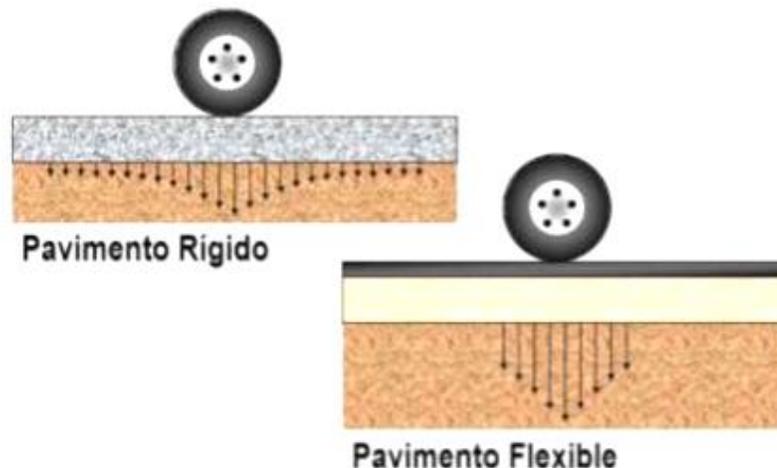
Su principal diferencia es cómo cada uno de ellos transmite las cargas a la subrasante.

La alta rigidez de la losa de concreto le permite mantenerse como una placa y distribuir las cargas sobre un área mayor de la subrasante, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores. Por sí misma, la losa proporciona la mayor parte de la capacidad estructural del pavimento rígido.

Pavimento flexible, está construido con materiales débiles y menos rígidos (que el hormigón), más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo.

Por lo tanto, el pavimento flexible normalmente requiere más capas y mayores espesores para resistir la transmisión de cargas a la subrasante.

Figura 3. Distribución de esfuerzos en un pavimento



Fuente: Adaptación Manual de “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”
MTC, 2013.

2.2. Pavimentos flexibles

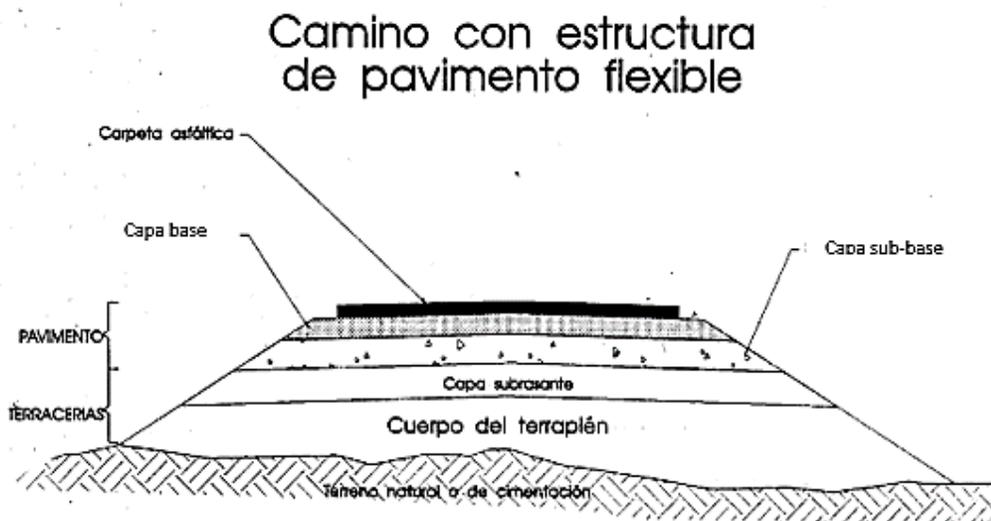
Se denomina pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parquesos.

Es más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base.

2.2.1. Componentes de pavimentos flexibles

Con base a la figura 2.3 se describe los componentes de un pavimento flexible incluyendo aquellas capas que no forman parte del pavimento estrictamente pero que conforman parte de la sección de un camino y que trabajan en conjunto con las capas subyacentes.

Figura 4. Estructuración de pavimento flexible sección transversal



Fuente: Estructuración de vías terrestres Fernando Olivera Bustamante (1994)

Bajo una carpeta bituminosa, formada típicamente por una mezcla de agregado y un aglutinante asfáltico, que constituye la superficie de rodamiento propiamente dicha, se disponen casi siempre por lo menos dos capas bien diferenciadas: una base, de material granular y una sub-base, formada preferentemente, también por suelo granular, aunque el requisito obligue menos que en la base, en el sentido de poder admitir suelos de menor calidad, con mayor contenido de finos y menor exigencia en lo que se refiere a granulometría; la razón es el mayor alejamiento de la sub-base de la superficie de rodamiento, por lo que llegan esfuerzos de menor intensidad.

Bajo la sub-base se presenta casi por lo general otra capa denominada sub-rasante, todavía con menos requisitos de calidad mínima que la sub-base, por la misma razón, pero cuyo fundamental papel mecánico se discute cada vez menos. Finalmente, bajo la sub-rasante aparece el material convencional de la terracería o terreno natural.

2.2.1.1. Terracería o terreno natural

Las terracerías son el volumen de material que se extrae o sirve de relleno para la construcción de una vía terrestre. Si se necesita extraer material fuera de la línea de corte se tendrán zonas de préstamo. Si están entre 10 y 100 m.

Se les llaman préstamo lateral. Si las zonas de préstamo se encuentran a más de 100 m se denominan préstamos de banco. Las terracerías en terraplén se dividen en dos zonas; El cuerpo del terraplén que es la parte inferior, y la capa sub-rasante con un espesor mínimo de 30 cm. Esto funciona únicamente para caminos donde el tránsito vehicular es menor a 5000 vehículos. Cuando se tiene un camino para un tránsito superior a los 5000; entre el cuerpo del terraplén y la capa sub-rasante se forma una capa llamada subyacente de 50 cm. de espesor.

2.2.1.2 Cuerpo del terraplén

Su finalidad, es dar la altura necesaria para cumplir con las especificaciones geométricas. Resistir las cargas del tránsito que se transfieren por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos al terreno natural.

Según las normas de la ABC, los materiales utilizados para su construcción deben tener un tamaño máximo de 7.5 cm. y un límite líquido menor a 50%. El cuerpo del terraplén debe tener una expansión máxima de 5%, un VRS de 5% mínimo y un grado de compactación de 90%.

2.2.1.3 Capa sub-rasante

La finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

La parte superior de la capa sub-rasante coincide con la línea sub-rasante del proyecto geométrico. Es indispensable tomar en cuenta las especificaciones de la pendiente longitudinal, la altura para las obras de drenaje para que el agua capilar no afecte al pavimento. Para su construcción se necesita compactar dos capas de 15 cm. de espesor mínimo.

Según la norma de la ABC el espesor mínimo de la capa debe ser de 30 cm. El tamaño máximo del material debe de ser de 7.6 cm. Su grado de compactación es del 95% del peso volumétrico seco máximo (P.V.S.M.) El valor relativo de soporte debe de ser mínimo de 20%, la expansión máxima del material es menor a 2%, un límite líquido máximo de

40% y por último un índice plástico máximo de 12%. (Pavimentos Flexibles cap2 Olivera (1994))

2.2.1.4. Capa sub-base

La sub - base es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y su función es:

- Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base.
- Proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede sufrir cambios volumétricos generados al cambiar las condiciones de humedad dando como resultado una disminución en la resistencia de la base.
- Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad.
- Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

Las características de calidad que se buscan en los materiales de sub-base, se muestran en la tabla

Tabla 3. Características de materiales de capa sub-base

Materiales de Sub - base	
Limite liquido máximo	35%
Índice de plasticidad máximo	8%
Densidad compactada mínima	95%
CBR mínimo	40%
Equivalente de arena en porcentaje	30%

Fuente: Manual de carreteras ABC sección 3. Bases y sub-bases de pavimentos

2.2.1.5. Capa base

La base es la capa de material que se construye sobre la sub-base. Los materiales con los que se construye deben de ser de mejor calidad que los de la sub-base, la función de la base es:

- Tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.
- Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub-base.

Aunque exista humedad la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.

Las características de calidad que se buscan en los materiales para base, se muestran en la tabla

Tabla 4. Características de materiales de capa base

Materiales de base	
Limite líquido, en porcentaje (máx.)	25%
Índice de plasticidad máximo	6%
Partículas alargadas y lajeadas máximo	35%
Densidad Insitu mínima	95%
CBR mínimo	80%
Equivalente de arena mínimo	50%
Porcentaje de sales solubles máximo	4%

Fuente: Manual de carreteras ABC sección 3. Bases y sub-bases de pavimentos

2.2.1.6. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es la parte superior de un pavimento flexible. Es una capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base.

Los materiales pétreos son de procedencia de ríos, arroyos o depósitos naturales., que después son procesados en chancadoras o trituradoras de agregados, para ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad.

Se recomienda que las partículas que se utilicen tengan forma esférica, ya que las que son en forma de laja o de aguja pueden romperse muy fácilmente y afectar la granulometría. Las funciones de la carpeta asfáltica son las siguientes:

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito fácil y cómodo para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Resistir la carga de los vehículos. (Olivera, 1994)

2.2.2. Características de pavimentos flexibles

Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

- Resistencia estructural.
- Deformabilidad.
- Durabilidad.
- Costo.
- Requerimientos de conservación.
- Comodidad.

2.2.2.1. Resistencia estructural

La metodología para el análisis de la resistencia de un pavimento es proporcionada por la mecánica de suelos y es sabido, que, en ese campo, las teorías de falla de mayor aceptación por hoy son las del esfuerzo cortante; como consecuencia, en el estudio de los pavimentos flexibles suele considerarse a los mismos esfuerzos como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural.

Las teorías de capacidad de carga de la mecánica de suelos suelen referirse a medios homogéneos e isótropos; la heterogeneidad de la estructura del pavimento flexible, así como su anisotropía, conducen a una primera incertidumbre en el planteamiento teórico de resistencia.

Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los

esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, drenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura.

En resumen, la resistencia de los materiales que forman los pavimentos interesa desde dos puntos de vista:

- a) En cuanto a la capacidad de carga que pueden desarrollar las capas constituyentes del pavimento para soportar adecuadamente las cargas del tránsito.
- b) En cuanto a la capacidad de carga de la capa sub-rasante, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería, para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir, a su vez, esfuerzos a la terracería a niveles convenientes.

2.2.2.2. Deformabilidad

En los pavimentos las deformaciones interesan como es usual en la ingeniería, desde dos puntos de vista; Por un lado, porque las deformaciones excesivas están asociadas a estado de falla, y, por otro lado, porque es sabido que en un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Las cargas de tránsito producen en el pavimento deformaciones de varias clases. Las elásticas son de recuperación instantánea y las plásticas que son aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en los materiales con resistencia a la tensión, colocados en la parte superior de la estructura, en los que puede llegar a generar falla por fatiga si el monto de la deformación es importante y los materiales susceptibles.

2.2.2.3. Durabilidad

La durabilidad está ligada con una serie de factores económicos y sociales del propio camino. En un camino de muy alto tránsito y gran importancia económica se requerirán pavimentos muy duraderos a fin de no tener que recurrir a costosas interrupciones de un tránsito importante.

Una vez fijado el criterio que proporciona la duración deseada en el pavimento, surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla; el efecto del clima y del tránsito dista de estar bien establecido, de manera que su influencia en la vida del pavimento no puede definirse con exactitud.

2.2.2.4. Costo

Como toda estructura ingenieril, un pavimento representa el balance entre la satisfacción de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo, por otro. Un diseño correcto será el que llegue a satisfacer los necesarios requerimientos del servicio a costo mínimo. Naturalmente para lograr el equilibrio podrán seguirse una gran cantidad de posibles líneas de conducta y de aquí emana uno de los aspectos de diseño más inciertos y de los que demandan mayor criterio.

Los pavimentos flexibles requieren menor inversión inicial, pero una conservación más rigurosa.

2.2.2.5. Requerimientos de conservación

Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro.

Se debe de tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetida es otro aspecto que no se puede dejar de lado.

La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.

2.2.2.6. Comodidad

Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto.

La seguridad es muy importante al igual que la estética. (Rico y Del Castillo,1984)

2.3. Definición de asfalto

Es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas. También es utilizado en impermeabilizantes. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen.

Propiedades deseables:

- Alta elasticidad a elevadas temperaturas
- Suficiente ductilidad a bajas temperaturas
- Baja susceptibilidad al cambio de temperatura
- Bajo contenido de parafina
- Buena adhesión y cohesión
- Alta resistencia al envejecimiento

2.4. Mezclas asfálticas

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

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

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.4.1. Características de las mezclas asfálticas en caliente

Estas mezclas en caliente, tienen buen comportamiento en servicio cuando son proyectadas, construidas y apoyadas correctamente. Se deben tener en cuenta para este fin, las siguientes características de servicio:

a) Durabilidad

La mezcla debe ser resistente a los agentes climáticos, particularmente a la acción desintegrante del agua y al alto tránsito. Depende fundamentalmente de la utilización de agregados pétreos sanos, y duros, de un adecuado contenido de cemento asfáltico, de la compactación relativa de la mezcla, del contenido de vacíos, de la calidad del filler en el caso de usarse y de que el material que pasa el tamiz N°40 de la mezcla no tenga plasticidad.

b) Resistencia al deslizamiento

Es necesario contar con un porcentaje de cemento asfáltico óptimo y con un porcentaje de vacíos adecuado. Un exceso de cemento asfáltico en la capa de rodamiento es la causa más común de deslizamiento; Bajo contenido de cemento asfáltico (o una falta de adherencia) y agregados que se pulan con el tránsito, originan una falta de fricción entre los neumáticos y el pavimento durante la acción del frenado, sobre todo en períodos de lluvia o alta humedad. Es necesario contar con un porcentaje de vacíos suficientes, como para el aumento de densidad de la mezcla por la reiteración de cargas, no sea motivo de afloración del cemento asfáltico.

c) Flexibilidad

Es la capacidad de deformarse elásticamente que tiene la mezcla asfáltica, para acompañar sin agrietamientos, ni roturas, las pequeñas deflexiones que sufre la base bajo cargas, por otra parte, debe tener cierto carácter plástico que le permita relajar las tensiones provocadas por las diferencias de temperatura y adaptarse al movimiento de las estructuras viales manteniendo uniforme e íntimo contacto con las capas de apoyo no asfálticas. Está influenciada por la rigidez del cemento asfáltico usado (medido por la penetración o la viscosidad y su susceptibilidad térmica), por un adecuado porcentaje de cemento asfáltico óptimo; por la relación filler-betún y por la relación estabilidad-fluencia.

d) Estabilidad

Puede definirse como la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bajo la acción del tránsito. La mezcla asfáltica compactada es sometida en estado de compresión semi-confinada a esfuerzos de corte. Depende su comportamiento de la forma, tamaño y textura superficial de los agregados; dureza y cubricidad de los mismos; características del cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo; relación filler-betún y grado de compactación.

e) Compactibilidad

La mezcla debe permitir una fácil distribución y una correcta densificación. Los factores que influyen son: tipo de cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo, granulometría, textura y rugosidad del agregado y muy particularmente la forma de las partículas del agregado mineral y la relación filler-betún. Un adecuado porcentaje de arena natural redondeada, asegura una buena trabajabilidad.

El cumplimiento de estas cinco características mencionadas, involucra además de los factores mencionados para cada una de ellas, el especial cuidado de las temperaturas y procesos de mezclado, aplicación y compactación.

2.4.2. Propiedades de las mezclas asfálticas

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.5. Fallas en los pavimentos flexibles

Según Rico y Del Castillo (1984), la tecnología que se ha desarrollado para pavimentos, tiene como meta evitar deterioros y fallas. Se han logrado establecer relaciones de causa - efecto, para desarrollar normas de criterio de proyecto y conservación. En pavimentos, la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos como deterioros simples. El concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de servicio que depende de la exigencia del consumidor. Una falla es algo que se aparta de lo que se consideró perfecto. Las fallas de los pavimentos pueden dividirse en tres grupos:

2.5.1. Falla por insuficiencia estructural

Pavimentos contruidos con material inapropiado en cuanto a resistencia. Se pueden utilizar materiales con buena calidad, pero espesores insuficientes. Esta falla se produce por la combinación de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus espesores.

2.5.2. Falla por defectos constructivos

Pavimentos bien proporcionados y con materiales de buena calidad pero que en su construcción se cometieron errores.

2.5.3. Falla por fatiga

Pavimentos que originalmente estuvieron bien proporcionados y contruidos, con el paso del tiempo y la continua repetición de cargas sufren efectos de fatiga, degradación estructural pérdida de resistencia y acumulan deformaciones.

Aparte de estos tres grupos, también se agrupan por su origen, es decir por el modo en que suceden y se manifiestan. Se separan en tres nuevos grupos que son: por fracturamiento, por deformación y por desintegración. Se relacionan con el efecto del tránsito, las características y estructuración del pavimento y el apoyo que proporciona la terracería. Las fallas por insuficiencia estructural, defecto constructivo o fatiga pueden ser a fin de

cuentas causadas por el fracturamiento, la deformación y la desintegración (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.4. Fallas comunes en los pavimentos

Existen distintas fallas comunes en los pavimentos, entre ellas, se encuentra el agrietamiento en “piel de cocodrilo”, de formación permanente en la superficie del pavimento, fallas por cortante, agrietamiento longitudinal, consolidación del terreno de cimentación.

2.5.4.1. Agrietamiento en “Piel de cocodrilo”

Es un agrietamiento que se extiende sobre toda la superficie de rodamiento. Se da por el movimiento excesivo de una o más capas del pavimento o por fatiga de la carpeta. Es común en pavimentos construidos en terracerías resilientes.

Es típico de bases débiles o insuficientemente compactadas. Puede formarse en lugares donde existe el congelamiento o en lugares que se requiere subdrenaje. Este fenómeno puede ser progresivo generando la destrucción del pavimento, que comienza por desprenderse de la carpeta y la remoción de los materiales granulares expuestos. Es importante estudiar la causa, ya que si es por fatiga el progreso es muy lento, en cambio sí es por deficiencia estructural o por exceso de agua el progreso es muy rápido.

2.5.4.2. Deformación permanente en la superficie del pavimento

De acuerdo con Rico y Del Castillo (1984), la deformación permanente en la superficie del pavimento está asociada al aumento de compacidad en las capas de base o sub-base, debida a cargas excesivas, cargas repetidas o rotura de granos. También puede darse por consolidación en la sub-rasante. Por lo general, el ancho del surco es mayor al ancho de una llanta. (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.5. Fallas por cortante

Se debe a la falta de resistencia al esfuerzo cortante de la base o sub - base. En rara ocasión por falta de resistencia en la sub-rasante. Generalmente se hacen surcos profundos y bien marcados cuyo ancho no excede al de una llanta (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.5.1. Agrietamiento longitudinal

Grietas longitudinales de una abertura aproximada de 0.5 cm. en el área de circulación de las cargas más pesadas. Se debe a movimientos en las capas del pavimento en dirección horizontal. Este fenómeno, se da en la base, en la sub-base y con regularidad en la sub-rasante. El fenómeno se da por congelamiento, deshielo o por cambios volumétricos en la variación de agua en la sub-rasante.

2.5.5.2. Consolidación del terreno de cimentación

La consolidación del terreno de cimentación produce distorsión del pavimento independientemente de los espesores o de su condición estructural. Se pueden producir agrietamientos longitudinales y agrietamientos con trayectoria circular.

2.6. Reciclado de pavimentos

Es el aprovechamiento máximo de sus recursos mediante su reutilización antes de su vertido y eliminación, todo ello con el objetivo de cuidar el medio ambiente, evitar la masificación de los vertederos y contribuir a la disminución en el uso de materias primas naturales.

El reciclado es una técnica de rehabilitación de carreteras que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas.

- a) La crisis energética causante de los significativos aumentos en los precios de los productos derivados del petróleo.
- b) El progresivo agotamiento de las fuentes de obtención de los agregados pétreos de adecuada calidad y el incremento de sus precios en canteras. A estos aspectos debe adicionarse la influencia notable de los costos del transporte cuando los agregados pétreos de calidad se encuentran a considerable distancia de las obras. Factor considerado de significativo peso en los análisis de precios de las obras.

- c) Los aspectos ecológicos y la necesidad de conservar el medio ambiente, son factores que les otorgan actualmente la debida atención de los países más desarrollados, razones por las cuales es notoria la tendencia hacia la reutilización de los materiales existentes en lugar de procedes a la explotación de yacimientos w canteras, contaminando la zona donde se realizan estas actividades.
- d) La crítica disponibilidad de los recursos económicos destinados a proyectos nuevos o su influencia para hacer frente a la continua y efectiva conservación, rehabilitación y reconstrucción de los sistemas viables existentes, ha obligado a estudiar y aplicar técnicas de mantenimientos menos onerosos, pero con un comportamiento similar a las actuaciones convencionales.

2.6.1. Campos De Aplicación Del Reciclaje

El reciclado de pavimentos puede emplearse en aquellos casos en que las fallas pueden atribuirse a:

- a) Elevada rigidez del ligante asfáltico, como consecuencia de su envejecimiento por acción del tiempo.
- b) Desprendimiento de los agregados ocasionado por una falla de adherencia con el asfalto o bien por el envejecimiento del mismo.
- c) Deformaciones plásticas que producen ahuellamiento, ondulaciones, corrimientos, etc. Esto es atribuible, principalmente, a mezclas con baja estabilidad.
- d) Pulimiento de los agregados superficiales que disminuye la resistencia al deslizamiento de la capa de rodamiento.
- e) Afloramiento de asfalto, como consecuencia de una falla en el diseño de la mezcla, que conduce también a superficies propensas al patinaje de los vehículos. f) Fisuras y grietas ocasionadas por fatiga de la carpeta asfáltica (piel de cocodrilo) o bien por contracción producida por efectos térmicos (fisura miento transversal).

2.6.2. Fundamentos de la técnica de reciclaje

La conservación de carreteras es el primer campo de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes. La técnica de reciclado nos permite reutilizar el material extraído del firme basándonos en los siguientes puntos:

- El final de la vida útil de las capas bituminosas de los firmes de carreteras suele producirse como consecuencia de agrietamientos, deformaciones y/o pérdidas de capacidad estructural inadmisibles, no relacionados con los componentes de las mezclas, individualmente considerados.

Los materiales contribuyentes de las mezclas bituminosas mantienen prácticamente intactas las propiedades por las que fueron seleccionados mucho tiempo después de su puesta en obra. El único factor que tendríamos que tener en cuenta es el envejecimiento de su ligante, causado básicamente por las operaciones de fabricación, transporte y puesta en obra. El betún incorporado en la central y el envejecimiento procedente de los materiales reciclados, se combinan perfectamente, de modo que el auténtico ligante de la mezcla final es el obtenido por combinación de los dos betunes. La calidad del reciclado de pavimentos asfálticos es un concepto importante a considerar en el reciclado de mezclas bituminosas y depende de los siguientes factores:

- La oxidación de la mezcla que provoca endurecimiento y pérdida de ductilidad.
- El desgaste y la erosión de los áridos.
- Las deficiencias de la mezcla inicial en variables como el contenido de betún o la distribución granulométrica de los áridos.

2.6.3. Formas de obtención del pavimento asfáltico a reciclar (RAP)

El proceso comienza con la recuperación de los materiales de firmes para un posterior reciclado. Para una demolición del pavimento se emplean dos tipos de técnicas que permitan obtener un material de características diferentes en cada caso. Este hecho condicionar el postproceso a seguir para un óptimo aprovechamiento posterior en los procesos de reciclado en planta.

2.6.3.1. Demolición mecánica

Las capas de firme se remueven con un bulldozer o se levantan con una pala o retroexcavadora generándose un material troceado en bloques que presenta una heterogeneidad de tamaños. Se trata de una técnica usada normalmente en demoliciones en las que no existen requisitos precisos de reutilización posterior o de saneamiento de un determinado espesor del firme mediante fresado. De esta forma, si se quiere utilizar en

procesos de reciclado, será necesario un tratamiento posterior de machaqueo con la finalidad de obtener una granulometría adecuada.

2.6.3.2. Fresado

El fresado es una técnica necesaria cuando se ha de retirar un cierto espesor de firme con el fin de dejar una superficie plana y regular para un extendido posterior de nuevas capas de firme. La granulometría del material fresado es función de las características, el espesor y el estado de la capa a fresar, el tipo de fresadora y la velocidad de avance de la misma. Si no se consigue que el material fresado cumpla las características que se exigen al RAP, hará falta un post proceso de machaqueo o de clasificación previo al de reciclado al igual que en la demolición mecánica.

2.6.4. Importancia del proceso de reciclaje de carpeta asfálticas

El desecho de los materiales envejecidos del firme, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1% a un 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido costo de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

2.6.5. Ventajas del reciclado como técnica de conservación

El Reciclado tiene una serie de ventajas respecto a las alternativas tradicionales de rehabilitación:

Materiales

- Ahorro en asfalto
- Ahorro en áridos

Medio ambiente

- Reducción por concepto de escombros.
- Reducción en la explotación y transporte de nuevos materiales, especialmente asociados al recurso árido Reducción de la contaminación por varios efectos asociados a los sistemas constructivos y productivos, siendo los principales: reducción del ruido, reducción de la emisión de polvo
- Reducción del consumo energético, etc.

Aspectos constructivos

- Se eliminan o corrigen las causas que dieron origen al deterioro
- Se puede mantener cota original del pavimento

Aspectos económicos

- Es muy económico cuando se agregan los costos exógenos

2.6.5.1 Reciclado en caliente

Se trata de una técnica aplicable a materiales bituminosos. El reciclado se puede realizar en planta, este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada, al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales, o in situ, con unos requisitos especiales en el reciclado en situ, provistos de calefactores, que elevan la temperatura de la superficie del firme y facilitan la disgregación del material. Existen 3 modos básicos de aplicar esta técnica:

- El termorreperfilado.
- La termorregeracion.
- Termorreciclado.

2.6.5.2. Reciclado en frío

El reciclado en frío de pavimentos asfálticos, se define como el procesamiento y tratamiento con material bituminoso y/o aditivos químicos, de un pavimento asfáltico existente, sin aplicación de calor, para producir una capa de pavimento restaurado.

2.7. Tipos de reciclado

2.7.1. Reciclaje superficial

Consiste en el tratamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores, generalmente no superiores a los 2.5 centímetros, en casos en que los deterioros del pavimento no sean atribuibles a deficiencias estructurales. Se incluye todo procedimiento en que la superficie es fresada, cepillada o escarificada, triturada y adicionada o no de un agente de reciclaje, con o sin la incorporación de pequeños porcentajes de materiales vírgenes, reacondicionada y recompactada. El proceso puede adelantarse en caliente o en frío y en este último caso el agente de reciclaje, si se requiere, se aplica en forma de emulsión.

2.7.2. Reciclaje en el lugar (in-situ)

Conocido también como reciclaje en frío, consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico hasta una profundidad mayor de 2.5 centímetros, involucrando o no el material de la capa de base. Para el espesor es escarificado y el material trozado resultante es triturado hasta un tamaño adecuado y luego, mezclado con agente reciclaje y eventualmente con cierto porcentaje de agregado nuevo, todo como para cumplir con las exigencias de la nueva mezcla. Como su nombre lo indica, el proceso se realiza generalmente en frío y los aditivos más utilizados son emulsiones asfálticas, cemento Portland, cal, mezclas de cal y cenizas volantes. También es posible el reciclaje in-situ con cemento asfáltico de alto grado de penetración

2.7.3. Reciclaje en planta

Denominado también reciclaje en caliente, consiste en escarificar el espesor deseado del pavimento existente y transportar el material trozado a una planta en la que es triturado y clasificado por su granulometría, el material también puede obtenerse del pavimento por medio del fresado en frío. Posteriormente, en base al análisis de composición del material viejo, se reconstruye en caliente en caliente la nueva mezcla a reciclar, la cual debe

responder al diseño adoptado. Para ello, se agregan materiales nuevos que comúnmente incluyen un agente de reciclaje y agregado pétreo virgen, así como asfalto nuevo. La nueva mezcla en caliente se lleva al sitio de origen o al que se haya elegido para su colocación, donde se distribuye y compara mediante métodos y equipos convencionales.

En todos los casos, la estructura resultante del trabajo de reciclaje, respondiendo al proyecto correspondiente, podrá emplearse como capa de rodadura o base, caso este último en el cual se deberá superponer una nueva capa superficial.

Tabla 5. Técnicas de Reciclado

Técnicas de reciclado	Ventajas
Reciclado Superficial	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la resistencia al deslizamiento. - Corrige las deficiencias de origen superficial. - Mejora el perfil geométrico de la calzada. - Permite eliminar la capa de restitución de galibo en refuerzos del pavimento.
Reciclado " In Situ "	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la resistencia al deslizamiento. - Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural - Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento. - Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6-7cm) con deformaciones plásticas. - Elimina temporalmente las fisuras reflejas. - Mejora el perfil geométrico de la calzada.
Reciclado en planta	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la resistencia al deslizamiento. - Corrige el perfil geométrico de la calzada. - Elimina las fisuras reflejadas. - Produce mezclas asfálticas de mejor calidad. - Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural - Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto. - Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento

Fuente: The Asphalt Institute "Asphalt Cold - mix Recycling", MISS March 1983.

2.8. Parámetro Glover – Rowe

A partir de las observaciones de Kandhal et al., (1984) y la correlación propuesta entre ductilidad y el parámetro $G'/(\eta'/G')$ establecida por Glover, se fijaron

dos valores límites para prevenir el daño por agrietamiento (Gráfica 1):

a) Zona de inicio de daño. Indica el inicio del agrietamiento en el ligante asfáltico y está expresado por la siguiente fórmula:

$$G^* (\cos^2/\text{sen } \delta) = 180 \text{ kPa}$$

b) Agrietamiento en bloque. Indica el agrietamiento inminente y está expresado por la siguiente fórmula:

$$G^* (\cos\delta^2/\text{sen } \delta) = 450 \text{ kPa}$$

Dónde:

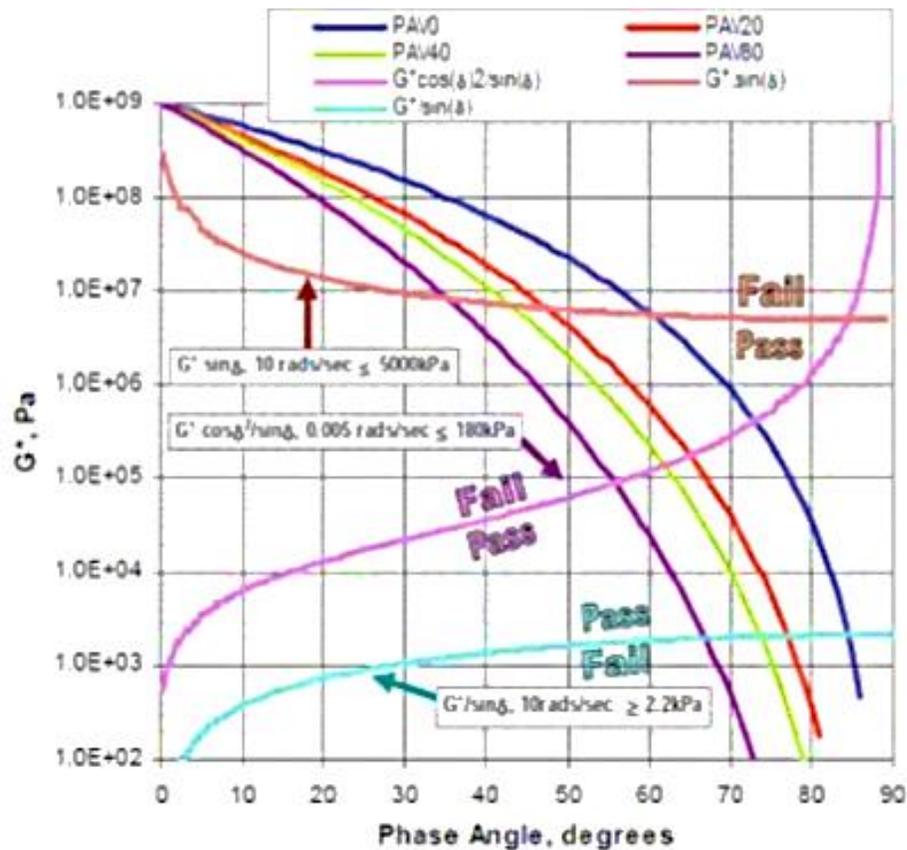
δ = Ángulo de fase,

G^* = Módulo complejo

G' = Módulo de almacenamiento de energía

η' = Viscosidad del material. Revista Técnica Asfáltica N°51 (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.)

Figura 5. Gráfica Glover & Rowe. Zona de inicio de daño y Zona de agrietamiento en bloque.



Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto A.C.

Es bien sabido que la reología del asfalto afecta el comportamiento de agrietamiento de los ligantes asfálticos.

La selección de un parámetro de fatiga $G' \sin \delta$ no son muy divergentes en concepto. Más recientemente, el parámetro de Glover-Rowe se ha revelado como un buen indicador del rendimiento del craqueo. En este documento exploramos las diferencias que han ocurrido y hacemos sugerencias para el uso de parámetros alternativos para definir mejor la reología del aglutinante en relación con el agrietamiento.

Durante muchos años, los investigadores se han esforzado por desarrollar pruebas que aborden adecuadamente este aspecto del desempeño del pavimento de una manera que pueda incorporarse rápidamente a una especificación. Se ha demostrado que el uso del parámetro de fatiga desarrollado durante el Programa de Investigación de Carreteras

Estratégicas (SHRP), $G^*\sin d$, es un pobre sustituto del comportamiento de agrietamiento. Otras pruebas, como la prueba de tensión directa, utilizada para el agrietamiento a baja temperatura, también se han implementado de manera deficiente en las especificaciones. Sin embargo, se ha adoptado ampliamente el uso del reómetro de haz de flexión como indicador del agrietamiento a baja temperatura. Como resultado, una rigidez del pavimento de 300 MPa se ha considerado como un parámetro razonable para el comportamiento de agrietamiento a baja temperatura. La interrelación entre los parámetros de agrietamiento a baja temperatura y los seleccionados para el agrietamiento por fatiga no está bien entendido. El inicio del comportamiento frágil que ocurre alrededor de 300 MPa de rigidez y la selección de un parámetro de fatiga $G^*\sin d$ a 5 MPa no son muy divergentes en concepto. Más recientemente, el parámetro de Glover-Rowe se ha revelado como un buen indicador del rendimiento del craqueo. En este documento exploramos las diferencias que han ocurrido y hacemos sugerencias para el uso de parámetros alternativos para definir mejor la reología del aglutinante en relación con el agrietamiento.

El uso de mediciones reológicas para caracterizar el comportamiento de agrietamiento de los materiales asfálticos se remonta a la década de 1960. A fines de la década de 1980 y principios de la de 1990, el Programa de Investigación de Carreteras Estratégicas (SHRP) introdujo la reología en las especificaciones estándar. Desde entonces, se ha recopilado un gran volumen de datos relacionados con las mediciones reológicas y el comportamiento de craqueo.

Uno de los resultados de esta recopilación de datos es la observación de que el parámetro de especificación desarrollado durante el SHRP, $G^*\sin d$ (el módulo de rigidez de corte complejo multiplicado por la senoide del ángulo de fase), medido usando un reómetro de corte dinámico (DSR) y basado en un concepto de energía disipada, no describe adecuadamente el desempeño de fatiga de los ligantes asfálticos.

También se desarrollaron durante el SHRP pruebas para caracterizar específicamente el desempeño de agrietamiento a baja temperatura de los ligantes asfálticos, la prueba del reómetro de haz de flexión (BBR) y la prueba de tensión directa (DTT). La prueba BBR caracteriza el rendimiento de agrietamiento en base a una medición de rigidez y la

pendiente de la curva de rigidez frente al tiempo en un tiempo de carga de 60 s (valor m). Esta pendiente es una medida de las propiedades de relajación del aglomerante. Sin embargo, también se sabe a partir del análisis reológico que la pendiente de una curva de módulo en función del tiempo se puede traducir a un parámetro de ángulo de fase. Si los parámetros de especificación de baja temperatura SHRP actuales con el haz de flexión.

Se sabe que los ligantes que muestran diferencias considerables entre las temperaturas críticas de agrietamiento a baja temperatura determinadas por la rigidez frente al valor m son problemáticas. A menudo, estos aglutinantes tienen un rendimiento de agrietamiento indeseable, y una gran diferencia de tiempo D_t entre las temperaturas de los valores S y m a menudo indica un aglutinante problemático. El D_t también se puede determinar a partir de mediciones DSR comparables, así como de mediciones BBR. Existen interrelaciones absolutas entre el trabajo de BBR y el trabajo de DSR. El valor de rigidez de 300 MPa utilizados en la prueba BBR se encuentran en el extremo superior del rango de rigidez que generalmente se puede medir en la mayoría de los DSR de uso común en los laboratorios de asfalto. Cuando la rigidez comienza a exceder los 10 a 20 MPa, pueden ocurrir problemas de cumplimiento, lo que hace que tales mediciones no sean confiables. El desarrollo del BBR para mediciones de mayor rigidez, con desplazamientos medidos en una viga de flexión, proporciona una medición más reproducible de la rigidez frente al tiempo que las medidas al probar la muestra bajo una aplicación de tensión directa en un DSR

En el trabajo realizado para evaluar el agrietamiento en los pavimentos, un parámetro de aglutinante alternativo propuesto inicialmente por Glover et al fue evaluado. Trabajo adicional realizado por Anderson y sus compañeros de trabajo y discutido por Rowe muestra la interrelación que tiene este parámetro con las medidas tanto en la prueba BBR como en la prueba DSR. Algunos adicionales

Recientemente se presentó un trabajo sobre este parámetro para ilustrar cómo se puede utilizar como indicador de agrietamiento

El uso de parámetros alternativos y conceptos de especificación se puede entender mejor al considerar los datos dentro de un diagrama de espacio negro. Este tipo de gráfico, en el

que G^* y d se muestran en un solo gráfico, se puede utilizar para comprender qué efectos tendrá el envejecimiento en las características reológicas de un material.

En este documento, presentamos ilustraciones de varias especificaciones y concepto dentro de la importancia de este parámetro para el agrietamiento.

De acuerdo a los antecedentes que se tiene de las investigaciones desarrolladas sobre el endurecimiento por envejecimiento del aglutinante se ha monitoreado tradicionalmente usando medidas de rigidez como la retención de la pluma, las relaciones de viscosidad, el cambio en el punto de reblandecimiento del anillo y la bola (R&B) o, desde el inicio de la clasificación por grados de rendimiento (PG), los cambios en G^* como medida a altas temperaturas del pavimento. Ninguna de estas medidas captura el impacto físico del ángulo de fase decreciente que acompaña al aumento de la rigidez a medida que el aglutinante se oxida, ni se miden dentro de un rango de temperatura en el que se cree que ocurre el deshilachado y el agrietamiento de la superficie. También se ha demostrado que el parámetro G^* desarrollado durante el SHRP es inadecuado para capturar el comportamiento de agrietamiento en campo de las mezclas asfálticas. Durante la investigación de SHRP, una de las características clave de un ligante asfáltico reconocida fue la definición de la forma de la curva maestra. Esto fue definido inicialmente por el modelo Christensen-Anderson (CA) [5] y luego refinado por Marasteanu y Anderson [6] en el modelo CAM familiar que se usa a menudo en la actualidad. Sin embargo, en el desarrollo de las especificaciones para la implementación por parte de AASHTO, se omitió el uso de parámetros reológicos en favor de valores de punto único a temperaturas asociadas con los requisitos climáticos y de rendimiento que dieron como resultado las especificaciones de PG.

A principios de la década de 1970, Kandhal [7] evaluó muchos pavimentos de Pensilvania y reportó el inicio del desmoronamiento a medida que el envejecimiento del asfalto reducía la ductilidad del aglomerante (15 C; 1 cm/min) a 5 cm. Cuando la ductilidad cayó por debajo de los 3 cm, Kandhal notó un desgaste superficial significativo en forma de grietas. Este trabajo fue utilizado por Glover y su equipo de investigación en Texas A&M [1], quienes interpretaron los hallazgos de ductilidad de Kandhal en el sentido de que el daño superficial inducido por la edad está relacionado con una deformación por falla de

tracción en la región frágil Glover et al. [1] utilizaron modelos de Maxwell para derivar un parámetro reológico $G_0/(g_0/G_0)$ que sirve como sustituto de la deformación por tracción en caso de falla. Este parámetro, una medición de un solo punto en un DSR a 15 Cy 0,005 rad/s, se correlaciona bien con la ductilidad de Kandhal. Anderson verificó la relación entre el parámetro de Glover y la ductilidad y luego mostró que $G_0/(g_0/G_0)$ tiene una correlación extremadamente alta con el grado de control m como medido usando un BBR cerca de la temperatura más baja del pavimento. Este resultado fue sorprendente, dada la gran diferencia de temperatura entre las dos mediciones. Esta misma investigación informó que los resultados obtenidos con cuatro especímenes de los pavimentos de las pistas coincidían con las predicciones de Glover. Rowe [3] luego modificó una versión reorganizada de Glover's parámetro. El parámetro $G_0/(g_0/G_0)$ se puede expresar en otros términos y se reduce de la siguiente manera:

$$g_0 \approx \frac{G_0}{X} \quad \text{y} \quad \tan \delta \approx \frac{G_0}{G_0}$$

Por eso; $\frac{g_0}{G_0} \approx \frac{1}{G_0 X} \approx \frac{\tan \delta}{X}$

Por lo tanto; $\frac{G_0}{\frac{g_0}{G_0}} \approx \frac{G_0}{\frac{\tan \delta}{X}} \approx \frac{G_0 X}{\tan \delta}$

Poniendo la ecuación en su forma más simple, tenemos:

$$\frac{G_0 X}{\tan \delta} \approx \frac{G \cos \delta X}{\tan \delta} \approx \frac{G \delta \cos \delta^2 X}{\sin \delta}$$

Sin embargo, debido a que la frecuencia x tiene un valor fijo de 0.005 rad/s, puede ignorarse efectivamente como un parámetro significativo. Para expresar esto de manera similar a otros parámetros actualmente en AASHTO M320 [8], se propuso que este parámetro sea expresado simplemente como una función de G^* y δ (eliminando el término de frecuencia), como sigue:

$$\frac{G \delta \cos \delta^2}{\sin \delta}$$

Expresado de esta manera, el valor límite propuesto inicialmente por Anderson de $9E-04$ MPa/s a $0,005$ rad/s se convierte en $G^* \cos d^2 / \sin d$ 180 kPa. Este parámetro es entonces muy similar al formato para los otros parámetros de Superpave ($G/ \sin d$ y $G'' \sin d$) y probablemente puede ser más intuitivo entendido por la mayoría de los ingenieros y técnicos en ejercicio.

En consecuencia, en comparación con el agrietamiento, esto puede ser eliminado de manera efectiva, lo que resulta en un parámetro que depende sobre G^* y d medidos en la región lineal. Esto resulta en el desarrollo de los siguientes dos criterios [5] como el Glover Límites de parámetros de Rowe (GR)

$$\text{Comienzo del daño: } G^* \cos d^2 = \sin d \cdot 180 \text{ kPa}$$

$$\text{Arietamiento significativo: } G^* \cos d^2 = \sin d \cdot 450 \text{ kPa}$$

G^* y el ángulo de fase permiten el análisis de datos en Black Space diagrams Rey et al. [4] abordó el uso del parámetro GR con más detalle utilizando aglutinantes y mezclas experimentos de envejecimiento en laboratorio y comparó el parámetro GR con otros posibles factores de envejecimiento parámetros como el parámetro de especificación PG actual $G \sin d$, $1/\tan d$ como lo discutió Goodrich [9], y el valor de R del modelo CA, entre otros.

El parámetro GR satisface argumentos tanto teóricos como empíricos para crear una zona de daño inducida por la edad en Black Space, al menos para no modificar asfalto. Esta publicación también analizó los daños significativos que se desarrolla en especímenes de mezcla envejecidos durante et enfriamiento a baja temperatura del pavimento, incluso cuando los especímenes permanecen fuera del confinamiento. A se está realizando un esfuerzo de validación de campo a gran escala para comprender Envejecimiento del asfalto en términos de zonas de daño de Black Space. Ninguno de estos estudios ha producido datos para polímeros modificados asfaltos

En trabajos anteriores se observó que $D(T)$, definida como la diferencia en la granulometría de un aglutinante controlada por medidas de S y m BBR, también podría

estar relacionada con el parámetro GR. Debería Cabe señalar que existe una correspondencia entre la información col lected en el BBR y en el DSR.

Los asfaltos con núcleo SHRP se han analizado para determinar la m valor, y luego, usando una Inter conversión de espectros discretos, en la respuesta del ángulo de fase se ha determinado como se ilustra debe observarse que el rango de rigidez medido en el BBR corresponde a uno apenas mayor que el requisito de especificación actual para G'sen d. Esto se puede observar fácilmente de la inspección de los datos que se muestran en la Fig 2. Como se ve desde inspección de esta figura, la especificación G'sen d da como resultado una

Requisito de rigidez máxima BBR de aproximadamente 20 MPa en un tiempo de carga equivalente a una frecuencia de 10 rad/s. El rango de rigidez de 300 MPa utilizado en la especificación de temperatura fría a 20 MPa parece proporcionar un rango crítico relacionado con el rendimiento. Las interrelaciones permiten elegir en la determinación de los parámetros utilizados para las pruebas de especificación.

En el desarrollo de las condiciones de prueba adecuadas, se debe tener en cuenta la facilidad de uso de un parámetro de prueba y la precisión y reproducibilidad de un método de prueba en particular. En el caso de ejemplo, hemos utilizado parámetros de la curva maestra para calcular los parámetros GR Conceptualmente, estos parámetros de la curva maestra podrían haberse obtenido mediante métodos de prueba BBR o DSR

2.9. Metodología

2.9.1. Ensayos de caracterización de agregados pétreos

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto se obtuvo el material pétreo que está situado en la comunidad de La Pintada, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provincia de material para la Alcaldía del Municipio de Tarija de la provincia Cercado. Los ensayos para clasificar la calidad del producto, los más importantes son:

2.9.1.1. Análisis granulométrico por tamizado (Astm D422; Aashto T88)

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0.075 mm, de una muestra de suelo.

Equipo y materiales

Balanza

Debe tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente donde se va a pesar, la precisión debe de ser de 0.1 g para muestras menores que 1000 g y de 1 g para muestras mayores que 1000 g.

Tamices

Deben ser tejidos, de alambre, abertura cuadrada, tensados. Los tamaños nominales de las aberturas pertenecen a la serie que se indica en la Tabla.

Tabla 6. Serie de tamices

Tamaño nominal de abertura	
(mm)	ASTM
75	3"
63	2 1/2"
50	2"
37,5	1 1/2"
25	1"
19	3/4"
9,5	3/8"
4,75	Nº 4
2	Nº 10
0,425	Nº 40
0,075	Nº 200

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Marcos

Metálicos y suficientemente rígidos y firmes para fijar y ajustar telas de alambre, a fin de evitar pérdidas de material durante el tamizado y alteraciones en la abertura de las mallas. Serán circulares, con diámetros de 200 mm y preferentemente de 300 mm para suelos gruesos.

Depósito receptor

Cada juego de tamices estará provisto de un depósito que ajuste perfectamente para la recepción del residuo más fino.

Tapa

Cada juego de tamices estará provisto de una tapa que ajuste perfectamente para evitar pérdidas de material y marcada con tres diámetros que formen ángulos de 60 ° entre sí.

Mortero

Con triturador de caucho para disgregar las partículas aglomeradas, sin reducir el tamaño de los granos individuales.

a) Preparación de la muestra

Homogeneizar cuidadosamente el total de la muestra de terreno en estado húmedo; luego reducir por cuarteo, para obtener, cuando esté seca, una cantidad de material de acuerdo al tamaño máximo absoluto. Luego soltar el fino adherido a la grava y arena, si es necesario con agua, y deshacer los terrones con los dedos. Secar la muestra obtenida hasta masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C; si se detecta presencia de materia orgánica, secar la muestra en el horno a 60 ± 5 °C.

Tabla 7. Cantidad mínima de muestra para granulometría según tamaño máximo absoluto del suelo

Tamaño máximo absoluto (mm)	Cantidad mínima de muestra a extraer en terreno (kg)	Cantidad mínima de muestra para el ensayo (kg)
5	2	0,5
10	8	2
20	20	5
25	40	10
50	60	15
80	80	20
100	120	30
150	160	40

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Procedimiento

1. Pesar toda la muestra con aproximación a 1 g registrar como A.
2. Cortar todo el material en el tamiz correspondiente al Tamaño Máximo Absoluto especificado; determinar la masa de las fracciones sobre y bajo dicho tamaño con aproximación a 1 g y registrar como B y Z, respectivamente.
3. Medir y registrar el Tamaño Máximo Absoluto del material de la fracción B, determinar en el paso anterior.
4. Cortar todo el material registrado como Z en tamiz 4,75 (N° 4) y determinar las masas, con precisión a 1 g, de la fracción que pasó y de la que quedó retenida en dicho tamiz. Registrar como C y D respectivamente.
5. Colocar el material retenido de 5 mm (D) en un recipiente de lavado y agregar agua potable en cantidad suficiente para cubrir la muestra. Proceder a lavar el material siguiendo los siguientes pasos:

Agitar la muestra con el agua de modo de separar el material fino, dejándolo en suspensión o en disolución.

Vaciar inmediatamente el agua con el material fino (en suspensión o en disolución) de los tamices N° 4 (4,75 mm) y N° 200 (0,075 mm), dispuestos en forma decreciente.

Agregar nuevas cargas de agua y repetir la operación hasta que el agua agitada con la muestra permanezca limpia y clara.

Reunir el material retenido en los tamices con el material decantado en el recipiente de lavado.

Secar el material reunido hasta masa constante en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Pesar y registrar la masa lavada y seca como D'.

6. Tamizar el material registrado como D' a través de la serie de tamices 150 mm (6"), 100 mm (4"), 50 mm (2"), 37,5 mm (1 ½"), 25 mm (1"), 19 mm (¾"), 9,5 mm (3/8") y 4,75 mm (N° 4). Efectuar este tamizado en dos etapas; un tamizado inicial, que podrá ser manual o mecánico, y un tamizado final que deberá ser manual.

Tamizado inicial

Vaciar el material registrado como D' sobre el tamiz superior de la serie de tamices y cúbralo con la tapa y fondo.

Agitar el conjunto de tamices durante un lapso mínimo de 5 min.

Tamizado final

Retirar el primer tamiz provisto de depósito y tapa.

Sostener con las manos, manteniéndolo ligeramente inclinado.

Agitar con movimientos horizontales y verticales en forma combinada, girando el tamiz en forma intermitente. Esta operación debe durar al menos 1 min.

Pesar y registrar el material retenido sobre el tamiz.

Trasladar el material contenido en el depósito al tamiz siguiente.

Repetir las operaciones descritas en los pasos anteriores hasta completar todos los tamices.

Pesar y registrar la masa final del residuo contenido en el depósito.

7. Del material bajo 5 mm tomar por cuarteo una muestra de 500 a 1000 g, y registrar su masa como C'. Lavar cuidadosamente con agua potable el material sobre tamiz 0,075 mm (N° 200); vaciar en un bol el material retenido en tamiz 0,075 mm (N° 200) y secar hasta masa constante a 110 ± 5 °C.
8. Pesar y registrar el material lavado y seco como C'', aproximando a 0.1 g.
9. Tamizar el material preparado de acuerdo a g., según procedimiento descrito en f., a través de la serie de tamices: 2 mm (N° 10), 0,425 mm (N° 40) y 0,075 mm (N° 200).
10. Determinar la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz 0,075 mm (N° 200), recogido en el depósito. Registrar como Mí, con aproximación a 0,1 g.
11. La suma de todas las masas no debe diferir en más de 3 % para el material bajo 5 mm, ni en más de 0,5 % para material sobre 5 mm, respecto de las masas registradas como C'' y D', respectivamente. Caso contrario repetir ensayo.

Cálculos

Calcular el porcentaje de sobre tamaño, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$ST = \frac{B}{A} * 100(\%)$$

Donde:

B = Masa de material sobre el Tamaño Máximo Absoluto especificado

A = Masa de muestra total

Calcular el porcentaje retenido en el tamiz i del material sobre 4,75 mm, de acuerdo a la siguiente ecuación

$$Ri = \frac{Mi}{C + D} * 100(\%)$$

Donde:

Mi = Masa retenida en el tamiz i del material sobre 4,75 mm

C = Masa de la fracción bajo 4,75 mm.

D = Masa de la fracción bajo 4,75 mm.

$$Ri = C * \frac{Mi}{C(C + D)} * 100(\%)$$

Calcular el porcentaje retenido en el tamiz i del material bajo 4,75 mm, de acuerdo a la siguiente ecuación.

Donde:

Mi = Masa retenida en el tamiz i del material bajo 4,75 mm.

C = Masa de la fracción bajo 4,75 mm.

C' = Masa de muestra reducida por cuarteo de la fracción bajo 4.75mm

D = Masa de la fracción bajo 4,75 mm.

Expresar la granulometría como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicar como primero resultado el del menor tamiz en que pasa el 100%, y expresar el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa en el tamiz

inmediatamente anterior al de cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo. Aproximar los porcentajes que pasan al entero más cercano.

Los resultados de la granulometría pueden expresarse en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz.

2.9.1.2. Método de los sulfatos para determinar la desintegración (Astm C 88 Aashto T104)

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El uso de una u otra sal es alternativo, pero sus resultados no son comparables.

Este método se aplica a los áridos que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y mezclas asfálticas.

Equipos y materiales

Balanzas

Balanza para áridos finos de capacidad superior a 500 g y una precisión de 0,1 g.

Balanza para áridos gruesos de capacidad superior a 5.000 g y una precisión de 0,1 g.

Horno

Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Tamices

Emplee la misma serie de tamices especificados en el Método H0104.

Recipientes

Canastillos rígidos y químicamente inertes con las soluciones de ensaye. Las perforaciones deben permitir el libre acceso y drenaje de la solución sin pérdidas de material de la muestra.

Recipientes para solución, rígidos, estancos y químicamente inertes con las soluciones de ensaye. Serán de forma y tamaño tales que permitan contener los canastillos

completamente sumergidos en la solución. Deben tener un dispositivo para regular la temperatura de la solución durante la inmersión.

Reactivos

Para cada operación se debe disponer de un volumen de solución igual o mayor a 5 veces el volumen aparente de la muestra.

Solución de sulfato de sodio. Disuelva aproximadamente 350g de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) o aproximadamente 750g de sulfato de sodio deshidratado ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) por litro de agua a una temperatura mayor a $25^\circ C$ y menor a $0^\circ C$. Revuelva completamente durante la adición de la sal y a intervalos regulares hasta su uso. Enfríe y mantenga a una temperatura de $20 \pm 3^\circ C$ durante un período igual o mayor a 48 h previas al uso.

Al momento del empleo, la solución debe tener una densidad (g/ml) comprendida entre 1,151 y 1,174 a $20 \pm 3^\circ C$.

Solución de sulfato de magnesio. Disuelva 350 g de sulfato de magnesio anhidro ($MgSO_4$) o 1.400 g de sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) por litro de agua a una

temperatura mayor que $25^\circ C$ y menor que $30^\circ C$. Revuelva completamente durante la adición de la sal y a intervalos regulares hasta su uso. Enfríe y mantenga a una temperatura de $20 \pm 3^\circ C$ durante un período igual o mayor a 48 h previas al uso.

Al momento de empleo la solución debe tener una densidad (g/ml) comprendida entre 1,295 y 1,308 a $20 \pm 3^\circ C$

Extracción y preparación de la muestra

Extraiga y prepare las muestras de acuerdo con los Métodos H0102 y H0101. Deben haberse ensayado previamente según Método H0104 a fin de determinar la granulometría.

Tamaño de la muestra de ensaye

Áridos fino

- Pase previamente por el tamiz de 9,5mm ($3/8''$) para hormigón y 4,75mm (N.º 4) para asfalto. Cuando el material retenido exceda el 5% de la muestra, ensaye de acuerdo

con 7.

- Prepare la muestra con el material que pasa por el tamiz de 9,5mm ($\frac{3}{8}$ "') para hormigón y 4,75 mm (N.º 4) para asfalto; debe tener un tamaño tal que permita obtener las fracciones de muestra.

Áridos grueso

- Pase previamente por el tamiz de 4,75mm (Nº 4) para hormigón y 2,36mm (Nº 8) para asfalto. Cuando el material que pasa exceda el 5 % de la muestra, ensaye de acuerdo con 6.
- Prepare la muestra con el material retenido en el tamiz de 4,75mm (Nº 4) para hormigón y 2,36 mm (Nº 8) para asfalto; debe tener un tamaño tal que permita obtener las fracciones de muestra especificadas en la Tabla.

Tabla 8. Tamaño de la Muestra de ensayo de áridos fino

Fracción	Tamaño de partículas (mm)	Masa mínima de la fracción(g)
1	4,75-9,5	100
2	2,36-4,75	100
3	1,18-2,36	100
4	0,6-1,18	100
5	0,3 - 0,6	100

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Nota 4: Fracción 1, 2, 3, 4 y 5 para hormigón, Fracción 2, 3, 4 y 5 para asfalto

Tabla 9. Árido grueso

Fracción	Tamaño de partículas (mm)	Masa de la subfracción (g)	Masa de fracción (g)
1	50 - 63	3.000 ± 300	5.000 ± 300
	37,5 - 50	2.000 ± 200	
2	25,0-37,5	1.000 ± 50	1.500 ± 50
	19-25,0	500 ± 30	
3	12,5 -19	670 ± 10	1.000 ± 10
	9,5 - 12,5	330 ± 5	
4	4,75-9,5	300 ± 5	300 ± 5
5	2,36-4,75	100 ± 5	100 ± 5

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

- Tome los tamaños de muestra indicados en la Tabla H0114_1 considerando el porcentaje parcial retenido (Ppr) de cada fracción, determinado mediante tamizado según Método H0104, en la forma siguiente:

Ensaye las fracciones indicadas siempre que el Ppr sea igual o mayor que 5%.

No ensaye las fracciones que tengan un Ppr menor que 5% (ver 19).

Si una subfracción de áridos grueso tiene un Ppr menor que 3%, componga la fracción con la subfracción que exista, siempre que ella tenga un Ppr igual o mayor a 3%.

Acondicionamiento de la muestra de ensaye

Áridos fino

- Lave la muestra de ensaye sobre un tamiz de 0,3mm (N°50) o 0,15mm (N°100), para hormigón o asfalto, respectivamente,
- Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamice de modo de obtener las fracciones de muestra especificadas en la Tabla 1
- Pese los tamaños de muestra requeridos para cada fracción y registre la masa inicial (mi) de cada una de ellas, aproximando a 0,1 g.

- Coloque cada fracción en su canastillo.

Áridos grueso

- Lave la muestra de ensaye sobre un tamiz de 4,75mm (N°4) o 2,36mm (N° 8), según corresponda.
- Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamice de modo de obtener las subfracciones de muestra especificada en la Tabla 3.
- Pese los tamaños de muestra requeridos para cada subfracción.
- Componga y pese las fracciones requeridas y registre la masa inicial (mi) de cada una de ellas, aproximando a 1 g.
- Cunte y registre el número inicial de partículas (ni) de tamaño mayor a 19mm ($3/4$).
- Coloque cada fracción en su canastillo.

Ciclos de inmersión y secado

- Sumerja los canastillos con las fracciones de muestra en la solución de sulfato de sodio o sulfato de magnesio a una temperatura de $20 \text{ r } 3^{\circ}\text{C}$ por un período de 17 r 1 h, de modo que los áridos queden cubiertos por una capa de solución superior a 1,5 cm. Cubra los recipientes para reducir la evaporación y evitar contaminaciones.
- Retire los canastillos con las fracciones de muestra de la solución; deje escurrir durante 15 r 5 min y seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Deje enfriar a temperatura ambiente.
- Repita 5 veces el ciclo de inmersión y secado.
- Terminado el número de ciclos y una vez enfriada la muestra, lave hasta eliminar totalmente el sulfato.
- Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$; deje enfriar a temperatura ambiente. Cubra los canastillos para evitar absorciones o contaminaciones.
- Determine la masa final de las fracciones de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Áridos fino

- Tamice cada fracción de áridos fino en el tamiz en que fue retenida al iniciar el ensaye.
- Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la fracción correspondiente (mf), aproximando a 0,1 g.

Áridos grueso

- Tamice cada fracción de áridos grueso por el tamiz correspondiente.

Tabla 10. Serie de Tamices para el examen cuantitativo

Fracción	Tamaño de partículas de la fracción original (mm)	Tamices, tamaños nominales de abertura	
		ASTM	mm
1	37,5-68	1"	25
2	19-37,5	½"	12,5
3	9,5-19	¼"	6,3
4	4,75-9,5	Nº 8	2,36
5	2,36-4,75	Nº 10	2

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

- Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la fracción correspondiente (mf), aproximando a 1g.
- Examine cualitativamente y cuantitativamente las partículas mayores que 19mm ($\frac{3}{4}$ ") como sigue:
- Observe y registre el efecto de la acción del sulfato (desintegración, agrietamiento, hendidura, exfoliación, desmoronamiento, etc.).
- Cuente y registre el número final de partículas (nf).

Cálculos

Calcule el porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 0,1 %.

$$P_N \frac{m_i - m_f}{m_i} * ppr$$

P_N = Porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra (%).

m_i = Masa inicial de la fracción (g).

m_f = Masa final de la fracción (g).

ppr = Porcentaje parcial retenido correspondiente a la fracción según el análisis granulométrico (%).

Para las fracciones no ensayadas de acuerdo con lo especificado en 7 c), considere que tienen una pérdida de masa igual a la media aritmética de las pérdidas de las dos fracciones inmediatamente superior e inferior. Si se trata de una fracción extrema considere que tiene una pérdida igual a la de la fracción más próxima.

Calcule la desintegración del árido fino o grueso, según corresponda, como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 0,1%.

$$P (\%) (P_1 + P_2 + \dots P_n)$$

Donde:

P = Porcentaje de pérdida de masa de la muestra (%)

P_n = Porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra (%)

Calcule el porcentaje de partículas mayores que 19mm ($3/8$) afectadas por la acción del sulfato, según la fórmula siguiente, aproximando al 1%.

$$A(\%) = \frac{ni - nf}{ni} * 100$$

Donde:

A = Porcentaje de partículas mayores que 19 mm afectadas por la acción del sulfato (%).

n_i = Número inicial de partículas mayores que 19 mm.

n_f = Número final de partículas mayores que 19 mm

2.9.1.3. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127; AASHTO T85-91)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definición

Árido grueso: material árido retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 4) en el caso de suelos y hormigones, y en el tamiz de 2,36 mm (N° 8) cuando se utiliza en asfaltos.

Huecos: espacios vacíos entre las partículas de un material árido.

Poros: espacios vacíos interiores de una partícula de material árido

Poros accesible: poro permeable o abierto.

Poros inaccesible: poro impermeable o cerrado.

Densidad (ρ): Es el cociente entre la masa (m) y el volumen (v) de un material pétreo a una temperatura especificada. Se expresa en kg/m.

Densidad real (ρ_R), es en la que se considera el volumen macizo de las partículas de material árido, más el volumen de los poros accesibles a inaccesibles de esas partículas.

Densidad real del árido seco (ρ_{RS}), en la que se considera solamente la masa del árido seco.

Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RT}), en la que se considera la masa del árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

Densidad neta (ρ_N), en la que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.

Absorción de agua (α): masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa del pétreo seco.

Árido seco: material secado en horno hasta masa constante. Esta condición se obtiene cuando dos pesadas sucesivas, separadas por 1 h de secado a 110 ± 5 °C, difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1 % de la menor masa determinada.

Equipo y materiales

Balanza

De capacidad superior a la masa del canastillo porta muestra más la masa de la muestra de ensayo y una precisión mínima de 1 g.

Horno

Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensayo.

Canastillo porta muestra

De alambre de hacer inoxidable lo suficientemente resistente para soportar el peso de la muestra, con malla de abertura igual o inferior que 2 mm y de capacidad igual o superior a 4 l. Además, debe estar provisto de un dispositivo que permita suspenderlo del platillo de la balanza.

Estanque

Impermeable, inoxidable, de forma y capacidad tal que permita contener totalmente y con holgura el canastillo porta muestra, de acuerdo con el procedimiento especificado en este método.

Recipientes

Deben estar limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensayo.

Extracción y preparación de la muestra

Tamaño de la muestra de ensayo

La cantidad mínima de muestra para el ensayo se determina según la Tabla, en función del tamaño máximo nominal del árido.

Preparación de la muestra

Se puede emplear el material proveniente del ensayo tamizado, debidamente homogeneizado.

Eliminar por tamizado las partículas inferiores a 2,36 mm en caso de asfaltos.

Secar la muestra hasta masa constante en un horno a 110 ± 5 °C.

Enfriar la muestra al aire a temperatura ambiente por un período de 24 ± 4 h.

Sumergir la muestra en agua a temperatura ambiente por un período de 24 ± 4 h.

Procedimiento

Efectuar las siguientes pesadas a la muestra de ensayo:

Retirar la muestra de agua y secar superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Secar individualmente las partículas mayores manteniendo el árido, ya secado superficialmente, cubierto por el paño hasta el momento de pesar, realizar todo en el menor tiempo posible.

Determinar inmediatamente la masa del pétreo saturado superficialmente seco, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registrar su valor como MSSS.

Colocar la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra

Sumergir el canastillo en agua de 20 ± 3 °C, por un período de al menos de 3 min.

Determinar la masa sumergida, aproximando a 1 g, registrar su valor como MSUM.

Retirar la muestra de canastillo y vaciar completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas.

Secar la muestra hasta masa constante en un horno a 110 ± 5 °C

Enfriar la muestra hasta temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente protegido, para evitar la absorción de humedad del aire.

Determinar la masa de la muestra seca, registrar su valor como MS.

Determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un árido como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.

Expresar las densidades en kg/m³, aproximando a 1 kg/m³. Expresar la absorción en porcentaje, aproximando a la centésima.

Precisión

Acepte la determinación densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos gruesos, cuando la diferencia entre valores obtenidos de los ensayos realizados por uno o más laboratoristas, sea:

Igual o inferior que 20 g/m³ en la determinación de densidades.

Igual o inferior que 3 décimas porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

2.9.1.4. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128; AASHTO T84-00)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Es aplicable a los áridos finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Equipo y materiales

Balanza

De capacidad superior a 1 kg y una precisión mínima de 1 g.

Horno

Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensayo.

Recipientes

Deben estar limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensayo

Matraz

Es un matraz aforado en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensayo. Debe llevar una marca de calibración que indique el volumen contenido con una precisión de ± 0.1 ml, dicho volumen excederá a lo menos en un 50 % al volumen aparente de la muestra de pétreo fino. Es recomendable un matraz de 500 cm³ de capacidad. También puede emplearse un picnómetro.

Molde

Con forma tronco-cónica, de 40 ± 3 mm de diámetro en la parte superior, 90 ± 3 mm de diámetro en la parte inferior y 75 ± 3 mm de altura, confeccionando con una plancha metálica de un espesor igual o superior que 0,8 mm.

Pistón

Es una varilla metálica, con unos de sus extremos de sección plana y circular, de 25 ± 3 mm de diámetro. Debe tener una masa de 340 ± 15 g.

Extracción y preparación de la muestra

Tamaño de la muestra de ensayo

Para cada ensayo se usará una cantidad de árido fino superior a 50 g, inferior a 500 g.

Preparación de la muestra de ensayo

Cortar el material retenido en el tamiz 2,36 mm

Si la muestra de laboratorio contiene un porcentaje superior al 15 % de material retenido sobre 2,36 mm, considerar como un integral y determinar los porcentajes de la fracción retenida y de la fracción que pasa respecto del total de dicha muestra.

Reducir por cuarteo, a una cantidad de árido de aproximadamente el doble del tamaño de muestra de laboratorio requerido.

Secar el árido en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Cubrir el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente, necesaria para asegurar su saturación en un período de 24 ± 4 h.

Procedimiento

1. Eliminar paulatinamente el exceso de agua, evitando la pérdida de finos; revolver la muestra de forma frecuente asegurando un secado uniforme, hasta llevarla a su condición suelta.
2. Colocar e molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llenar con el árido en condición suelta en una capa y enrasar.
3. Compactar con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie, en cada golpe dejar caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm del árido.
4. Remover todo el material sobrante en la superficie, levantar el molde verticalmente, si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono; en este caso eliminar el exceso de humedad, repitiendo el procedimiento. Cuando al retirar el molde, el árido cae según su talud natural, será indicador que ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca, en ese momento obtener el tamaño de la muestra requerida, pesar y registrar.
5. Colocar la muestra en el matraz y cubrir con agua a una temperatura de 20 ± 3 °C, hasta alcanzar aproximadamente $2/3$ del volumen del matraz, luego agitarlo para eliminar burbujas de aire, golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano.
6. Dejar reposar durante 1 h manteniendo a una temperatura de 20 ± 3 °C, a continuación, llenar con agua a 20 ± 3 °C hasta la marca de calibración, agitar y dejar reposar un instante.
7. Medir y registrar la masa total del matraz con la muestra del ensayo y el agua (Mm).
8. Sacar la muestra del matraz, secar hasta masa constante en horno a 110 ± 5 °C, dejar enfriar a temperatura ambiente; determinar y registrar la masa de la muestra en condición seca (ms).
9. Llenar el matraz solamente con agua a una temperatura 20 ± 3 °C hasta la marca de calibración. Medir y registrar la masa del matraz con agua (Ma).

Cálculos

Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RT})

$$\rho_{RT} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} + M_m} * 1000$$

Densidad real del árido seco (ρ_{RS})

$$\rho_{RS} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_a + M_{SSS} - M_m} * 1000$$

Densidad neta (ρ_N)

$$\rho_N \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_a + M_S - M_m} * 1000$$

Absorción de agua (α)

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 1000$$

Donde:

ρ = Densidad (Kg/m^3)

α = Absorción (%)

M_m = Masa del matraz de la muestra más agua hasta la marca de calibración (g)

M_{SSS} = Masa del árido saturado superficialmente seco (g)

M_S = Masa del árido seco (g)

Expresión de resultados

La densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un árido fino se determinan como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.

En el caso de un integral, la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos se calculan como el promedio ponderado de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua, respectivamente, obtenidas mediante el ensayo por separado de sus dos fracciones, de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Densidad de la integral:

$$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{1}{100} * (\rho_r * P_r + \rho_p * P_p)$$

Absorción de agua de la integral:

$$\alpha \text{ (\%)} = \frac{1}{100} * (\alpha_r * P_r + \alpha_p * P_p)$$

Donde:

ρ = Densidad (real o neta) de la integral (kg/m³)

ρ_r = Densidad (real o neta) de la fracción retenida (kg/m³)

ρ_p = Densidad (real o neta) de la fracción que pasa (kg/m³)

P_r = Porcentaje en masa de la fracción retenida (%)

P_p = Porcentaje en masa de la fracción que pasa (%)

α = Absorción de agua de la integral (kg/m³)

α_r = Absorción de agua de la fracción retenida (kg/m³)

α_p = Absorción de agua de la fracción que pasa (kg/m³)

Expresar las densidades en kg/m³, aproximando a 1 kg/m³, y la absorción en porcentaje, aproximando a la centésima.

Precisión

Aceptar la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos finos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas sea:

Igual o inferior que 20 g/m³ en la determinación de densidades.

Igual o inferior que 4 décimas porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (N° 4).

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 (ver Figura 2.7)

Sifón

Compuesto por los siguientes elementos:

Una varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 450 de largo, con hilo en ambos extremos.

Un pie de bronce troncónico, de 25 mm de diámetro basal y 20 mm.

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

Medida

Un recipiente de 85 ± 5 ml de capacidad.

Tamiz

De tela de alambre y abertura cuadrada, de 4,75 mm (N° 4).

Recipiente

Estanco y de capacidad igual o mayor que 4 l para preparar el reactivo y la solución de ensayo.

Agitador mecánico

Con un desplazamiento horizontal de 200 ± 2 mm y una velocidad de agitación de 175 ± 2 ciclos/min

Herramientas y accesorios

Embudos, botellas para reactivos, regla de enrase, etc.

Reactivos

Solución base

Componentes:

240 g de cloruro de calcio anhidro, grado técnico.

1.085 g de glicerina farmacéutica.

25 g de formaldehído (solución 40 % de volumen/volumen).

Preparación, disolver el cloruro de calcio en 1 litro de agua destilada y filtrar. Agregar la glicerina y el formaldehído a la solución, mezclar bien y diluir a 2 l con agua destilada.

Solución de ensayo

Tomar 22,5 ml de la solución base y diluir a 1 l con agua destilada

a) Condiciones generales

Lugar de ensayo: Debe estar libre de golpes o vibraciones que pueden alterar el periodo de decantación. Cuando se empleen probetas de acrílico deben protegerse de la luz solar directa.

b) Preparación de la muestra

Tamaño de la muestra de ensayo igual o mayor que 2000 g de material bajo 5 mm.

La muestra para cada ensayo debe ser igual a una medida llena enrasada (85 ± 5 ml).

Preparación de la muestra de ensayo

Tamizado

Pasar la muestra original en estado húmedo por el tamiz de 4.75 mm (N° 4); disgregar manualmente los terrones de material arcilloso. Si el material retenido tiene adherido capas de material arcilloso, remover secando el material retenido y frotándolo entre las manos sobre un recipiente. El polvo resultante debe incorporarse a la muestra y el material retenido desecharse.

Reducción

Reducir por cuarteo hasta obtener material suficiente para llenar cuatro medidas.

Secado

Secar hasta masa contante en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, dejar enfriar a temperatura ambiente.

Procedimiento

1. Colocar la botella del sifón con la solución de ensayo a aproximadamente 1 m sobre la superficie de trabajo.
2. Sifonear la solución de ensayo en la probeta hasta que alcance un nivel de 100 ± 5 mm.
3. Obtener por cuarteo el material suficiente para llenar una medida.
4. Llenar una medida, asentar el material golpeando el fondo de la medida contra la mesa de trabajo al menos 4 veces, enrasar y verter en la probeta.
5. Golpear firmemente el fondo de la probeta contra la palma de la mano hasta desalojar las burbujas de aire.
6. Dejar la probeta en reposo por un período de 10 min.
7. Colocar el tapón y soltar la arena del fondo inclinando y sacudiendo el tubo.
8. Agitar la probeta y su contenido ya sea de forma manual o mecánica.
9. Colocar la probeta sobre la mesa, destapar y lavar sus paredes interiores mediante el irrigador, introduciéndolo hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión para remover todo el material.
10. Retirar el irrigador en forma similar, regulando el flujo de la solución de modo de ajustar el nivel final a 380 mm.
11. Dejar sedimentar por un período de $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$; al pasar el tiempo determinado leer y registrar el nivel superior de la arcilla (N_t) aproximando al milímetro.
12. Introducir el pisón en la probeta y hacerlo descender suavemente hasta que quede apoyado en la arena. Registrar el nivel superior de la arena (N_a) aproximando al milímetro.

c) Cálculos

Calcular el equivalente de arena de acuerdo a la siguiente fórmula, aproximando al 1 %.

$$EA(\%) = \left(\frac{N_a}{N_t} \right) * 100$$

Donde:

EA =Equivalente de arena (%)

Na = Nivel superior de la arena (mm)

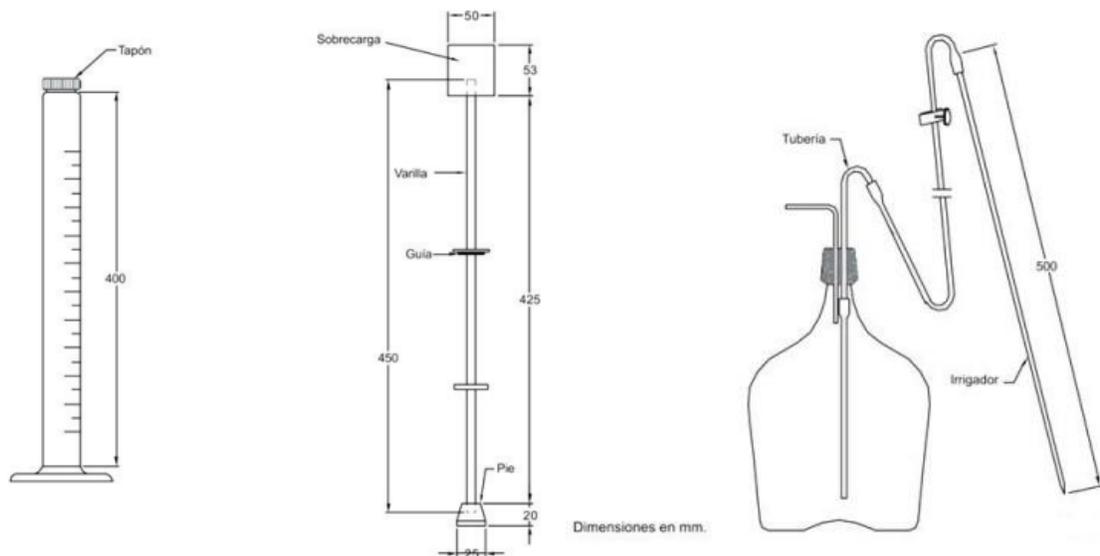
Nt = Nivel superior de la arcilla (mm)

Calcular el equivalente de arena de cada muestra como el promedio aritmético de los resultados de dos ensayos paralelos, con aproximación al 1 % superior.

d) Precisión

Debe aceptarse la determinación del equivalente de arena solamente cuando la diferencia entre dos resultados obtenidos por el mismo operador, en ensayos paralelos sobre muestras gemelas, sea igual o inferior a 4 puntos; caso contrario repetir el ensayo con muestras gemelas.

Figura 6. Probeta graduada, Sifón



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.1.5. Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en agregado grueso (ASTM D 5821-13)

Este método de prueba cubre la determinación del porcentaje de una muestra de agregado grueso (por masa o por conteo) que consiste de partículas fracturadas que cumplan requisitos especificados.

Equipo y materiales

Balanza

Una balanza o báscula con una exactitud y precisión dentro de 0,1 % de la masa de la muestra de prueba para cualquier punto dentro del rango de uso.

Mallas

Cuarteador

Un cuarteador de muestras apropiado para dividir la muestra de campo a porciones de prueba.

Espátula

Una espátula o herramienta similar para ayudar en la clasificación de las partículas de agregado.

Preparación de la muestra

Seque la muestra lo suficiente para obtener una separación limpia de agregado fino y grueso en la operación de cribado. Criebe la muestra sobre la malla de 4,75 mm (N° 4), u otra malla especificada para obtener el material para esta prueba, luego reduzca la porción retenida en la malla a muestra de prueba apropiado usando un cuarteador.

La masa de la muestra de prueba debe ser lo suficientemente grande de tal forma que la partícula más grande no sea más de 1 % de la masa de la muestra; o debe ser al menos en la cantidad indica abajo, lo que sea más pequeño:

Tabla 11. Masa mínima de la muestra de prueba

Tamaño nominal máximo abertura cuadrada		Masa mínima de la muestra de prueba	
mm	in	g	lb
9,5	3/8	200	0,5
12,5	1/2	500	1
10,0	3/4	1500	3
25,0	1	3000	6,5
37,5	1 1/2	7500	16,5
50,0	2	15000	33
63,0	2 1/2	30000	66
75,0	3	60000	132
90,0	3 1/2	90000	198

Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Para agregado con tamaño nominal máximo de 19.0 mm (3/4”) o mayor, donde el contenido de partículas fracturadas se va a determinar para el material retenido en la malla de 4,75 mm (N° 4) o una malla más pequeña, la muestra de prueba puede separarse sobre la malla de 9,5 mm (3/8”). La porción que pasa la malla de 9,5 mm (3/8”) puede ser reducida aún más, hasta un mínimo de 200 g (0,5 lb). Esto reducirá el número de partículas a ser separadas durante el procedimiento. En este caso, el porcentaje de partículas fracturadas se determina en cada fracción y se calcula un porcentaje promedio ponderado de partículas fracturadas con base en la masa de cada una de las fracciones para reflejar el porcentaje total de partículas fracturadas en la muestra completa.

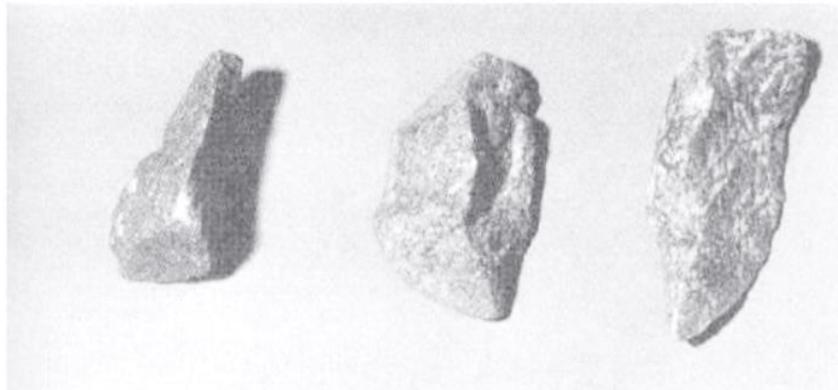
Procedimiento

1. Lave la muestra sobre la malla designada para retirar cualquier material fino que quede, y seque hasta obtener una masa constante. Determine la masa de la muestra de prueba, y cualquier determinación subsecuente con una aproximación de 0,1 % de la masa seca de la muestra original.
2. Extender la muestra seca en una superficie plana limpia y suficientemente grande para permitir una inspección cuidadosa de cada una de las partículas. Para verificar que una

partícula cumple con los criterios de fractura, sostenga la partícula de manera que la cara sea vista directamente. Si la cara constituye al menos un cuarto del área de la sección transversal máxima de la partícula de agregado, considérela una cara fracturada.

3. Usando la espátula o una herramienta similar separe en dos categorías: (1) partículas fracturadas en base a si la partícula tiene el número de caras fracturadas requerido, y (2) partículas que no cumplen el criterio especificado. Use las figuras para ayudarse en esta determinación. Nótese que algunas de las partículas en las figuras muestran más de una cara fracturada. Si el número de caras fracturadas no es dado en la especificación, la determinación se hará con base en un mínimo de una cara fracturada.
4. Determine la masa o número de partículas que no cumplan los criterios de fractura especificado. Use la masa para calcular el porcentaje de partículas fracturadas a menos que se especifique utilizar el porcentaje por conteo.
5. Si se especifica más de un número de caras fracturadas (por ejemplo, 70 % con una o más caras fracturadas y 40 % con dos o más caras fracturadas), repita el procedimiento en la misma muestra para cada uno de los requerimientos.

Figura 7. Partículas fracturadas (orillas angulosas y superficie rugosa)



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 8. Partícula fracturada (orillas angulosas, superficie lisa)



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 9. Partícula fracturada (orillas redondeadas, superficie rugosa)



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 10. Partícula fracturada (centro) acompañada por dos partículas no fracturadas



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Cálculos

Reporte el porcentaje por masa o por conteo de partículas con el número especificado de caras fracturadas con una aproximación del 1 % de acuerdo con lo siguiente:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con el número de caras fracturadas especificado

F = Masa o conteo de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas

N = Masa o conteo de partículas en la categoría de que no cumple el criterio de partícula fracturada

Reporte el criterio de fractura especificado y el usado en la evaluación.

Reporte la masa total de la muestra de agregado grueso ensayado, en gramos.

Reporte la malla en la cual se retuvo la muestra de prueba.

2.9.1.6. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de Los Ángeles.

Equipo y materiales

Máquina de Los Ángeles

Tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar una moto. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegure la estanqueidad del material sobre tamiz N° 50 (0,3mm).

Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada rígida y firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro, de modo que se proyecte radialmente hacia el interior en 90 ± 3 mm. La distancia entre la aleta y la abertura, medida a lo largo de la circunferencia exterior del cilindro y en la dirección de rotación, debe ser igual o mayor que 1,25 m.

La rotación debe estar comprendida entre 30 y 33 rpm, ser contrapesada e impulsada de modo de mantener una velocidad periférica uniforme y tener incorporado un dispositivo contador de revoluciones con detención automática.

Balanza

Con una capacidad superior a 10 kg y una precisión de 1 g.

Tamices

Deben cumplir con las especificaciones nombradas en el método de análisis granulométrico por tamizado, descrito anteriormente.

Horno

Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensayo.

Esferas (carga abrasiva)

Un juego de esferas de acero de aproximadamente 47 mm de diámetro y de masas diferentes, distribuidas en un rango entre 390 y 445 g

Extracción y preparación de la muestra

Preparación

Determinar la granulometría de la muestra de acuerdo al Análisis granulométrico por tamizado, ya descrito.

Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra (en kg) debe ser igual o mayor que $2 D_n$ (D_n es el tamaño máximo nominal expresado en mm), y no menor que 50 kg para los grados 1 al 5 y 25 kg para los grados 6 y 7.

Acondicionamiento de la muestra de ensayo

Lavar la muestra y secar hasta masa constante en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Tamizar la muestra usando los tamices de las siguientes aberturas: 75 mm, 63 mm, 50 mm, 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm y 2,36 mm. Dejar el material separado en las fracciones resultantes de este tamizado.

De la Tabla elegir el grado de ensayo que mejor represente la granulometría de la muestra. Para ello, sumar los porcentajes parciales retenidos en los tamices correspondientes a cada uno de los grados y elegir para el ensayo el que entregue una mayor suma.

Procedimiento

1. Pesar los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, registrar la masa del total de material por ensayar como masa inicial de la muestra (m_i), aproximando a 1 g.
2. Colocar la masa inicial de material en la máquina de Los Ángeles y ensayar de acuerdo al grado elegido. Una vez terminado el número de revoluciones correspondiente, sacar el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones. Separar la carga abrasiva.
3. Efectuar un primer tamizado en un tamiz de 2,36 mm o superior, luego en un tamiz de 1,7 mm.
4. Reunir todo el material retenido en ambos tamices, lavar, secar hasta masa constante en horno a 100 ± 5 °C y dejar enfriar a temperatura ambiente. Pesar y registrar la masa del material retenido como masa final de la muestra (m_f), aproximando a 1 g.

Cálculos

Calcular el desgaste del árido como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, aproximando a un decimal, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100$$

Donde:

P (%) = Pérdida de masa de la muestra (%)

m_i = Masa inicial de la muestra (g)

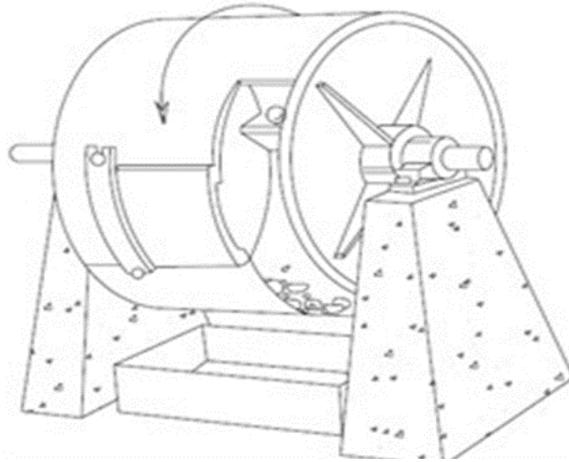
m_f = Masa final de la muestra (g)

Tabla 12. Grados de ensayo (definidos por sus rangos de tamaño, en mm)

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

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 11. Máquina de los Ángeles



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2. Ensayos de caracterización del betumen

2.9.2.1. Método de ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97)

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia, valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

Equipos y materiales

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 $47,5 \pm 0,05$ g. El peso total de la aguja y el vástago será de $50,0 \pm 0,05$ g. Para cargas totales de 100 g y 200 g, dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo, se estipulan pesas de $50,0 \pm 0,05$ g y $100,0 \pm 0,05$ g.

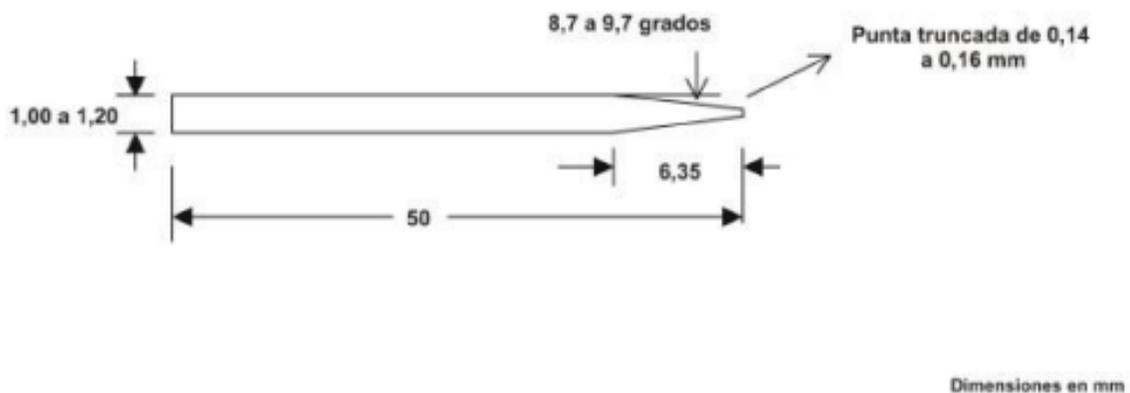
La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

Aguja de penetración

La aguja (Figura 2.13) 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 2,00 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 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.

Figura 12. Aguja para ensayo de penetración



Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia.

Cápsulas

Las cápsulas deben ser de metal o vidrio, de forma cilíndrica y con fondo plano. Sus dimensiones son las siguientes:

Para penetraciones bajo 200: Diámetro (mm) 55 Profundidad (mm) 35.

Para penetraciones entre 200 y 350: Diámetro (mm) 55 Profundidad (mm) 70.

Baño de agua

Tendrá una capacidad mínima de 10 l y un sistema apto para mantenerla a temperatura a 25 °C, o cualquiera de ensayo, con una tolerancia de $\pm 0,1$ °C; tendrá, además; una bandeja perforada ubicada a no menos de 50 mm del fondo, ni menos de 100 mm bajo el nivel del líquido en el baño.

Si el ensayo de penetración se realiza en el mismo baño, éste debe estar provisto de una bandeja que soporte el peso del penetrómetro. Para determinaciones a bajas temperaturas se puede utilizar una solución salina.

Transportador de cápsula

Debe tener una capacidad mínima de 50 ml y una profundidad suficiente de agua que permita cubrir la altura del contenedor de la muestra. Debe estar provisto de algún medio que asegure firmemente la cápsula y evite el balanceo; para lo que tendrá tres brazos que permitan a lo menos tres puntos de contacto para sostener la cápsula.

Aparato medidor de tiempo

Para operar un penetrómetro manual, utilice cualquier aparato que mida el tiempo, tal como un medidor de tiempo eléctrico, un cronómetro o cualquier dispositivo a cuerda, que esté graduado en 0,1 s o menos y cuya presión esté dentro de $\pm 0,1$ s para un intervalo de 60 s.

Termómetros

Se pueden usar termómetros de vidrio de rango adecuado, con subdivisiones y escala máxima de error 0,1 °C, o cualquier otro aparato que mida temperaturas con igual exactitud, precisión y sensibilidad.

Condiciones generales

Cuando no se especifiquen las condiciones de ensayo, considere la temperatura, carga y tiempo, en 25 °C, 100 g y 5 s, respectivamente. Otras condiciones de temperatura, carga y tiempo pueden usarse en ensayos especiales.

Tabla 13. Condiciones para ensayos especiales

Temperatura (°C)	Carga (g)	Tiempo (s)
0	200	60
4	200	60
45	50	5
46,1	50	5

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Extracción y preparación de la muestra

Calentar la muestra cuidadosamente, agitando para prevenir sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluida para vaciar. En ningún caso la temperatura debe elevarse más allá de 60 °C sobre el punto de ablandamiento esperado para los alquitranes, o no más allá de 90 °C sobre el punto de ablandamiento para caso de asfaltos. No calentar la muestra por más de 30 min. y evitar la incorporación de burbujas en la muestra.

Verter la muestra en la cápsula a una profundidad tal que cuando se enfríe a la temperatura de ensayo, la profundidad de la muestra sea a lo menos 10 mm mayor que la profundidad a la cual se espera que la aguja penetre. Vierta dos porciones separadas para cada variación de las condiciones de ensayo.

Proteja la cápsula contra el polvo, cubriéndola con un vaso y déjela enfriar al aire a una temperatura entre 15 y 30 °C, entre 1 y 1,5 h para cápsula pequeña (90 ml) y 1,5 y 2 h, para los más grandes (175 ml). Cuando utilice transportador de cápsula, coloque las muestras junto con éste en el baño de agua, manteniéndolas a la temperatura de ensayo.

Procedimiento

1. Examinar la aguja y guía para comprobar que esté perfectamente seca y libre de otros materiales extraños. Limpie la aguja de penetración con tuoleno u otro solvente adecuado, seque con un paño limpio e inserte la aguja en el penetrómetro. A menos que se especifiquen otra cosa, coloque el peso de 50 g sobre la aguja, obteniendo una masa total de $100 \pm 0,1$ g.

Posicionar la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra; realice esto con la punta de la aguja haciendo contacto real con su imagen reflejada sobre la superficie de la muestra.

2. Hacer un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y no a menos de 10 mm entre uno y otro. Si la penetración es mayor a 200, use mínimo de tres agujas, dejándolas en la muestra hasta completar las tres penetraciones.

Precisión

Usar el siguiente criterio para juzgar si los resultados de penetración son aceptables para asfaltos a 25 °C.

Precisión para un solo operador: el coeficiente de variación determinado para un solo operador, es de 1,4 % para penetraciones sobre 60. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente ejecutados por el mismo operador, con el mismo material de cualquier penetración y usando el mismo equipo, no deberían diferir uno del otro en más de 4 % de su media o 1 unidad en otros casos.

Precisión entre laboratorios: el coeficiente de variación encontrado entre laboratorios es de 3,8 % para penetraciones sobre 60. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente ejecutados, con el mismo material de cualquier penetración y en dos laboratorios diferentes, no deberían diferir uno del otro en más de 11 % de su media o 4 unidades en otros casos. En la Tabla se entregan los criterios para distintos casos:

Tabla 14. Criterios de precisión

Material	Desviación estándar o coeficiente de variación (unidad o %)	Rango de aceptación de dos resultados de ensayo (Unidades o %)
Precisión para un solo operador		
Asfalto a 25 °C, penetraciones bajo 50 (unidades)	0,35	1,00
Asfalto a 25 °C, penetraciones sobre 60 (% de su medida)	1,40	4,00
Alquitranes a 25 °C (% de su medida)	5,20	15,00
Precisión entre laboratorios		
Asfalto a 25 °C, penetraciones bajo 50 (unidades)	1,40	4,00
Asfalto a 25 °C, penetraciones sobre 60 (% de su medida)	3,80	11,00
Alquitranes a 25 °C (% de su medida)	1,40	4,00

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

El informe es el promedio de tres determinaciones, aproximando a la unidad. Los valores no deben diferir más allá de las magnitudes que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 15. Máxima entre mediciones

Penetración	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
Máxima diferencia entre la mayor y la menor determinación	2	4	12	20

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.2. Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de cleveland (ASTM D1310-01; AASHTO T79.96)

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos de petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79 °C determinado por medio de este ensayo.

Equipos y materiales

Copa Abierta de Cleveland

Consiste en una copa de ensayo, una placa de calentamiento, un aplicador de la llama, un calentador y apoyos. Una forma de armar el aparato, la placa de calentamiento y la copa, es como se ilustra en las Figura 2,14 y Figura 2,15, respectivamente.

Protector

Se recomienda un protector cuadrado de 460 mm y 610 mm de alto que tenga un frente abierto.

Preparación del aparato

Armar el aparato sobre una mesa nivelada en una pieza sin corrientes de aire; ubique el protector alrededor del aparato de encendido, afirmado por algún medio adecuado que permita la lectura del punto de inflamación.

Lavar la copa de ensayo con un solvente apropiado y quite cualquier aceite o vestigios pegados o residuos remanentes de ensayos anteriores. Si hay depósitos de carbón remover con una esponja de acero. Limpiar la copa bajo un chorro de agua fría y seque por unos pocos minutos sobre una llama, placa caliente o en un horno y eliminar los últimos indicios de solvente y agua. Enfriar la copa por lo menos a 55 °C por debajo del Punto de Inflamación esperado antes de usarla.

Mantener el termómetro en posición vertical con el bulbo a una distancia de 6,5 mm del fondo de la copa y localizada en el punto medio del trecho entre el centro y el borde de la copa, en un diámetro perpendicular al arco o línea del recorrido de la llama de prueba y en el lado opuesto de la llama del quemador.

Procedimiento

1. Llenar la copa a una temperatura conveniente, no excediendo los 100 °C por encima de los esperado para el punto de ablandamiento; de esa manera la parte superior del menisco está en la línea de llenado. Para ayudar en esta operación use un medidor de llenado. Si un exceso de muestra se ha agregado a la copa, quítelo usando una pipeta u otro aparato adecuado. Sin embargo, si hay muestras que esté fuera del aparato,

vacíe, limpie y vuelva a llenar. Destruya cualquier burbuja de aire sobre la superficie de la muestra.

2. La luz de la llama de prueba se ajusta a un diámetro de 3,00 a 5,00 mm y se compara con el tamaño del cabezal.
3. Aplicar calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba con velocidad entre 14 y 17 °C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra se aproxime a los 55 °C por debajo del punto de inflamación esperado, disminuir el calor de modo que la velocidad de la temperatura para 28 °C antes del punto de inflamación, sea de 5 a 6 °C por minuto.
4. Comenzar, al menos 28 °C por debajo del punto de inflamación, aplique la llama de prueba cada 2 °C sucesivos leídos en el termómetro. Pase la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulos recto al diámetro que pasa a través del termómetro; con suavidad continúe el movimiento aplicando la llama en línea recta a lo largo de la circunferencia de un círculo que tenga un radio al menos de 150 mm. El centro de la llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2 mm por encima del plano del borde superior de la copa, pasando en una dirección primero y en el próximo intervalo en la dirección opuesta. El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 s durante los últimos 17 °C, suba la temperatura previa al punto de inflamación. Evitar alteraciones del vapor en la copa de ensayo poniendo atención en movimientos descuidados o en aires suaves cercanos a la copa.
5. Informar el punto de inflamación como la temperatura leída en el termómetro, cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces circunda la llama de prueba.
6. Para determinar el punto de combustión continuar calentando de modo que la temperatura de la muestra se eleve a una razón de 5 a 6 °C por minuto. Continuar aplicando la llama a intervalos de 2 °C hasta que el material se inflame y continúe quemándose como mínimo 5 s. Informar la temperatura de este punto como el punto de combustión del material.

Corrección por presión barométrica

Si la presión barométrica real durante el tiempo de ensayo es menor que 715 mmHg, informar y sumar la corrección apropiada al punto de inflamación y punto de combustión de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 16. Valores de corrección del punto de inflamación y de combustión

Presión barométrica (mm de mercurio)	Corrección (°C)
715-665	2
664-610	4
609-550	6

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Cálculos

Corregir el punto de inflamación o el punto de combustión o ambos, de acuerdo con la presión barométrica.

Informar la corrección del punto de inflamación o punto de combustión o ambos, como el punto de inflamación o combustión de la copa abierta de Cleveland.

Precisión

Use los siguientes datos para juzgar la aceptabilidad de resultados (95 % confianza).

Repetibilidad

Resultados duplicados por el mismo operador serán considerados sospechosos si difieren en más de las siguientes cantidades:

Punto de inflamación 8 °C.

Punto de combustión 8 °C.

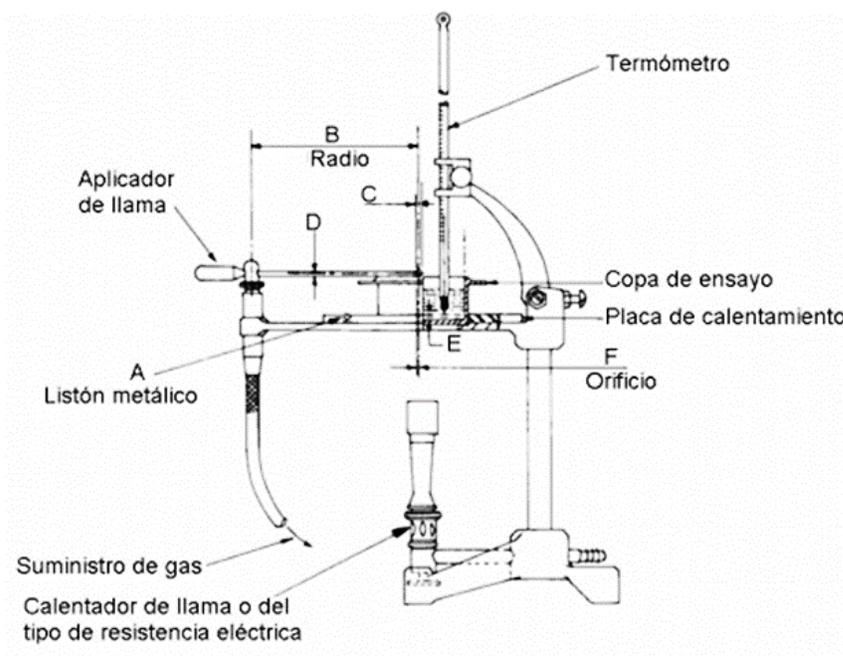
Reproducibilidad

Resultados presentados por cada laboratorio, serán considerados sospechosos si difieren en más de las siguientes cantidades:

Punto de inflamación 16 °C.

Punto de combustión 14 °C.

Figura 13. Copa abierta de Cleveland



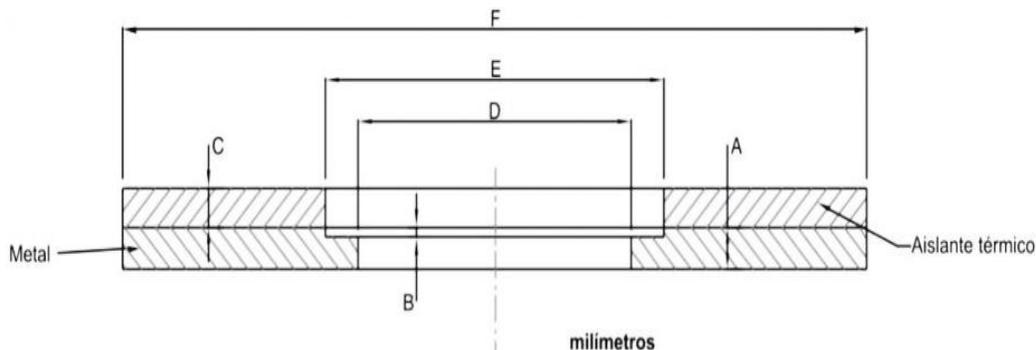
Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Tabla 17. Especificaciones

Diámetro	Milímetros		Pulgadas	
	Min	Max	Min	Max
A Diámetro	3,8	5,4	0,2	0,2
B Radio	152	nominal	6	nominal
C Diámetro	1,6	5	0,1	0,2
D	5		0,2	
E	6,4 aprox.		0,3 aprox.	
F Diámetro	0,8	nominal	0,03	nominal

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 14. Placa de calentamiento, Copa abierta de Cleveland



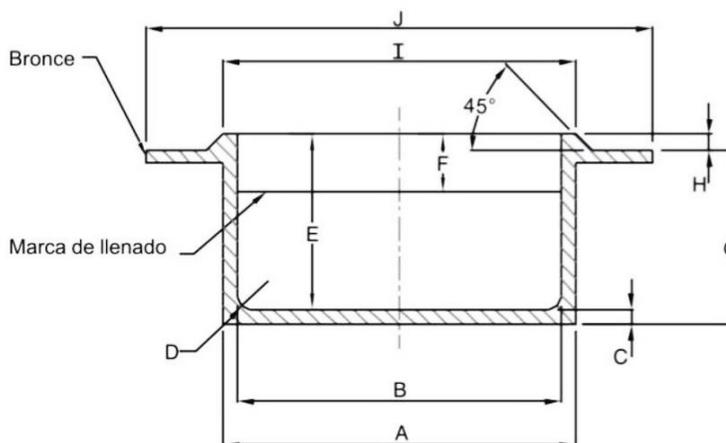
Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Tabla 18. Especificaciones

Diámetro	Milímetros		Pulgadas	
	Min	Max	Min	Max
A	6,4 nominal		0,3	nominal
B	6,4 nominal		0,3	nominal
C	6	7	0,2	0,3
D Diámetro	54,5	56,5	2,2	2,2
E Diámetro	69,5	70,5	2,7	2,8
F Diámetro	150 nominal		0,03	nominal

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 15. Placa de calentamiento, Copa abierta de Cleveland



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Tabla 19. Especificaciones

Milímetros		Pulgadas	
Min.	Max.	Min	Max.
67,5	69	2,7	2,7
62,5	64	2,5	2,5
2,8	3,6	0,1	0,1
4 aprox.		0,2	Nominal
32,5	34	1,3	1,3
9	10	0,4	0,4
31	32,5	1,2	1,3
2,8	3,6	0,1	0,1
67	70	2,6	2,8
97	101	3,8	3,9

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.3. Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51-00)

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

Equipos y materiales

Moldes

El molde, de bronce o zinc, debe ser similar en diseño al mostrado en Figura 2.16; los extremos b y b' se denominan clips y las partes a y a', lados del molde. Cuando se arma el molde se obtiene la briqueta especificada, con las dimensiones que se indican:

- Distancia entre los centros: 111,5 a 113,5 mm.
- Largo total de la briqueta: 74,5 a 75,5 mm.
- Distancia entre clips: 29,7 a 30,3 mm.
- Borde del clip: 6,8 a 7,2 mm.
- Radio del clip: 15,75 a 16,25 mm.
- Ancho mínimo de la sección transversal: 9,9 a 10,1 mm

- Ancho de la boca del clip: 19,8 a 20,2 mm.
- Distancia entre los centros de radio: 42,9 a 43,1 mm.
- Diámetro del orificio del clip: 6,5 a 6,7 mm.
- Espesor: 9,9 a 10,1 mm.

Baño de agua

Mantener el baño a la temperatura de ensayo especificada, con una tolerancia de $\pm 0,1$ °C. El volumen mínimo de agua es de 10 l. Sumergir la muestra a una profundidad no menor que 10 cm y apoyar sobre una bandeja perforada, ubicada a no menos que 5 cm del fondo del baño.

Ductilímetro

Para traccionar las briquetas de material bituminoso se puede usar cualquier aparato construido de modo que la muestra se mantenga continuamente sumergida en agua, como se especificará en el procedimiento, al mismo tiempo que los clips se traccionan a una velocidad uniforme y sin vibraciones excesivas. Este aparato debe ser termo regulable para mantener la temperatura especificada en forma homogénea en toda la masa de agua, dentro de la tolerancia.

Termómetros

El termómetro por utilizar será ASTM 63C con un rango de temperatura entre -8 y 32 °C.

Procedimiento

1. Preparación del molde

Armar el molde sobre una placa base; cubrir la superficie de la placa y las superficies interiores de los lados a y a' del molde (Figura 2.16) con una película delgada de desmoldante para prevenir que el material por ensayar se adhiera. La placa sobre la cual se coloca el molde debe estar perfectamente plana y a nivel, de modo que la superficie inferior del molde esté completamente en contacto.

2. Moldeo de las muestras para el ensayo

Calentar la muestra con cuidado, previniendo calentamientos locales, hasta que esté suficientemente fluida para verter. Sin embargo, durante el calentamiento, la temperatura no debe exceder de 80 a 110 °C por encima del punto de ablandamiento esperado. Tamizar

la muestra fundida a través del tamiz 0,3 mm (N° 50); luego continuar revolviendo y verter el material dentro del molde. Durante el llenado cuide no tocar ni desarreglar el molde, de modo que no se distorsione la briqueta; verter con un chorro delgado hacia atrás y hacia adelante, de extremo a extremo, hasta que el molde quede por sobre el nivel de llenado. Deje enfriar a temperatura ambiente por un período de 30 a 40 min y luego colocar en el baño de agua manteniendo a la temperatura de ensayo especificada por 30 min. Luego recortar el exceso de ligante asfáltico con una espátula o cuchillo caliente, resistente y afilado, de modo que el molde se ajuste al nivel de llenado.

3. Conservación de las muestras a la temperatura de ensayo

Colocar la placa y el molde con la briqueta en el baño de agua y manténgala por un período de 85 a 95 min a la temperatura especificada; luego quitar la briqueta de la placa, separe las partes a y a' e inmediatamente ensayo la briqueta.

4. Ensayo

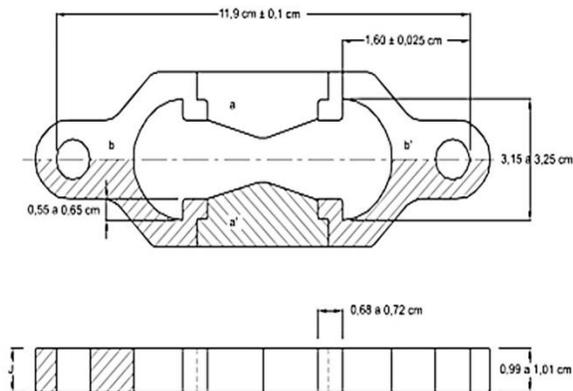
Enganchar los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y sepárelos a la velocidad especificada hasta la ruptura de la briqueta; se permite una tolerancia de $\pm 5\%$ para la velocidad especificada. Medir la distancia en cm. entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura. Durante el desarrollo del ensayo, el agua en el estanque del ductilímetro cubrirá la briqueta a lo menos 2,5 cm. y ésta se mantendrá continuamente a la temperatura especificada con una tolerancia de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Un ensayo normal es aquel en el cual el material entre dos clips se ha estirado hasta el punto de convertirse en un hilo y la ruptura ocurre en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal. Informar el promedio de tres ensayos normales como la ductilidad de la muestra, indicando la temperatura del ensayo.

Si el material bituminoso llega a tener con la superficie del agua o el fondo del baño, el ensayo no será considerado normal. Se ajustará la densidad del agua del baño agregando alcohol metílico o cloruro de sodio de modo que el material bituminoso no llegue a la superficie del agua ni toque el fondo del baño durante el ensayo.

Si no se lograra un ensayo normal en tres ensayos sucesivos en iguales condiciones, informar ductilidad como “no obtenible” bajo esas condiciones de ensayo.

Figura 16. Molde para ductilidad de muestra de ensayo



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.4. Método para determinar la densidad (ASTM D71-94; AASHTO T 229-97)

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Equipos y materiales

Picnómetro de 24 a 30 ml de capacidad

Balanza analítica

Baño termostático capaz de mantener la temperatura requerida en un rango $\pm 0,1$ °C.

Termómetro de -8 a 32 °C, con una precisión de 0.1 °C.

Agua destilada

Calibración del picnómetro

Determinar la masa del picnómetro limpio y seco con su tapa, y designarla como A, aproximando a 0,01 g.

Llenar el picnómetro con agua destilada y ajuste firmemente la tapa girándola. Sumergir totalmente el picnómetro en un vaso con agua destilada. Colocar el vaso con el picnómetro en el baño de agua de forma que el agua del baño quede al mismo nivel que el del vaso, mantener en el baño como mínimo 30 min a la temperatura de ensayo. Retirar el picnómetro y secar rápida y cuidadosamente toda humedad superficial, determinar la masa y designarla como B, aproximando a 0,01 g

Procedimiento para cementos asfálticos

1. Calentar una pequeña cantidad de material hasta una condición fluida, mediante la aplicación de calor en forma suave; prevenir la pérdida por evaporación. Una vez que la muestra esté suficientemente fluida verter dentro del picnómetro, limpio y seco, hasta aproximadamente la mitad. Es conveniente calentar ligeramente el picnómetro antes de vaciar el material. Tomar precauciones para evitar que el material toque las paredes del picnómetro por encima de su nivel final, y evitar la inclusión de burbujas de aire, aplicando ligeramente la llama de un mechero a la superficie del picnómetro y del asfalto. Enfriar el picnómetro y su contenido a temperatura ambiente y determinar la masa con tapa incluida. Designar esta masa como C, aproximando a 0,01 g.
2. Terminar de llenar con agua destilada, insertar la tapa firmemente, sumergir completamente en un vaso lleno de agua destilada y colocar en el baño, de acuerdo a lo indicado en el inciso b. de la calibración del picnómetro, a la temperatura de ensayo por unos 30 min. Retirar el picnómetro del vaso y séquelo con un paño. Determinar la masa y designarla como D, aproximando a 0,01 g.
3. Determinar la densidad del asfalto de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\rho_b = C - \frac{A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w * 1000$$

Donde:

ρ_b = Densidad del asfalto a la temperatura de ensayo (kg/m).

ρ_w = Densidad del agua a la temperatura de ensayo (k/m).

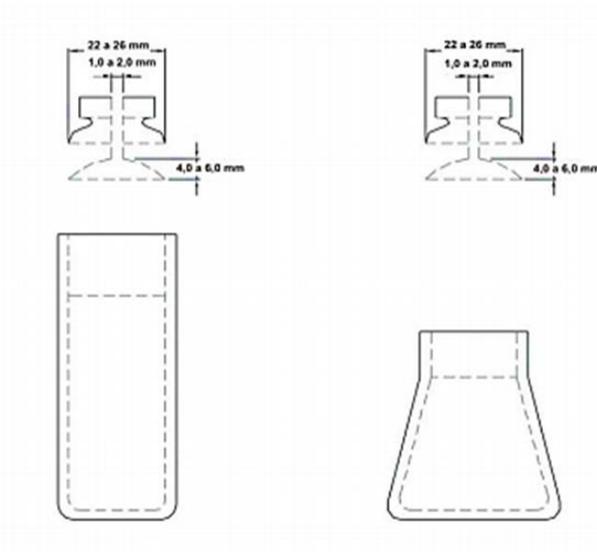
a) Informe

El informe debe incluir:

La densidad, aproximada a 1 (kg/m³)

La temperatura de ensayo.

Figura 17. Picnómetros



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.5. Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D36 AASHTO T53-96)

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bol.

Generalidades

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos. Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, de manera de comparar resultados.

Definiciones

Punto de Ablandamiento

Es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de

dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

Equipos y materiales

Equipo Normal

Anillo de bronce que cumpla con las dimensiones que se muestran en la Figura 16

Bolas de acero con un diámetro de 9,5 mm y que pesen entre $3,50 \pm 0,050$ g.

Una guía para centrar la bola, construida de bronce, que tenga en general la forma y las dimensiones indicadas

Baño

Un vaso de vidrio de 800 ml, capaz de resistir el calor, que tenga un diámetro no menor que 85 mm y una profundidad no menor que 120 mm.

Soporte del Anillo

El anillo deberá estar sujeto sobre un soporte como se muestra en el conjunto.

Los anillos deberán sujetarse en posición horizontal, con el fondo a 25mm por encima de la superficie superior de la placa, y la superficie inferior de ésta a una distancia de por lo menos 13 mm y no mayor de 19 mm al fondo del vaso. La profundidad del líquido en el vaso deberá ser mayor que 100 mm.

El termómetro deberá suspenderse de manera que el fondo del bulbo esté a nivel con el fondo del anillo y dentro de 13 mm de distancia del anillo, pero de manera que no lo toque.

Termómetros

Termómetros del tipo ASTM para punto de ablandamiento bajo que tengan un rango de -2° a $+80^{\circ}\text{C}$ y cumplan con los requisitos para termómetro 15C, descritos en la norma ASTM E 1 y un ASTM 16C (rango 30 a 200°C) para puntos de ablandamientos altos.

Extracción y preparación de la muestra

Caliente con cuidado la muestra, agitándola continuamente para prevenir un sobrecalentamiento local, hasta que esté suficientemente fluida para verterla. En ningún caso la temperatura de la muestra debe exceder de 110° C por sobre del punto de ablandamiento estimado. Elimine las burbujas de aire incorporadas en la muestra mediante agitación continua.

Lleve la muestra de asfalto a la temperatura de vertido, en un tiempo no mayor que 240 min; vierta la muestra caliente dentro de los dos anillos, precalentados aproximadamente a la temperatura de vertido. Mientras se llenan los anillos debe apoyarse sobre una placa de bronce, previamente recubierta con un agente desmoldante, para prevenir que el material bituminoso se adhiera a la placa. Enfríe por lo menos durante 30 min; en ningún caso deje transcurrir más de 4 h antes de terminar el ensaye. Las muestras que estén blandas a temperatura ambiente, se deben enfriar durante un mínimo de 30 min a una temperatura mínima de 8°C por debajo del punto de ablandamiento esperado.

Después de enfriado, corte el exceso de material con una espátula o cuchillo ligeramente caliente. En caso de que se repita el ensaye, utilice una muestra nueva y un recipiente limpio.

Procedimiento

Procedimiento para materiales que tengan un punto de ablandamiento igual o menor que 80°c

Ensamble el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llene el baño con agua fresca destilada a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ a una profundidad no menor de 100 mm ni mayor de 110 mm. Mantenga la temperatura del baño a 5°C durante 15 min, colocando el recipiente del ensaye en agua helada, si es necesario. Utilizando unas pinzas, coloque una bola previamente ajustada a la misma temperatura del baño, en cada una de las guías de centrado de las bolas.

Aplique calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de 5°C por min; evite el efecto de las corrientes de aire, utilizando protectores si es necesario.

Nota 1: Para el calentamiento se permite el uso de un mechero de gas o un plato caliente eléctrico: Sin embargo, el plato eléctrico precisa tener un sistema para incrementar las temperaturas sin demora, para mantener la velocidad de calentamiento.

La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediará durante el período del ensaye. La variación máxima permisible para cualquier minuto de tiempo, después de los tres minutos, será $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Elimine todos los ensayos en los que la velocidad de aumento de temperatura no esté dentro de estos límites.

Anote para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior. Si la diferencia entre estos dos valores excede 1°C , repita el ensaye.

Procedimiento para materiales que tengan un punto de ablandamiento mayor que 80°C

Utilice el mismo procedimiento descrito en 10, con las siguientes modificaciones:

Use glicerina en vez de agua.

La temperatura inicial del baño de glicerina será 32°C .

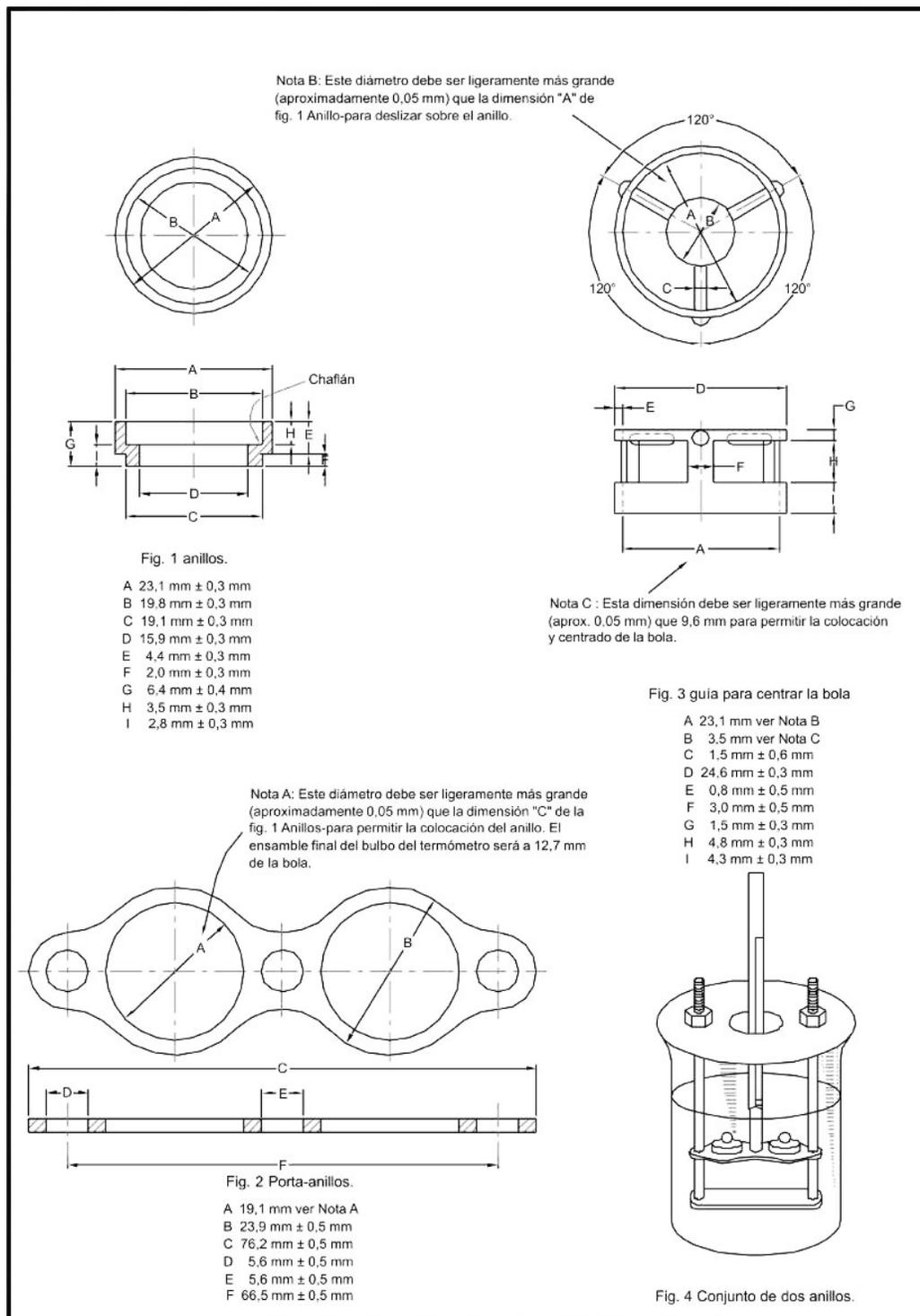
Precisión

El siguiente criterio se debe utilizar para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad).

Repetibilidad. La duplicidad del punto de ablandamiento obtenido por el mismo operador no se considerará dudoso a menos que difiera de ésta más de 1°C (desviación normal estimada 0,73%).

Reproducibilidad. Los puntos de ablandamiento informados por cada uno de dos laboratorios, no se considerarán dudosos a menos que los dos informes difieran en más de 2°C (desviación normal estimada 1,26%).

Figura 18. Anillo, Porta anillo, guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.6. Método para determinar el contenido de ligante de mezclas asfálticas por centrifugación – ensaye de extracción

El método describe los procedimientos para determinar cuantitativamente el contenido de ligante asfáltico en una mezcla, mediante el proceso de centrifugación. Como solventes en el proceso de centrifugación se puede emplear tricloroetileno, cloruro de metileno o tricloroetano. A los áridos recuperados se le puede efectuar análisis granulométrico, de acuerdo con el Método A0602.

Equipo y materiales

Extractor

Consistente en un bol similar o mayor al que se muestra en la Figura A0604_1 y un aparato dentro del cual pueda girar el bol a una velocidad variable y controlada hasta 3.600 rpm. El aparato debe estar provisto de un contenedor que recoja el solvente despedido por el bol y un drenaje para evacuar el solvente. De preferencia, el aparato debe tener características antiexplosivas y debe instalarse debajo de una campana para tener una adecuada ventilación.

Papel filtro anular

De porosidad media y diámetro igual al del bol. El contenido de cenizas del papel no podrá exceder el 0,2 % de su masa.

Horno: Capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

Balanzas: De 1g y 0,01 g de precisión.

Probetas graduadas: De 1.000 y 2.000 ml de capacidad.

Crisol: Consistente en una cápsula de metal o porcelana de 125 ml de capacidad.

Mufla o mechero a gas: Capaz de mantener temperaturas entre 500 y 600°C .

Solución saturada de carbonato de amonio Grado reactivo.

Tricloroetileno, cloruro de metileno o tricloroetano Todos grados técnicos.

Preparación de la muestra

Determinación Del Contenido De Humedad

Previo al ensaye de extracción, seque la muestra hasta masa constante en un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

Procedimiento

Una vez seca la muestra de acuerdo a lo descrito en el punto “Determinación del contenido de humedad”, pésela y registre su masa como M_1 ; deberá cumplir con lo indicado en la Tabla

Coloque la muestra en un bol y cúbrala con el solvente a utilizar. Espere el tiempo necesario para que el solvente disgregue la muestra (máximo 1 h). Ponga bajo el tubo de drenaje un recipiente (vaso) para recoger el extracto.

Seque y pese el filtro; registre como M_{fi} . Colóquelo luego alrededor del borde del bol y cierre la cubierta herméticamente.

Haga funcionar la centrífuga, aumentando lentamente la velocidad hasta un máximo de 3.600 rpm; deténgala una vez que el solvente deje de fluir.

Una vez detenida la máquina, agregue aproximadamente 500 ml de solvente, según capacidad del extractor y repita el procedimiento anterior las veces necesarias (no menos de tres), hasta que se haya extraído el asfalto totalmente y el solvente salga limpio.

Vierta el solvente a medida que se recoge en el vaso, a un bidón o botella de mayor capacidad, con tapa evitando la pérdida de líquido. Terminado el lavado de la mezcla, mida el volumen de solvente recuperado y registre como V_1 . Inmediatamente, tome una muestra representativa de 100 ml (V_2) en un crisol previamente tarado (M_{ci}), cuidando que el solvente sea homogéneo, para lo cual es necesario agitarlo previamente.

Evapore, en un baño de agua caliente o placa caliente, el contenido del crisol hasta que quede completamente seco. Calcine el residuo al calor del rojo oscuro (500 a 600°C) mediante una mufla o una placa caliente; enfríe y agregue 5 ml de una solución de carbonato de amonio saturado por gramo de ceniza. Deje a temperatura ambiente durante

una hora y luego seque en horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta masa constante. Deje enfriar en un desecador y pese (Mcf)

Remueva el filtro y séquelo al aire. Extraiga el fino adherido tanto como sea posible y agréguelo

al bol del extractor. Seque el filtro hasta masa constante en un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$, péselo y registre su masa como Mff.

Saque cuidadosamente el árido que queda en el bol de la centrífuga y séquelo, hasta masa constante, en un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ o en una placa caliente. Registre como M_2 .

Cálculos

Calcule el contenido de cenizas en el crisol, como:

$$\mathbf{C = M_{cf} - M_{ci}}$$

Donde:

C= Contenido de cenizas en el crisol (g).

Mcf = Masa final del crisol (g).

Mci = Masa inicial del crisol (g).

Calcule la masa total de material fino en el volumen de solvente recuperado, como:

$$\mathbf{M_3 = C * V_1 / V_2}$$

Donde:

M_3 = Masa total de material fino en el volumen de solvente recuperado (g)

C= Contenido de cenizas en el crisol (g)

V_1 = Volumen total de solvente recuperado (ml)

V_2 = Volumen de la alícuota de solvente (ml)

Calcule la masa de material fino retenido en el filtro, como:

$$\mathbf{M_4 = M_{ff} - M_{fi}}$$

Donde:

M_4 = Masa de material fino retenido en el filtro (g)

M_{ff} = Masa final del filtro (g)

M_{fi} = Masa inicial del filtro (g)

Calcule el porcentaje de ligante asfáltico, aproximando a un decimal, de acuerdo a la expresión:

$$B = \left[\frac{M^1 - (M^2 + M^3 + M^4)}{M^2 + M^3 + M^4} \right] * 100$$

Donde:

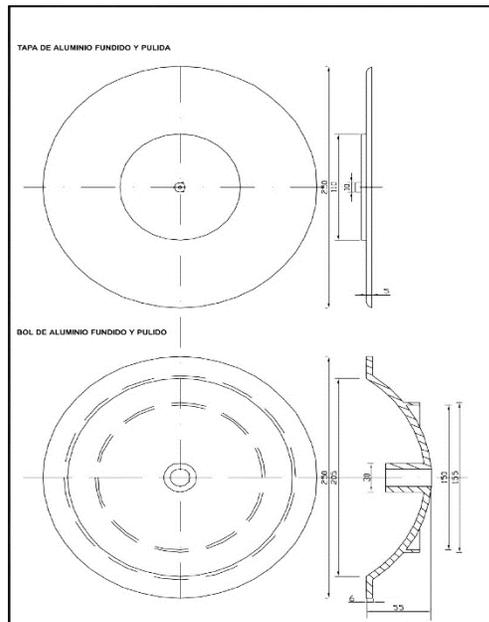
B = % de ligante asfáltico respecto al árido seco.

M_1 = Masa seca de la muestra (g)

M_2 = Masa seca de la muestra lavada (g)

M_3 = Masa total de material fino en el volumen de solvente recuperado (g) M_4 : Masa de material fino retenido en el filtro (g)

Figura 19. Tapa y Bol de Aluminio



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9.2.7. Método para determinar la viscosidad Saybolt (ASTM D 244)

Este método describe el procedimiento para la medida empírica de la viscosidad Saybolt de productos del petróleo a temperaturas especificadas entre 20 y 100°C.

Nota 1. Un método fundamental y preferencial para medir viscosidad Cinemática, es el que se describe en A0108, Método para Determinar la Viscosidad Cinemática. Este método requiere muestras menores, menor tiempo y es de mayor exactitud.

Las viscosidades Saybolt Universal y Saybolt Furol, pueden obtenerse de los valores de la viscosidad cinemática usando las tablas de conversión que se incluyen en el Método A0314, Método para Convertir Viscosidad Cinemática a Saybolt Universal o Saybolt Furol.

El índice Saybolt Universal o viscosidad cinemática se refiere a índices de viscosidad calculados usando valores de la Saybolt Universal. La viscosidad Saybolt Furol de materiales bituminosos a altas temperaturas está especificada en la norma ASTM E 102.

Definiciones

Viscosidad Saybolt Universal

El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de mezcla que fluye a través de un orificio Universal, calibrado bajo condiciones especificadas.

Viscosidad Saybolt Furol

El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol, calibrado bajo condiciones especificadas. La viscosidad Furol es aproximadamente un décimo de la viscosidad Universal y se recomienda para productos del petróleo que tienen viscosidad mayor que 1000 s (Saybolt Universal) tales como combustible, aceites y otros materiales residuales. La palabra “Furol” es una contracción de fuel and road oils.

Tabla 20. Termómetros Astm Para Viscosidades Saybolt

ASTM Temperatura Normal de ensaye	Viscosidad Saybolt Rango de temperatura	Termómetros	
		Subdivisiones	Termómetros ASTM
°C	°C	°C	°C
21,1	19 - 27	0,1	17C
25	19 - 27	0,1	17C
37,8	34 - 42	0,1	18C
50	49 - 57	0,1	19C
54,4	49 - 57	0,1	19C
60	57 - 65	0,1	20C
82,2	79 - 87	0,1	21C
98,9	95 - 103	0,1	22C

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Equipos y materiales

- Viscosímetro Saybolt con Baño
- Tubo succionador
- Soporte del termómetro
- Aparato para poner el termómetro en el viscosímetro.
- Embudo filtro
- Frasco recibidor
- Cronómetro Graduado en décimas de segundo y con una exactitud de 0,1 seg cuando se ensaya sobre un intervalo de 60 min. Los cronómetros eléctricos son aceptables, si son operados sobre un circuito de frecuencia controlada.
- Termómetro Para leer la temperatura de ensaye de la muestra. El termómetro para viscosidad Saybolt ASTM se muestra y debe cumplir con lo especificado en la norma ASTM E 1.
- Termómetro para baño Termómetros de viscosidad o cualquier otro medio de exactitud equivalente.

Preparación de los aparatos

Use un orificio Universal para lubricantes y materiales destilados con tiempos de flujo mayores que 32 s para obtener la exactitud deseada. No es conveniente ensayar con estos orificios líquidos con tiempo de flujo sobre 1000 s.

Use el orificio Furol para materiales residuales con tiempo de flujo mayor que 25 s. El tiempo de flujo Furol es aproximadamente una décima parte del tiempo de flujo Universal.

Instale el viscosímetro con baño donde esté libre de corrientes de aire y rápidos cambios de temperatura; localícelo de modo que la muestra no se contamine con polvo o vapores durante el ensaye.

No debe determinar la viscosidad a temperaturas inferiores a la temperatura de condensación atmosférica de la sala. Temperaturas de la sala sobre los 38°C no introducen errores superiores al 1,0 %; para una normalización y ensayos de arbitraje mantenga la temperatura de la sala entre 20 y 30°C y regístrela.

Llene el baño hasta no menos de 6,5 mm por encima del borde de derrame del viscosímetro, recomienda el medio del baño por cada temperatura de ensaye.

Disponga un revolvedor adecuado y control térmico para el baño, de modo que la muestra no fluctúe en más de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ después de alcanzar la temperatura de ensaye.

Limpie el viscosímetro con un solvente efectivo no tóxico y quite todo el solvente del viscosímetro.

Calibración del Viscosímetro

Calibre el viscosímetro Saybolt Universal a intervalos no mayores que 3 años, midiendo el tiempo de flujo a 38°C de una viscosidad normal apropiada siguiendo el procedimiento dado en los numerales 23 a 29.

El tiempo de flujo debe ser igual al valor certificado de la viscosidad Saybolt; si el tiempo de flujo difiere del valor certificado por más de 0,2%, calcule el factor de corrección, F, para el viscosímetro, como sigue:

$$F = \frac{V}{t}$$

Donde:

V= Viscosidad Saybolt certificada.

T =Tiempo del flujo en segundos a 38°C.

Calibre el viscosímetro Saybolt Furol a 150°C de la misma manera como se hizo antes, usando una viscosidad normal teniendo un tiempo de flujo mínimo de 90 s.

Los viscosímetros u orificios que tienen correcciones superiores al 1,0 % no deben usarse para ensayos de arbitraje.

Procedimiento

Si la temperatura de ensaye está por encima de la temperatura de la sala, el ensaye puede acelerarse por precalentamiento de la muestra a no más que 1,6° C por sobre de la temperatura de ensaye.

Inserte un tapón de corcho, que tenga un cordel unido para quitarlo con facilidad, dentro de la cámara de aire, en el fondo del viscosímetro. El corcho debe encajar estrechamente, lo suficiente para prevenir el escape de aire; una evidencia es la ausencia del líquido por ensayar sobre el corcho cuando se retira.

Filtre la muestra preparada a través de una malla 0,150 mm, tamizando directamente dentro del viscosímetro hasta el nivel que está sobre el borde de derrame.

Revuelva la mezcla hasta que la temperatura permanezca constante dentro de 0,1°C de la temperatura de ensaye, revolviendo continuamente durante 1 min. Revuelva con el termómetro del viscosímetro puesto en un soporte. Use un movimiento circular de 30 a 50 rpm en el plano horizontal.

Nota 5: La viscosidad de aceites refinados del petróleo, aceites lubricantes negros, residuos combustibles y productos cerosos similares, puede ser afectada por la historia térmica previa. Los siguientes procedimientos de precalentamiento deben seguirse para obtener resultados uniformes para viscosidad bajo los 95°C. Para obtener una muestra representativa, caliente la muestra en el recipiente original, cercano a los 50°C, revolviendo y agitándola. Sondee la parte inferior del recipiente con una varilla, para tener

la certeza que todo el material ceroso está en solución. Vierta 100 ml dentro de un Erlenmeyer de 125 ml. Taponee sueltamente con un tapón de corcho o goma; sumerja el frasco en el baño con agua en ebullición por 30 min. Mezcle bien, quite la muestra del baño y tamice a través de una malla 0,075 mm directamente dentro del viscosímetro. Complete el ensaye de viscosidad dentro de 1 h después del precalentamiento.

Quite el termómetro de la muestra; rápidamente retire el líquido del rebalse hasta que el nivel esté por debajo del borde de éste. Esto se hace colocando el extremo del tubo de succión en un punto del rebalse y aplicando succión. No toque el nivel de rebalse con el tubo de succión, o el menisco efectivo de la muestra se verá reducido.

Coloque el frasco receptor donde fluya el líquido desde el fondo del viscosímetro, de modo que apenas tope con el cuello del frasco. La marca de graduación estará entre 100 y 130 mm debajo del fondo del tubo del viscosímetro.

Suelte el corcho del viscosímetro usando el cordel; al mismo tiempo eche a andar el cronómetro. Pare el cronómetro en el instante que la parte inferior del menisco llegue a la marca de graduación. Informe el tiempo de flujo en segundos.

Cálculos

Multiplique el tiempo de flujo por el factor de corrección para el viscosímetro determinado en 20.

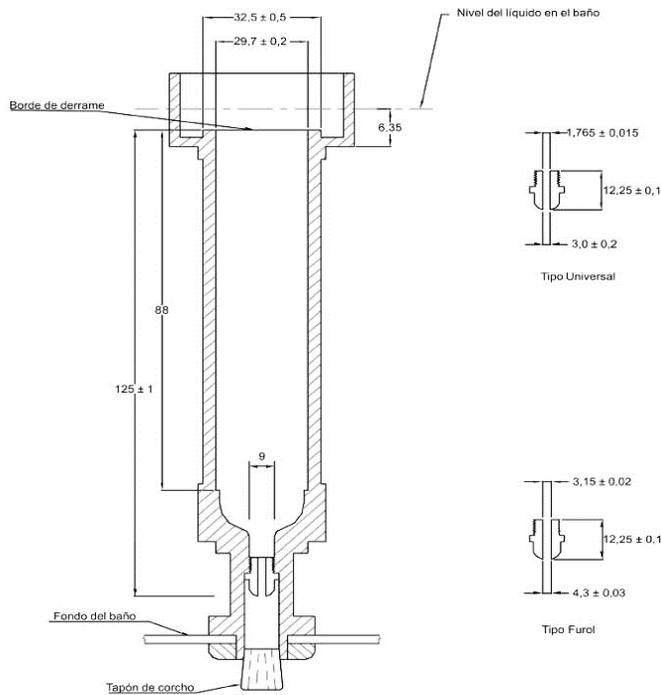
Precisión

Tabla 21. Precisión

Temperatura normal de ensaye °C	Máxima temperatura Medio del Baño Recomendado °C	Precisión de	
		diferencial (a) °C	Funcionamiento °C
21,1	Agua	± 0,06	± 0,03
25	Agua	± 0,06	± 0,03
37,8	Agua, o aceite de viscosidad 50-70 s SU a 38°C	0,14	± 0,03
50	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	0,19	± 0,03
54,4	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	0,28	± 0,03
60	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	0,56	± 0,06
82,2	Agua, o aceite de viscosidad 330-370 s SU a 38°C	0,83	± 0,06
98,9	Aceite de viscosidad 330 - 370 s SU a 38°C	1,11	± 0,06

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 20. Viscosímetro Saybolt con orificio Universal y Furol



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 21. Viscosímetro Saybolt con orificio Universal y Furol

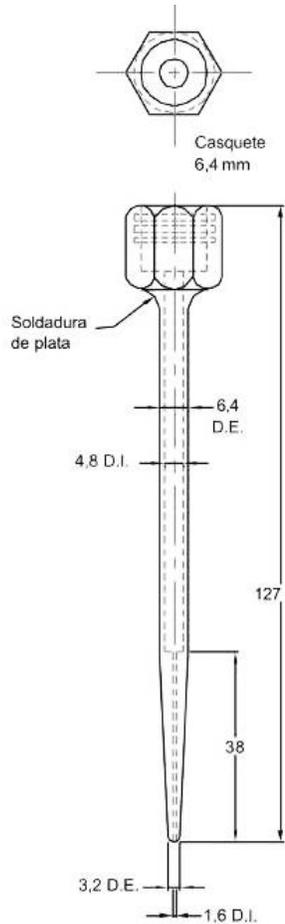


Figura 1.

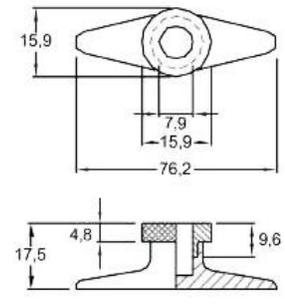


Figura 2.

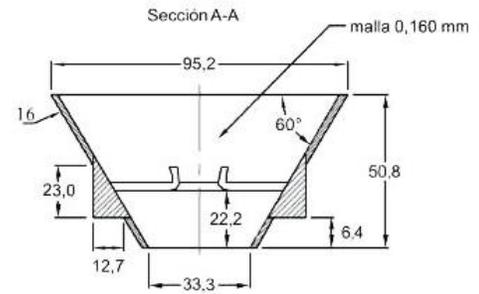
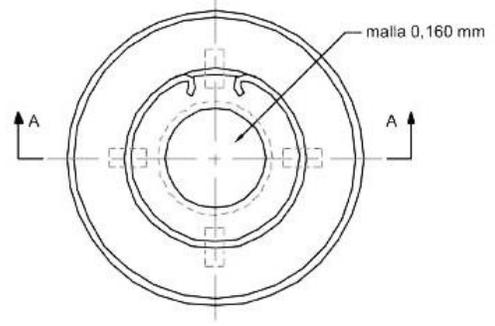


Figura 3.

Nota: En las figuras 2, 3 y 4 las dimensiones no son críticas para los procedimientos de ensaye y pueden ser consideradas como aproximadas.

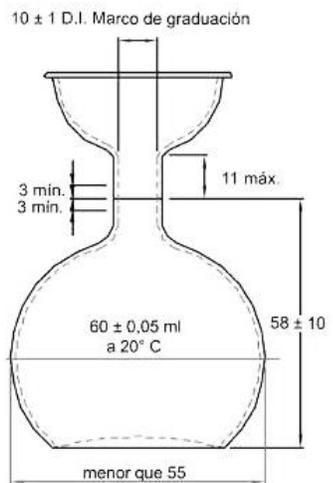


Figura 4.

Dimensiones en mm.

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.10. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

Metodología

El método de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación 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 estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. 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.

Procedimiento e instrumentos para la realización del diseño Marshall

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente para calcular en contenido óptimo de cemento asfáltico, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2,54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101,6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2,5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152,4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

Molde de Compactación. Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101,6 mm (4") y altura aproximada de 76,2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

Martillo de compactación con base plana circular de apisonado de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4,54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457,2 mm (18").

Extractor de Muestras de Asfaltos: para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95”) y 12,7 mm (1/2”) de espesor.

Soporte para molde o porta molde: dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

Mordaza: consiste de dos semicilindros, con un radio de curvatura interior de 50,8 mm (2”) de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.

Medidor de deformación: consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,001 mm.

Prensa: para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min.

Medidor de Estabilidad: la resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,001 mm.

Discos de Papel Filtrante de 4 pulg.

Horno: capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5 °F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.

Baño: de agua con 150mm (6”) de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ ($140 \pm 1,8^{\circ} \text{F}$), deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50,8 mm (2”) sobre el fondo del tanque.

Recipientes de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

Tamices: 25 mm (1”), 19,0 mm (3/4”), 12,5 mm (1/2”), 9,5 mm (3/8”), 4,75 mm (N° 4), 2,36 mm (N° 8), 300 µm (N° 50) y 75 µm (N° 200).

Termómetros blindados: de 10 °C a 232 °C (50 °F a 450 °F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3 °C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20 °C a 70 °C y sensibilidad de 0,2 °C (68 °F a 158 °F + 0,4 °F).

Balanza: para pesar agregado y asfalto de 5 kg. De capacidad, y sensibilidad de un 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg. De capacidad y sensibilidad de 0,1 gr.

Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4 %. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 22. Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Transporte medio		Tráfico pesado	
	Carpetas y base					
Criterio de mezcla	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad. (N)	3336		5338		8006	
(lb)	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo (0.25 mm) (0.1 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales						
porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto de asfalto MS-22

Tabla 23. Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3	4	5
1,18	N° 16	21,5	22,5	23,5
2,36	N° 8	19	20	21
4,75	N° 6	16	17	18
9,5	3/8	14	15	16
12,5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37,5	1,5	10	11	12

Fuente: Instituto de asfalto MS-2

CAPÍTULO III
ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. Selección de materiales

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes, además de tener una disponibilidad.

3.1.1. Materiales pétreos

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales para la realización de mezclas asfálticas, en los cuales nos proporciona una seguridad para el diseño que se realice, pero para la presente investigación se utilizara los materiales de grava, gravilla y filler procedentes del rio Camacho siendo triturados en la chancadora de Charaja. La arena natural procede del rio San Juan del Oro.

El criterio asumido para escoger el banco de materiales fue por la disponibilidad más práctica que se tenía. Ya que el banco escogido fue el que dispone el SEDECA, está ubicado en sobre la ruta 45, tramo Chocloca-Juntas., esta planta produce agregados pétreos para la realización de pavimento flexible para las vías urbanas.

Se escogieron los siguientes materiales: agregado grueso de 3/4", agregado intermedio de 3/8" y agregado fino.

Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada de la planta asfáltica y trituradora de agregados de SEDECA son:

Latitud: 21°46'54.71" S.

Longitud: 64°46'09.95" O.

Zona: 20

Figura 22. Ubicación de la planta de asfaltos y trituradora de agregados de SEDECA



Fuente: Google earth

3.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a usar provisionado de la planta asfáltica de SEDECA, ubicado en la comunidad de Charaja. El cemento es de procedencia brasilera de la empresa STRATURA

3.1.3. Carpeta asfáltica a reciclar

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar del tramo Iscayachi San Lorencito se procedió a la extracción de núcleos entre las progresivas 8+560 a 8+580, obteniéndose una cantidad de 7 núcleos de pavimento envejecido,

Figura 23. Ubicación de lugar de obtención de RAP



Fuente: Google earth

3.2. Caracterización de agregados

3.2.1. Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T-27) (ASTM C-136).

Se denomina granulometría, a la distribución en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

Tabla 24. Planilla de resultados de las granulometrías de la grava, gravilla y arena

Peso Suelo Seco (gr.)	5835,5		4528		1428,5		1214,5	
Tamiz	Grava 3/4"		Grava 3/8"		Filler Lavado		Filler	
plg.	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa
2"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1.1/2"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	50,00	99,14	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3175,00	45,59	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	4766,50	18,32	13,50	99,70	0,00	100,00	0,00	100,00
N° 4	5545,50	4,97	2782,00	38,56	111,40	92,20	2,20	99,82
N° 8	5604,00	3,97	4093,50	9,60	290,60	79,66	189,60	84,39
N° 40	5659,00	3,02	4232,50	6,53	655,30	54,13	757,80	37,60
N° 200	5727,50	1,85	4345,00	4,04	1407,10	1,50	1018,70	16,12

Fuente: Elaboración propia

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

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

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

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles, ASTM C-131 ó AASHTO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,5 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-96 y ASTM C-131.

Figura 24. Máquina de desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Máquina de desgaste por abrasión y material después del proceso



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos en la práctica:

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

Pasado	Retenido	Cantidad tomada(gr)
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3697
Tipo de Gradación “B”		
Diferencia		1303
Número de ensayos realizados		1
Carga Abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm 500Revoluciones

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

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

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1303\text{gr}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 26,06 \%$$

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

Pasado	Retenido	Cantidad tomada(gr)
3/8	1/4	2500
1/4	N°4	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3526
Tipo de Gradación “C”		
Diferencia		1474
Número de ensayos realizados		1
Carga Abrasiva		8 esferas a 32,5 Rpm 500Revoluciones

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

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

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1474\text{gr}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 29,48 \%$$

3.2.3. Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración (AASHTO T-104) (ASTM C-88)

Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil de la obra. Puede aplicarse tanto en agregado grueso como fino.

El ensayo se realiza exponiendo una muestra de agregado a ciclos alternativos de baño de inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio y secado en horno. Una inmersión y un secado se consideran un ciclo de durabilidad. Durante la fase de secado, las sales precipitan en los vacíos del agregado. En la reinmersión las sales se rehidratan y ejercen fuerzas de expansión internas que simulan las fuerzas de expansión del agua congelada. El resultado del ensayo es el porcentaje total de pérdida de peso sobre varios tamices para un número requerido de ciclos. Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para cinco ciclos de inmersión-secado. En nuestro ensayo realizo utilizando el sulfato de sodio

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-104 y ASTM C-88.

Figura 26. Colocando las muestras en los recipientes para posteriormente colocar el sulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Datos del ensayo de durabilidad para el agregado grueso

Granulometría				Peso Materiales	
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(gr.)	Ensayo(gr.)
3/4"	3/4"	1/2"	85,0	630,3	630,2
1/2"	1/2"	3/8"	76,9	330,5	330,3
3/8"	3/8"	Nº 4	49,9	300,2	299,0
Nº 4	Nº 4	Nº 8	36,7	100,7	100,1
Nº 8	Nº 8	Nº 40	21,3	100,5	99,3
Nº 40	Nº 40	0	7,3	100	99,5

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de Cálculo para el tamiz 1":

Pérdida por diferencia = Peso antes ensayo – Peso después ensayo

$$\text{Pérdida por diferencia} = 630,3 - 630,2$$

$$\text{Pérdida por diferencia} = 0,1 \text{ gr.}$$

%Pasa al tamiz = % Tamiz Pasa – % Tamiz Ret

$$\% \text{Pasa al tamiz} = 85 - 76,9$$

$$\% \text{Pasa al tamiz} = 8,1 \%$$

$$\% \text{ de pérdida respecto al tamiz} = \frac{\text{Pérdida por diferencia}}{\text{Peso antes ensayo}} * 100\%$$

$$\% \text{ de pérdida respecto al tamiz} = \frac{8,1}{630,3} * 100\%$$

$$\% \text{ de pérdida respecto al tamiz} = 0,02\%$$

% de p. r. a la muestra total

$$= \frac{\% \text{ de pérdida respecto al tamiz}}{100} * \frac{\% \text{ Pasa al tamiz}}{100} * 100\%$$

$$\% \text{ de pérdida respecto a la muestra total} = \frac{0,02}{100} * \frac{8,1}{100} * 100\%$$

$$\% \text{ de pérdida respecto a la muestra total} = 0,00\%$$

Para las demás muestras de cada tamiz se realizó la misma memoria de cálculo, se muestra a continuación la tabla de resultados.

Tabla 28. Resultados del ensayo de durabilidad para agregado grueso

Tamiz N°	Pérdida por Diferencia (gr.)	% Pasa al Tamiz más fino	% Pérdida Respecto Tamiz	% Pérdida Respecto Muestra Total
1	0,1	8,1	0,02	0,00
3/4"	0,1	27,0	0,04	0,01
1/2"	1,2	13,2	0,38	0,05
3/8"	0,5	15,4	0,53	0,08
N° 4	1,2	14,0	1,17	0,16
	4,5	7,3	4,50	0,33

Fuente: Elaboración propia

$$\% \text{ Total de pérdida (Grueso)} = \sum \% \text{ de pérdida respecto a la muestra total}$$

% Total de pérdida (Grueso) = 0,64%

Tabla 29. Datos del ensayo de durabilidad para agregado fino

Granulometría			Peso Materiales		
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(gr.)	Ensayo(gr.)
3/8"	3/8"	Nº 4	51,7	300,0	293,8
Nº 4	Nº 4	Nº 8	40,7	100,0	96,2
Nº 8	Nº 8	Nº 16	30,7	100,0	95,2
Nº 16	Nº 16	Nº 40	16,4	100,0	93,7
Nº 40	Nº 40	Nº 80	11,6	100,0	95,5

Fuente: Elaboración propia

Para el agregado fino se realiza la misma memoria de cálculo que se mostró anteriormente, a continuación, se muestra la tabla de resultados.

Tabla 30. Resultados del ensayo de durabilidad para agregado fino

Tamiz Nº	Pérdida por Diferencia (gr.)	% Pasa al Tamiz más fino	% Pérdida Respecto Tamiz	% Pérdida Respecto Muestra Total
3/8"	6,2	11,0	2,07	0,23
Nº 4	3,8	10,0	3,80	0,38
Nº 8	4,8	14,3	4,80	0,69
Nº 16	6,3	4,8	6,30	0,30
Nº 40	4,5	11,6	4,50	0,52

Fuente: Elaboración propia

$\% \text{ Total de pérdida (Fino)} = \sum \% \text{ de pérdida respecto a la muestra total}$

$\% \text{ Total de pérdida (Fino)} = 2,12\%$

$\% \text{ Total de pérdida} = \% \text{ Total de pérdida (Grueso)} + \% \text{ Total de pérdida (Fino)}$

$$\% \text{ Total de pérdida} = 0,64 + 2,12$$

$$\% \text{ Total de pérdida} = 2,76\%$$

3.2.4. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T-85) (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/8" y para la grava 3/4".

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C

Después se lo sumerge en agua, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.)

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-85 y ASTM C-127.

Tabla 31. Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso

Descripción	Unidad	1	2	3
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca (a)	gr.	609	619	598,5
Peso Material Seco (b)	gr.	602,5	612,5	592,5
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	gr.	823,7	829	817
Peso del Cesto suspendido en Agua	gr.	444	444	444
Peso Muestra suspendida Agua (c)	gr.	379,7	385	373

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

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

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \frac{602,5}{609 - 379,7}$$

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = 2,628 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{P. E. A. Saturado de Superficie Seca} = \frac{609}{609 - 379,7}$$

$$\text{P. E. A. Saturado de Superficie Seca} = 2,656 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{602,5}{602,5 - 379,7}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = 2,704 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{609 - 602,5}{602,5} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = 1,079\%$$

Resumen de los resultados:

Tabla 32. Resultados del ensayo de peso específico del agregado grueso".

Descripción	Unidad	1	2	3	Promedio
Peso Específico del Agregado Seco	grs./cm ³	2,628	2,618	2,627	2,624
P.E.A. Saturado de Superficie Seca	grs./cm ³	2,656	2,645	2,654	2,652
Peso Específico Aparente	grs./cm ³	2,704	2,692	2,699	2,699
% de Absorción	%	1,079	1,061	1,013	1,051

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Ensayo de peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASHTO T-84) (ASTM C-128)

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

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-84 y ASTM C-128.

Figura 27. Vertiendo la muestra para realizar el ensayo.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Datos del ensayo peso específico del agregado fino

Descripción	Unidad	1	2	3
Peso Frasco Seco Vacío	gr.	136,1	239	234,88
Peso Frasco + Muestra	gr.	296,56	456,82	450,47
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca (x)	gr.	163,25	221,45	219,59
Peso Muestra Seca (a)	gr.	160,6	217,8	215,59
Peso Agua (w)	gr.	326,84	572,07	572,39
Peso Muestra + Agua (b)	gr.	426,71	708,3	706,9

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = \frac{a}{(x + w) - b}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = \frac{160,6}{(163,25 + 326,84) - 426,71}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Seco} = 2,533 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = \frac{x}{(x + w) - b}$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = \frac{163,25}{(163,25 + 326,84) - 426,71}$$

$$\text{P. E. A. Saturado Superficial Seco} = 2,576 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{160,6}{(160,6 + 326,84) - 426,71}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = 2,646 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{163,25 - 160,6}{160,6} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = 1,682\%$$

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

Tabla 34. Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Descripción	Unidad	1	2	3	Promedio
Peso Específico del Agregado Seco	gr/cm ³	2,533	2,557	2,545	2,545
P. E. A. Saturado Sup. Seco	gr/cm ³	2,576	2,599	2,589	2,588
Peso Específico Aparente	gr/cm ³	2,646	2,670	2,660	2,659
% de Absorción	%	1,682	1,667	1,698	1,682

Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Ensayo de equivalente de arena (AASHTO T-176) (ASTM D-2419)

El ensayo de Equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N° 4 (4,75mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente, se debe de tener una muestra del material y tamizarlo por el tamiz N°4 para poder tener la muestra que se utilizara para este ensayo colocarlo en un recipiente. Luego se debe de colocar la muestra que se utilizara de arena en el cilindro, se deberá verter la muestra en el cilindro con la ayuda de un embudo y hacer momento del cilindro para que se puedan perder todas las burbujas que tenga, dejar en reposo durante 10±1 minuto.

Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y lavar el material de las paredes del cilindro, Dejar el cilindro y el contenido en reposo por 20 min ± 15s. Comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador.

Al finalizar los 20 min del periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-176 y ASTM D-2419.

Figura 28. Determinación del equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Muestra en reposo



Fuente: Elaboración propia.

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 35. Datos del ensayo de equivalente de arena

Ensayo	Lecturas		
Ensayo N°	1	2	3
Lectura nivel superior	7,4	7,6	7,5
Lectura nivel inferior	3,6	3,7	3,5

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Utilizamos el promedio para realizar los cálculos:

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

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{3,6}{7,5} * 100$$

$$\text{Equivalente de la arena} = 48,65\%$$

Tabla 36. Resultados del Ensayo Equivalente de Arena

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
% de Arena	48,65 %	48,68 %	46,67%
Promedio	48,0 %		

Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821-95)

Este ensayo se realiza para determinar el porcentaje el peso de la muestra que se utilizó del agregado en las diferentes caras fracturadas. Se realiza la separación de todas las muestras y se pesó cada muestra para hallar los porcentajes.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D 5821-95.

Figura 30. Separando las muestras para la realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Datos de ensayo de caras fracturadas

Descripción	Lecturas		
	3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	3/8"-1/4"
Ensayo N°	3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	3/8"-1/4"
Peso Total (grs.)	725,88	397,62	356,89
Peso Mat. Canto Rodado (grs.)	25,11	28,74	41,24
Peso de Caras Fracturadas (grs.)	700,77	368,88	315,65

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

Peso Caras Fracturadas=Peso Total de Muestra-Peso Mat. Canto Rodado

Peso Caras Fracturadas=725,88 - 25,11

Peso Caras No Fracturadas=700,77[gr.]

Porcentaje de Caras fracturadas= $\frac{\text{Peso de Caras Fracturadas}}{\text{Peso Total de Muestra}} * 100\%$

Porcentaje de Caras fracturadas= $\frac{700,77}{725,88} * 100\%$

Porcentaje de Caras Fracturadas=96,54%

Tabla 38. Resultados del ensayo de caras fracturadas

Descripción	Lecturas		
	3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	3/8"-1/4"
Ensayo N°	3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	3/8"-1/4"
% Caras Fracturadas	96,54	92,77	88,44
Promedio	92,6		

Fuente: Elaboración propia

3.2.8. Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas (ASTM-4791)

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D-4791.

Tabla 39. Datos del ensayo partículas Laminares

Material	Peso Total de la Muestra	Peso Retenido de Partículas Laminares
3/4"	1000 gr.	32 gr.
3/8"	1000 gr.	58,4 gr.

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

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

$$\% \text{ Total de Partículas Laminares} = \frac{32}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Laminares} = 3,20 \%$$

Tabla 40. Resultado de ensayo

Material	% Total de Partículas Laminares
3/4"	3,2 %
3/8"	5,84 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Datos del ensayo Chatas Alargadas

Material	Peso Total de la Muestra	Peso Retenido de Partículas Chatas Alargadas
3/4" a 1/2"	428,6 gr.	10,4 gr.
1/2" a 3/8"	410,7 gr.	10,5 gr.
3/8" a 1/4"	469,4 gr.	9,9 gr.

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

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

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = \frac{10,4}{428,6} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = 2,43 \%$$

$$\% \text{ total de partículas Chatas Alargadas (máximo 10\%)} = 2,36\%$$

Tabla 42. Resultados del ensayo chatas y alargadas

Material	% Total de Partículas Chatas Alargadas
3/4" a 1/2"	2,43 %
1/2" a 3/8"	2,56 %
3/8" a 1/4"	2,1%

Fuente: Elaboración propia

3.3. Ensayos realizados en el cemento asfáltico

Para realizar el diseño óptimo se realizó la evaluación y la caracterización del cemento asfáltico, a continuación, se muestra todos los ensayos:

3.3.1 Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (AASHTO T-84) (ASTM E-102)

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

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

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-84 Y ASTM E-102.

Figura 31. Ensayo de viscosidad de saybolt-furol



Fuente: Elaboración propia.

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 43. Datos del ensayo de viscosidad cemento asfáltico convencional 85-100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-72	seg.	120	105	135
Número de ensayos realizados	3			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados:

Resultado: 120 segundos

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

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

Resumen del método de ensayo

La muestra se funde y se refresca bajo condiciones controladas. La penetración es medida con un penetrómetro por medio de una aguja normalizada se aplica a la muestra bajo condiciones específicas.

Figura 32. Penetración de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

Datos obtenidos del ensayo:

Tabla 44. Datos del ensayo de penetración cemento asfáltico 85-100

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25°C, 100g. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm.	88,3	89,1	88,8
	Lectura N°2	mm.	88,5	88,4	88
	Lectura N°3	mm.	89	89,5	88,3
Promedio		mm.	88,6	89	88,3
Número de Ensayos			3		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: Realizando la media se tiene como valor de penetración de 88,63 mm a 25°C, 100gr. 5seg.

3.3.3. Ensayo punto de inflamación (AASHTO T-48) (ASTM D-92)

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre.

Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos

Figura 33. Punto de inflamación en proceso de ejecución



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos:

Tabla 45. Datos del ensayo de punto de inflamación-cemento asfáltico 85-100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>232	>231
Número de ensayos realizados	2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultado: 232°C.

3.3.4. Ensayo peso específico del asfalto AASHTO T-43 (ASTM D-70)

El peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual

volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Figura 34. Ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos:

Tabla 46. Datos del ensayo de peso específico cemento asfáltico 85-100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso Picnómetro	gr.	66,05	44,7	48,02
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr.	146,41	112,05	114,9
Peso Picnómetro + Muestra	gr.	96,63	69,98	74,67
Peso Picnómetro + Agua + muestra	gr.	146,55	112,35	115
Peso Específico	gr./cm ³	1,002	1,009	1,001
Número de ensayos realizados	3			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo:

$$\text{Peso específico del cemento asfáltico} = \frac{\text{Peso picnómetro+muestra}}{(\text{Peso picn.}+\text{agua})+(\text{Peso pic}+\text{muestra}-\text{peso picnómetro})+(\text{Pesopic.}+\text{agua}+\text{muestra})} * 0,997077$$
$$\text{Peso Esp. del CA.} = \frac{96,63\text{gr}}{((146,41\text{gr}) + 96,63\text{gr} - 66,05\text{gr}) - (146,55))} * 0,997077$$

Peso Esp. del CA. =1,002 gr/cm³

De igual manera se calcula el peso específico de cemento asfáltico con los datos del ensayo 2 ,3 y se obtiene un promedio.

Resultado:

Peso específico del CA=1,004 gr/cm³

3.3.5. Ensayo punto de ablandamiento AASHTO T-53 (ASTM D-36)

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos.

Figura 35. Soporte de anillos

Fuente: Elaboración propia

Datos:

Tabla 47. Datos obtenidos del ensayo punto de ablandamiento cemento asfáltico 85-100

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de ablandamiento	°C	44,0	46,0

Fuente: Elaboración propia

Calculo: Se realizó a proceder a tomar un promedio de ambas muestras de manera de obtener un resultado más claro del ensayo 45,0°C.

3.3.6. Ductilidad de materiales bituminosos (AASHTO T 51-93; ASTM: D 11379)

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y en el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

Figura 36. Ensayo ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. Resultados ensayo de ductilidad

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad	cm	127,0	131,0	129,0	129	100	

Fuente: Elaboración propia

3.4. Diseño de mezclas asfálticas

3.4.1. Resultados del Levantamiento de Información

3.4.1.1. Agregados Pétreos

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, del control de calidad de los materiales: siendo la grava, gravilla arena natural y filler.

Tabla 49. Caracterización de los agregados pétreos

Agregados					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico agregado retenido No 4	gr./cm ³	2,699			T-85
Peso específico agregado pasante No 4	gr./cm ³	2,659			T-84
Desgaste de los Ángeles (3/4")	%	26,06		40	T-96
Desgaste de los Ángeles (3/8")	%	29,48		40	
Durabilidad agregada (Grava; Gravilla)	%	0,64		12	T-104
Durabilidad agregada (Arena)	%	2,12		12	
Caras Fracturadas	%	92,6	90		D-5821
Equivalente de arena	%	48	45		T-176
Laminaridad (3/4")	%	3,2		15	D 4791
Laminaridad (3/8")	%	5,48		15	
Chatas y Alargadas	%	2,36		10	

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Cemento Asfáltico

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, del control de calidad del cemento asfáltico BETUNEL – BRASIL (CA 85 – 100)

Tabla 50. Características del cemento asfáltico 85-100

Cemento asfáltico					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación
			Mínimo	Máximo	AASHTO
Peso específico	gr./cm ³	1,004	1	1,005	T-228
Punto de Inflamación	°C	> 232	232		T-48
Penetración a 25 °C; 100 gr., 5 seg.	mm.	88,63	85	100	T-49
Punto de ablandamiento	°C	45	43	53	T-53
Viscosidad Saybolt-Furol	seg	120	85		T-72
Ductilidad	cm	129	100		D 2419

Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño de la mezcla asfáltica por el método de Marshall para obtener el contenido óptimo

Metodología

El método de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación 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 estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima

resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. 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.

3.5.1. Composición granulométrica de los agregados

El siguiente cuadro nos permite ver la distribución en forma individual de cada agregado.

Se realizarán las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones.

Tabla 51. Dosificación de materiales pétreos

Tamices	Grava 3/4" (% que pasa)	Grava 3/8" (% que pasa)	Filler (% que pasa)	Arena Natural (% que pasa)
1"	100	100	100	100
3/4"	99,1	100	100	100
1/2"	45,6	100	100	100
N° 4	5	38,6	99,8	92,2
N° 8	4	9,6	84,4	79,7
N° 40	3	6,5	37,6	54,1
N° 200	1,9	4	16,1	1,5

Fuente: Elaboración propia

Las fajas propuestas para la combinación del concreto bituminoso según especificación son cuatro: faja A; faja B; faja C y faja D, siendo la "Faja C" la que se adoptó para este diseño y se la describe a continuación

Tabla 52. Requisitos De Gradación Para La Mezcla - Faja "C"

Tamiz	Tamaño Máximo Nominal del Agregado 3/4"	
	Porcentaje total que pasa	
1 "	100	100
3/4"	97	100
1/2"	76	88
N° 4	49	59
N° 8	36	45
N° 40	14	22
N° 200	3	7

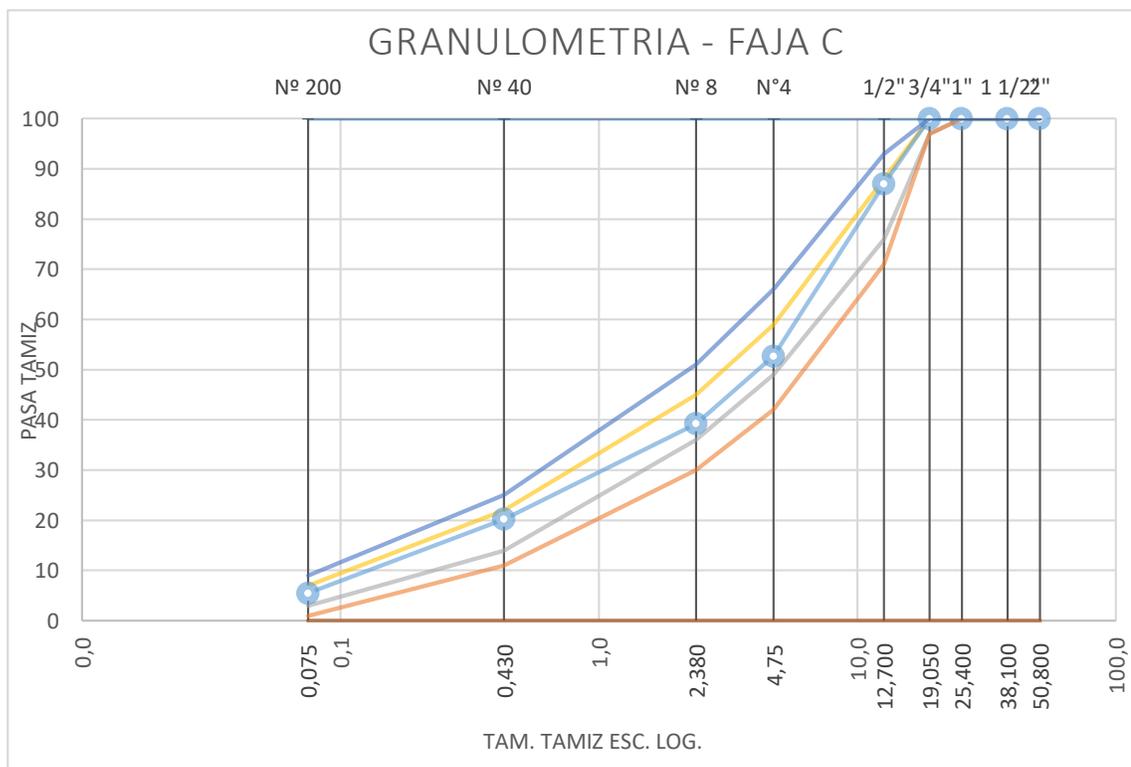
Fuente: Elaboración propia

La composición porcentual en peso de los agregados, resultando de varias tentativas alcanza los siguientes valores, en base a los agregados: un 30% de Grava 3/4", 25% de Grava 3/8", 30% de Filler y 15% de Arena Natural.

Tabla 53. Granulometría de faja de trabajo

Tamices	Curva proyectada	Faja "C"		Faja de trabajo	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1 "	100	100	100	100	100
3/4"	100	97	100	97	100
1/2"	86,95	76	88	71	93
N° 4	52,67	49	59	42	66
N° 8	39,25	36	45	30	51
N° 40	20,2	14	22	11	25
N° 200	5,29	3	7	1	9

Figura 37. Curva proyectada



Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico convencional 85-100

3.5.2.1. Diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall

Para realizar el diseño de las mezclas asfálticas se realizaron primeramente los ensayos para determinar el contenido óptimo del cemento asfáltico el diseño de 18 briquetas con diferentes porcentajes el procedimiento se muestra a continuación.

Determinación de la cantidad aproximada de asfalto.

$$\%A = 0,035 * a + 0,045 * b + K * c + F$$

Donde:

%A = % de asfalto en la mezcla.

a = % Retenido tamiz N°8.

b = % Pasante tamiz N°8.

c = % de agregado que pasa la malla N°200.

K = 0,15, si él % que retiene el tamiz 3/4" está entre 11% y 15%.

0,18, si él % que retiene está entre 6% y 10%.

0,20, si él % que retiene es el 5% o menos.

F= de 0 a 2% que varía según la absorción del material (se puede asumir 0,7).

Proceso de cálculo:

a = 52,67 %

b = 39,25 %

c = 5,96 %

K = 0,20 debido a que el porcentaje retenido en el tamiz 3/4" es 1,1% lo cual es menor al 5%.

$$F = 0,7$$

$$\%A = 0,035(52,67) + 0,045(39,25) + 0,2(5,96) + 0,7=5,5\%$$

El contenido aproximado de asfalto es 5,5%, debido a este resultado se trabajarán en las diferentes dosificaciones con los siguientes porcentajes: 4%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%.

3.5.2.2. Preparación de las probetas

Para la dosificación se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico se va a preparar 6 grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferentes contenidos de cemento asfáltico. Este contenido varía con el incremento de $\pm 0,5$ % de un grupo a otro.

De esta forma varía los pesos de los agregados según varié la proporción de cemento asfáltico.

Tabla 54. Dosificación

Tamiz		Resultante	Parcial	% C.A.	PT	% C.A.	PT	% C.A.	PT	% C.A.	PT	% C.A.	PT	% C.A.	PT
Pasa	Retiene			4	1200	4,5	1200	5	1200	5,5	1200	6	1200	6,5	1200
				PP	PA	PP	PA	PP	PA	PP	PA	PP	PA	PP	PA
0	0	100		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	150,31	150,31	149,53	149,53	148,75	148,75	147,96	147,96	147,18	147,18	146,4	146,4
1/2"	N°4	86,95	34,29	394,99	545,3	392,93	542,46	390,87	539,62	388,81	536,78	386,76	533,94	384,7	531,1
N°4	N° 8	52,67	13,42	154,58	699,88	153,78	696,24	152,97	692,59	152,17	688,94	151,36	685,3	150,56	681,65
N° 8	N° 40	39,25	19,05	219,41	919,29	218,27	914,5	217,12	909,71	215,98	904,93	214,84	900,14	213,7	895,35
N° 40	N° 200	20,2	14,74	169,83	1089,12	168,94	1083,45	168,06	1077,77	167,17	1072,1	166,29	1066,43	165,41	1060,76
N° 200	Fondo	5,46	5,46	62,88	1152	62,55	1146	62,23	1140	61,9	1134	61,57	1128	61,24	1122
Suma Total				1152		1146		1140		1134		1128		1122	
Cemento Asfáltico				48		54		60		66		72		78	

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.3. Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio

Antes de preparar la mezcla asfáltica, se debe calentar el conjunto de molde y la base de compactación a una temperatura entre 100-150 °C. Por un lado, se pesa en fuentes los distintos tipos de los agregados calculados para una briqueta de 1200 g, por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura superior a 100 °C, hasta que esté fluido.

Figura 38. Calentamiento de los moldes para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Se realiza el pesaje de los agregados para la muestra a ensayar



Fuente: Elaboración propia

Mezclar los agregados con el cemento asfáltico, agitar durante el calentamiento de la mezcla para evitar sobrecalentamientos locales y evitar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

Figura 40. Se realiza el mezclado homogéneo de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cuando la mezcla haya alcanzado los 140 °C, se debe vaciar con una cuchara en el molde abierto, previamente pasado con un poco de aceite, para el desmolde de briqueta y un papel filtro en la base, para que la muestra se pueda quitar fácilmente después de haber enfriado

Figura 41. Controlando temperatura



Fuente: Elaboración propia

El molde tiene un diámetro interior de 4", la compactación se hace usando un martillo de 10 lb de peso, el martillo tiene una altura de caída libre de 18".

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas, con las dosificaciones indicadas en la Tabla.

Se extraen las muestras con la ayuda de un gato hidráulico.

Figura 42. Extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Briquetas finalizadas



Fuente: Elaboración propia

3.6. Ensayo de Marshall

Una vez extraídas las briquetas de los moldes se proceden a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa. Primero se mide las alturas de las briquetas en tres puntos.

Figura 44. Alturas de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Antes de realizar el ensayo las muestras deben estar sumergidas a baño maría de agua 60 °C durante 30 minutos.

Figura 45. Baño maría



Fuente: Elaboración propia

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 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.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante 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 de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de Estabilidad Marshall.

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.

Figura 46. Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia

3.6.1. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100

A continuación, se muestra las planillas de resultados:

Tabla 55. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100

% de Asfalto	Identificación	Altura Promedio (cm)	Densidad Real Promedio (Gr./cm ³)	% Vacíos en la mezcla	% Vacíos de agregado (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida	Fluencia 1/100
4	1	6,36	2,35	6,47	15,84	59,12	2015	11,55
	2	6,36						
	3	6,4						
4,5	4	6,35	2,493	4,98	15,6	68,06	2104	12,2
	5	6,33						
	6	6,38						
5	7	6,25	2,474	3,64	15,51	76,53	2567	12,1
	8	6,29						
	9	6,31						
5,5	10	6,21	2,455	2,09	15,26	86,29	2249	14,3
	11	6,23						
	12	6,2						
6	13	6,23	2,437	1,25	15,63	92,01	2118	16,1
	14	6,19						
	15	6,12						
6,5	16	6,26	2,418	1,21	16,67	92,76	1985	17,5
	17	6,19						
	18	6,22						

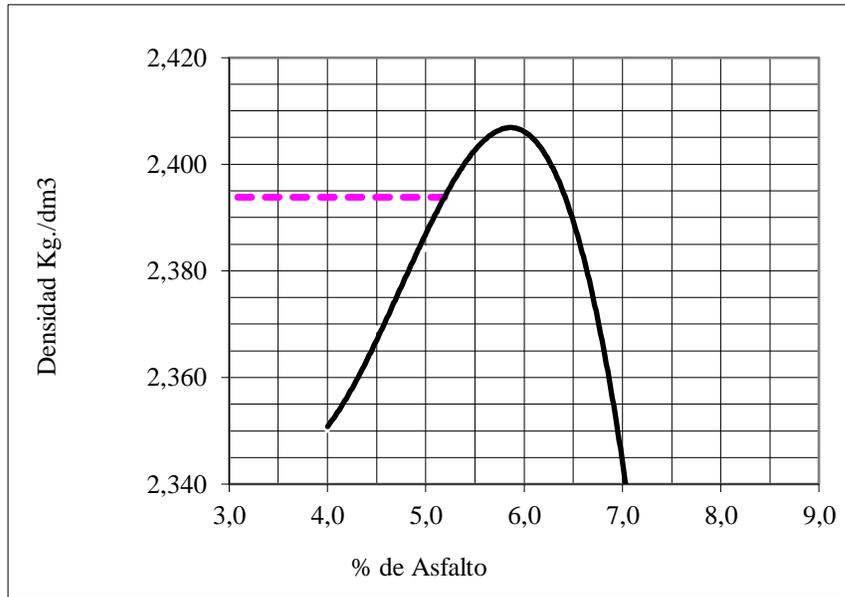
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido todos estos valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

- Porcentaje de Asfalto vs. densidad de la probeta.
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de Asfalto vs. vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV).

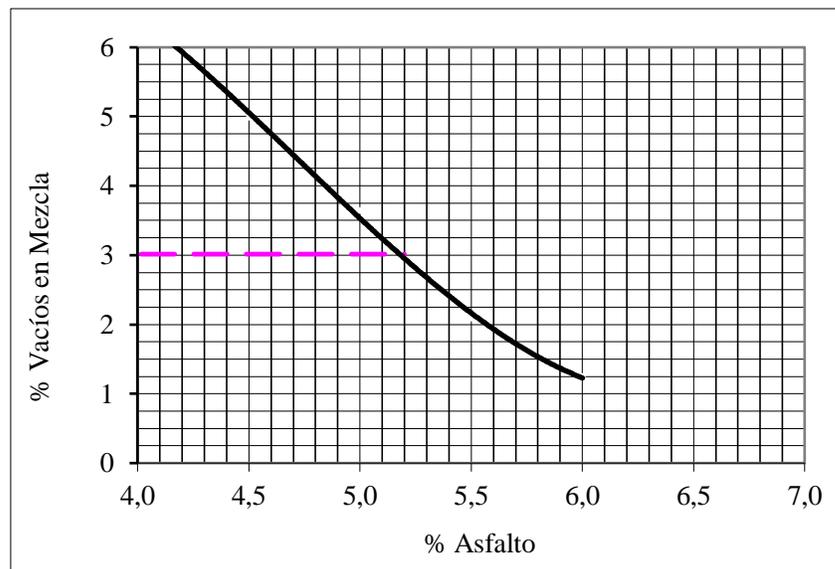
- Porcentaje de Asfalto vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo).

Figura 47. Porcentaje de Asfalto vs Densidad de la Briqueta



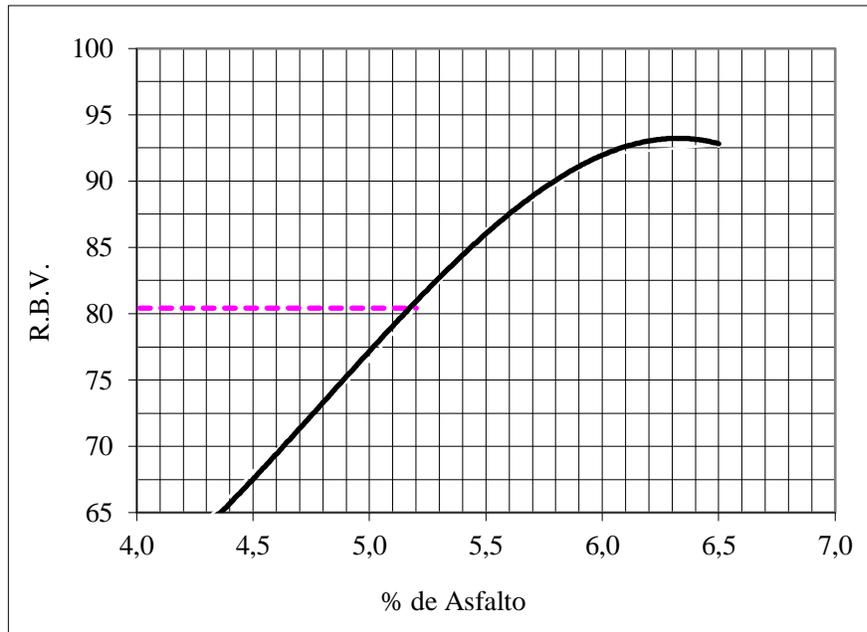
Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Porcentaje de Asfalto vs Vacíos de la mezcla (Vv)



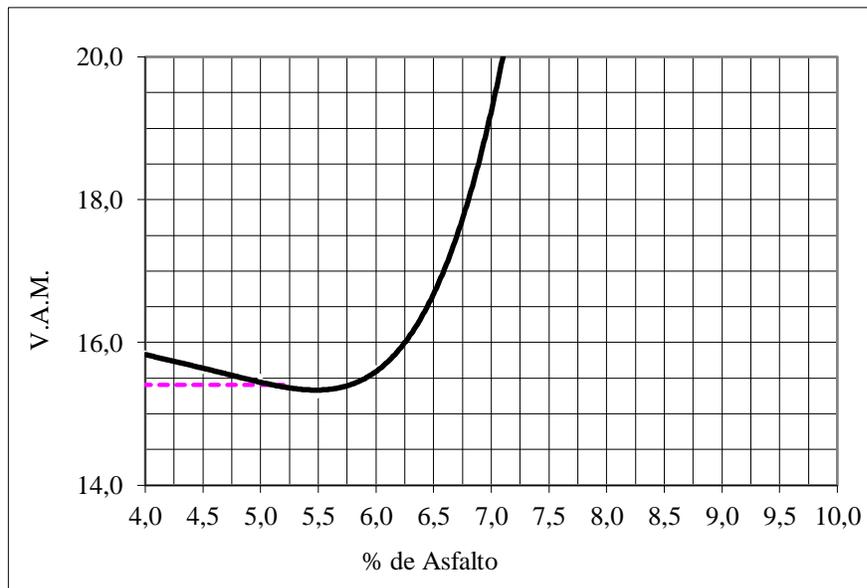
Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Porcentaje de Asfalto vs RBV



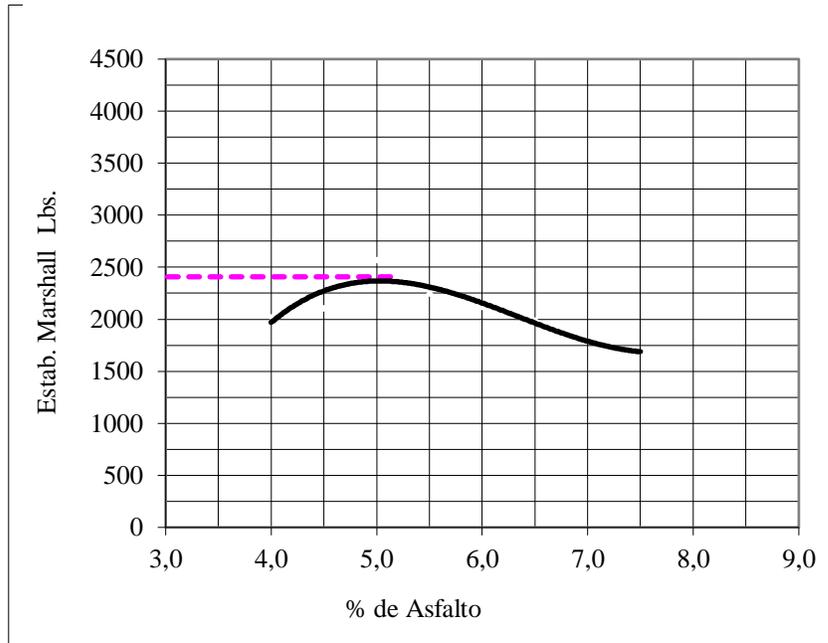
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Porcentaje de Asfalto vs VAM



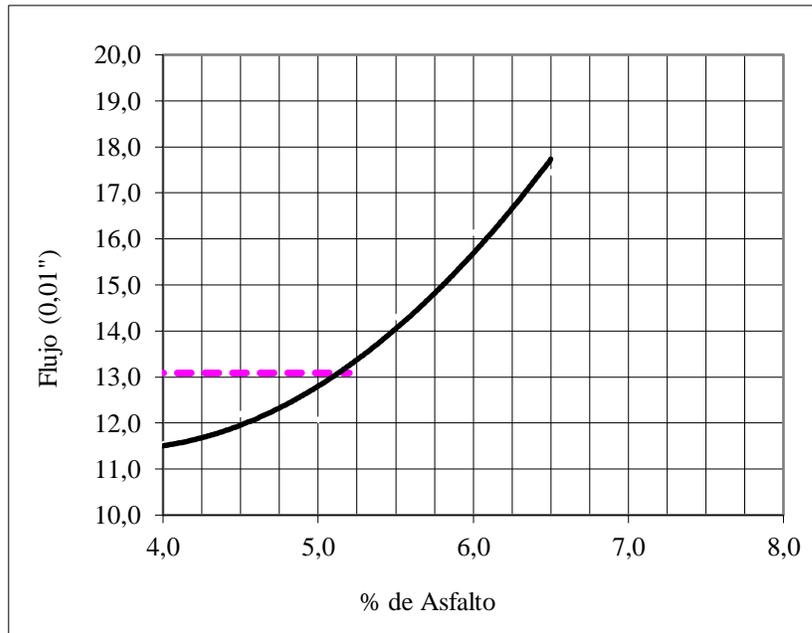
Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Porcentaje de Asfalto vs Fluencia



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 56. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica convencional 85-100.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% De asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	5,2	2,394	-----	-----
% Vacíos	5,2	3,01	3	5
R.b.v.	5,2	80,4	75	82
V.a.m	5,2	15,402	15	
Estabilidad (lb)	5,2	2405,3	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	5,2	13,09	8	16
% Óptimo de asfalto propuesto			5,2	

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo

Después de calcular el porcentaje óptimo del cemento asfáltico que es igual al 5,2 % para el cemento asfáltico 85-100 de la briketa de 1200 gramos, se procede a pesar las muestras para su respectiva comparación, en la siguiente tabla se muestran los pesos retenidos en cada tamiz repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas convencionales con cemento asfáltico 85-100, manteniendo la combinación de agregados.

Tabla 57. Dosificación con el contenido óptimo de asfalto de 5,2%.

Tamiz		Resultante	Parcial	% C.A.	PST
Pasa	Retiene			5,2	1200
				PA (1)	PP (1)
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	148,43	148,43
1/2"	N°4	86,95	34,29	390,05	538,48
N°4	N° 8	52,67	13,42	152,65	691,13
N° 8	N° 40	39,25	19,05	216,67	907,8
N° 40	N° 200	20,2	14,74	167,7	1075,5
N° 200	Fondo	5,46	5,46	62,1	1137,6
Suma Total		1137,6			
Cemento Asfáltico		62,4			

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	1137,6 gr.
Peso Asfalto (4,5%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf. =	1200,0 gr.

Tabla 58. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de asfalto 85-100

% de Asfalto	Identificación	Altura Promedio (cm)	Peso Seco al aire (gr.)	Peso Sumergido superficial seco(gr.)	Peso Sumergido al agua (gr.)	Lectura Dial Estabilidad	Lectura Dial Fluencia
5,2	1	6,26	1187,2	1188,2	691,4	1122	370
	2	6,34	1187,5	1188,8	690,7	1023	390
	3	6,32	1188,7	1189,9	693,2	1081	360
5,2	4	6,3	1190,2	1191,3	692,3	960	400
	5	6,31	1190,8	1191,7	691,5	987	390
	6	6,25	1186,8	1187,3	691,6	886	410

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el ensayo las briquetas 4, 5 y 6 fueron los datos obtenidos como los valores de estabilidad remanente a las 24 horas este tiempo fueron sumergidas a baño maría.

Tabla 59. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo a las 24 hr

% de Asfalto	Identificación	Propiedades mecánicas						
		Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	% Vacíos de agregado (VAM)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
5,2	1	6,38	2,39				2533,4	
	2	6,32	2,384				2262,5	
	3	6,29	2,393				2402,7	
	Promedio		2,389	3,15	79,71	15,52	2400	14,7
5,2	4	6,46	2,386				2144,3	
	5	6,46	2,381				2200,3	
	6	6,35	2,394				2006,4	
	Promedio		2,387	3,24	79,22	15,6	2117	15,7

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la resistencia remanente de 24 horas es:

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{2117}{2400} * 100\%$$

$$\text{Resistencia Remanente} = 88,20\%$$

3.6.3. Análisis

La densidad aumenta con el contenido de betumen hasta un máximo después del cual empieza a decrecer. La curva de estabilidad es similar a la de densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente (no siempre) a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de la máxima densidad. Los valores del flujo aumentan con los incrementos en el contenido de asfalto.

El porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total disminuye al incrementar el contenido de betumen, tendiendo hacia un mínimo. El porcentaje de vacíos en los agregados minerales disminuye al incrementarse el contenido de betumen, hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar.

3.7. Investigación de mezclas asfálticas con rap bajo el parámetro de glover rowe

3.7.1. Introducción

Lo anteriormente visto en este proyecto ha sido el estudio de los conceptos sobre las mezclas recicladas y se pudo definir los materiales a utilizar para la elaboración de la mezcla en base a sus características y desempeño presentado.

Este capítulo comprende el diseño de mezcla realizado en laboratorio, la selección de la dosificación, y evaluación de los criterios de diseño, se presentan resúmenes de los ensayos realizados a la mezcla para la evaluación de su desempeño, ensayos basados en las normas AASHTO y ASTM

Finalmente, se realiza el análisis de los resultados de laboratorios para establecer el contenido óptimo de RAP

Primero se procedió a extraer núcleos de la carpeta asfáltica que se reciclara para posteriormente determinar su porcentaje de asfalto.

Para la extracción de núcleos se empleó la máquina de extracción de núcleos de pavimento asfáltico.

Esta máquina simple pero robusta que es portátil, posee un motor potente adecuado para todo tipo de trabajos y materiales. El peso es relativamente pesado esto contribuye a su estabilidad durante la extracción de las muestras.

El parámetro de Glover Rowe se puede definir como la cantidad de RAP que tiene que estar en una mezcla asfáltica para que tenga las mejores condiciones de comportamiento y desempeño durante su vida útil de la mezcla, como es una mezcla con incorporación de residuos de pavimento asfáltico entonces debemos estudiar cómo se comporta esta mezcla con para cualquier proyecto lo que más interesa cuanto va a durar sin problemas, sin tener agrietamientos en bloque ni zonas de daño.

Lo que busca el Glover Rowe con este estudio es establecer un porcentaje óptimo de reciclado que se puede utilizar en una mezcla el cual nos de buenos resultados y que no se encuentren en una zona de daño ni de agrietamiento en bloque para eso se tiene que hacer una investigación de la mezcla y saber cómo se comportan las curvas en su ángulo de fase y en su logaritmo de G. para esto Glover Rowe fijo unos valores límites para prevenir el daño por agrietamiento.

3.7.2. Método para determinar el contenido de ligante de mezclas asfálticas por centrifugación - ensaye de extracción

Este método es usado para la determinación cuantitativa del contenido de betumen en las mezclas de pavimentación, y así determinar el porcentaje de asfalto que se empleó en la mezcla asfáltica que se va a reciclar

Equipo: Horno, Recipiente, Balanza, Aparato de extracción, Filtro, Gasolina

Procedimiento: Se obtiene la muestra de la mezcla asfáltica debe estar blanda para pueda manipularse Se la coloca en un recipiente la mezcla asfáltica y se lleva al horno a 110°C

Primero se debe pasar el filtro más el plato de extracción, después se vuelve a pesar más la muestra y se cubre con gasolina (en este caso), y se hace funcionar la maquina aumentando su velocidad, se agrega gasolina las veces que sea necesaria hasta que se haya extraído totalmente el asfalto, posterior mente se vuelve a pesar y se saca el porcentaje de asfalto que tenía la muestra.

Figura 53. Extracción de núcleos



Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Colocado de carpeta desintegrada en el extractor centrifugo



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Agregado sin ligante



Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. Datos de extracción

Extracción asfalto	
	Planta
Peso Filtro +Plato (grs)	3351
P. F. +Plato+ M. (Antes)(grs)	4250
P. F. +Plato+ M. (Desp.) (grs)	4206
Peso Mezcla	899
Peso agregado	855
% Asfalto (%)	4,89

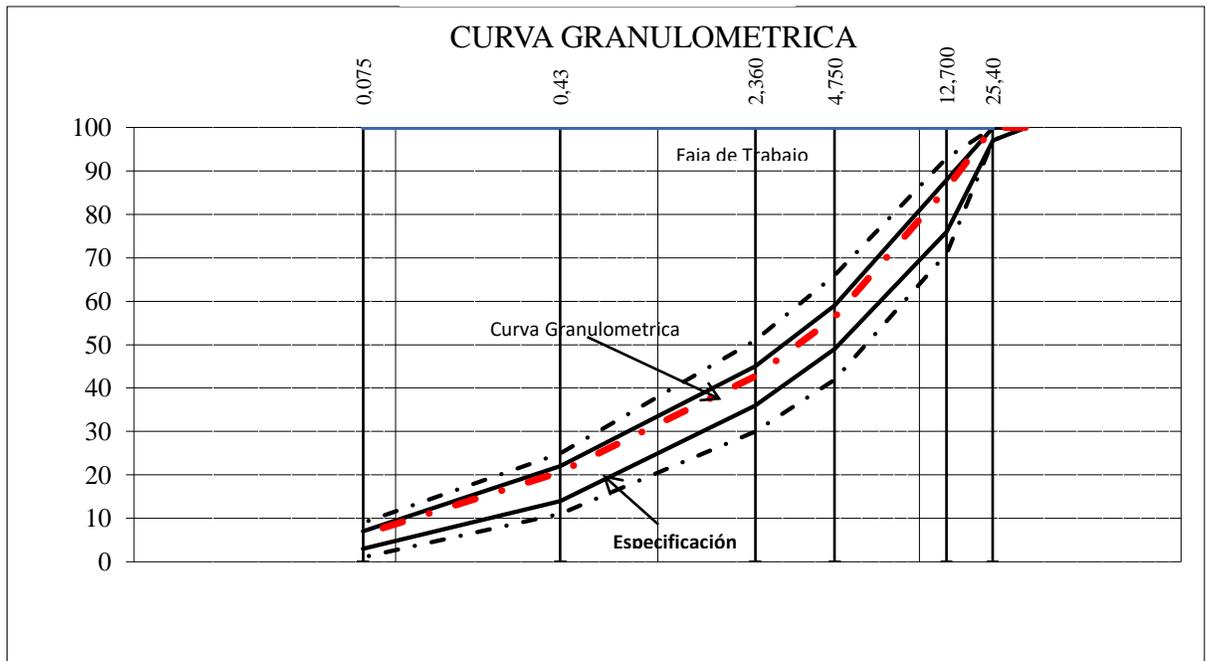
Fuente: Elaboración propia

Tabla 61. Análisis granulométrico

Granulometría			
Tamiz	Peso (grs)	%	Especif.
	Retenido	Pasa	
1"	0	100	100-100
3/4"	0	100	97-100
1/2"	66,0	92,19	76-88
Nº 4	336,0	60,24	49-59
Nº 8	462,0	45,33	36-45
Nº 40	648,0	23,31	14-22
Nº 200	763,50	9,64	3-7

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Granulometría



Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Dosificación de los agregados

La elaboración de una mezcla con RAP implica el empleo de una composición granulométrica diferente a la de las mezclas tradicionales, como se ha visto en el desarrollo de esta investigación.

La forma común de su utilización es incorporando ciertos porcentajes de RAP al diseño de una mezcla tradicional.

Para elaborar el diseño debemos tener previamente la granulometría del RAP para poder efectuar la combinación granulométrica de los áridos nuevos del RAP considerando el porcentaje óptimo de cemento asfáltico del diseño original.

Tabla 62. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 5 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			5	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	141,01	141,01
1/2"	N°4	86,95	34,29	370,55	511,56
N°4	N° 8	52,67	13,42	145,02	656,58
N° 8	N° 40	39,25	19,05	205,83	862,41
N° 40	N° 200	20,2	14,74	159,32	1021,73
N° 200	Fondo	5,46	5,46	58,99	1080,72
Suma Total Agregados		1080,7			
Cemento Asfáltico		62,4			
RAP		56,9			

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	1080,7 gr.
Peso RAP =	56,9 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf.=	1200,0 gr.

Tabla 63. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 10 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			10	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	133,59	133,59
1/2"	N°4	86,95	34,29	351,04	484,63
N°4	N° 8	52,67	13,42	137,38	622,02
N° 8	N° 40	39,25	19,05	195,00	817,02
N° 40	N° 200	20,2	14,74	150,93	967,95
N° 200	Fondo	5,46	5,46	55,89	1023,8
Suma Total Agregados				1023,8	
Cemento Asfáltico				62,4	
RAP				113,8	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	1023,8 gr.
Peso RAP =	113,8 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf.=	1200,0 gr.

Tabla 64. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 15 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			15	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	126,17	126,17
1/2"	Nº4	86,95	34,29	331,54	457,71
Nº4	Nº 8	52,67	13,42	129,75	587,46
Nº 8	Nº 40	39,25	19,05	184,17	771,63
Nº 40	Nº 200	20,2	14,74	142,55	914,18
Nº 200	Fondo	5,46	5,46	52,78	966,96
Suma Total Agregados				967,0	
Cemento Asfáltico				170,6	
RAP				180	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	967,0 gr.
Peso RAP =	170,6 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf. =	1200,0 gr.

Tabla 65. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 20 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			20	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	118,75	118,75
1/2"	Nº4	86,95	34,29	312,04	430,79
Nº4	Nº 8	52,67	13,42	122,12	552,91
Nº 8	Nº 40	39,25	19,05	173,33	726,24
Nº 40	Nº 200	20,2	14,74	134,16	860,40
Nº 200	Fondo	5,46	5,46	49,68	910,08
Suma Total Agregados				910	
Cemento Asfáltico				62,4	
RAP				227,5	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	910,0 gr.
Peso RAP =	227,5 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf. =	1200,0 gr.

Tabla 66. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 25 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			25	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	111,33	111,33
1/2"	N°4	86,95	34,29	292,54	403,86
N°4	N° 8	52,67	13,42	114,49	518,35
N° 8	N° 40	39,25	19,05	162,50	680,85
N° 40	N° 200	20,2	14,74	125,78	806,63
N° 200	Fondo	5,46	5,46	46,57	853,20
Suma Total Agregados				853,2	
Cemento Asfáltico				62,4	
RAP				284,4	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	853,2 gr.
Peso RAP =	284,4 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf. =	1200,0 gr.

Tabla 67. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 30 %.

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			30	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	103,90	109,6
1/2"	Nº4	86,95	34,29	273,03	376,94
Nº4	Nº 8	52,67	13,42	106,85	483,79
Nº 8	Nº 40	39,25	19,05	151,67	635,46
Nº 40	Nº 200	20,2	14,74	117,39	752,85
Nº 200	Fondo	5,46	5,46	43,47	796,32
Suma Total Agregados				796,32	
Cemento Asfáltico				62,4	
RAP				341	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	796,32 gr.
Peso RAP =	341,00 gr.
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf.=	1200,0 gr.

3.7.4. Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio

Se procedió a realizar el ensayo de la misma manera que se hizo el ensayo de Marshall convencional, con la diferencia que previo a la utilización de RAP y este debe ser calentado y desmenuzado para tener un mejor manejo del mismo en este caso no se está tomando en cuenta el porcentaje de asfalto que tenía el pavimento reciclado puesto que la carpeta asfáltica reciclada ya tiene más de 10 años de antigüedad, se encuentra deteriorado por lo cual no aportaría las mismas propiedades que un cemento asfáltico nuevo, posteriormente se procedió a pesar las muestras incorporando diferentes porcentajes de RAP 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% y manteniendo el contenido óptimo de cemento asfáltico que obtuvimos del diseño Marshall convencional que es de un 5,2%, para preparar la mezcla asfáltica, se debe calentar el conjunto de molde y la base de compactación a una temperatura entre 100-150 °C.

Figura 57. Calentando mezcla asfáltica a reciclar



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Calentamiento de los moldes para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Por un lado, se pesa en fuentes los distintos tipos de los agregados calculados para una briqueta de 1200 g, por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura superior a 100 °C, hasta que esté fluido.

Figura 59. Se realiza el pesaje de los agregados para la muestra a ensayar



Fuente: Elaboración propia

Mezclar los agregados con el cemento asfáltico, agitar durante el calentamiento de la mezcla para evitar sobrecalentamientos locales y evitar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

Figura 60. Se realiza el mezclado homogéneo de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cuando la mezcla haya alcanzado los 140 °C, se debe vaciar con una cuchara en el molde abierto, previamente pasado con un poco de aceite, para el desmolde de briqueta y un papel filtro en la base, para que la muestra se pueda quitar fácilmente después de haber enfriado.

Figura 61. Preparación de los moldes para el compactado



Fuente: Elaboración propia

El molde tiene un diámetro interior de 4", la compactación se hace usando un martillo de 10 lb de peso, el martillo tiene una altura de caída libre de 18".

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas, con las dosificaciones indicadas en las tablas.

Se extraen las muestras con la ayuda de un gato hidráulico.

Figura 62. Compactado de briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.7.5. Ensayo de Marshall

Una vez extraídas las briquetas de los moldes se proceden a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa. Primero se mide las alturas de las briquetas en tres puntos.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben estar sumergidas a baño maría de agua 60 °C durante 30 minutos.

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 debe verificar

previamente a la aplicación de la carga que es indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante 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 de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de Estabilidad Marshall.

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.

Figura 63. Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia

3.7.5.1. Proceso de cálculo de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional 85-100

Se desarrollará para el ensayo solo una briqueta en la cual se lo realizará paso a paso para un mejor entendimiento del ensayo para el porcentaje de cemento asfáltico de 4%.

3.7.5.2. Altura de briquetas

Primero se debe Identificar las briquetas, medir con un vernier las alturas en tres puntos de la briquea y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Tabla 68. Alturas medidas de cada briquea

Identificación	Alturas (cm)	Promedio de alturas (cm)
1	6,14	6,26
	6,13	
	6,41	
	6,36	
2	6,11	6,18
	6,17	
	6,25	
	6,21	
3	6,21	6,22
	6,24	
	6,20	
	6,22	

Fuente: Elaboración propia

3.7.5.3. Peso de briquea en el aire.

Posteriormente el peso de la briquea en el aire, que consiste en su peso después de sacarlo del molde.

Tabla 69. Peso al aire de las briquetas

Identificación	Peso briquea en el aire (gr)
1	1187,1
2	1192,9
3	1193,8

Fuente: Elaboración propia

3.7.5.4. Peso de briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.)

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 30 minutos a 25°C.

Tabla 70. Peso al aire de las briquetas

Identificación	Peso briqueta en el aire S.S.S. (gr)
1	1189,2
2	1196,4
3	1197,6

Fuente: Elaboración propia

3.7.5.5. Peso de briqueta sumergida en el agua

El peso de la briqueta sumergida en agua consiste en medir su peso una vez transcurrido 30 minutos sumergida en agua a 25°C.

Figura 64. Peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 71. Peso briqueta sumergida en agua

Identificación	Peso briqueta sumergida en agua (gr)
1	687,6
2	687,2
3	690,2

Fuente: Elaboración propia

3.7.5.6. Volumen de la briqueta

Para este proceso de cálculo se lo realizara para la briqueta identificada como B1.

Vol. de briqueta=Peso briqueta en el aire SSS-Peso de briqueta sumergida

$$\text{Vol. de briqueta}=1189,2-687,6$$

$$\text{Vol. de briqueta}=501,6 \text{ [gr]}$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm³ se considera:

$$\text{Vol. de briqueta}=501,6 \text{ [cm}^3\text{]}$$

3.7.5.7. Densidad de la briqueta

Para este proceso de cálculo se lo realizara para la briqueta identificada como 1.

3.7.5.8. Densidad real de la briqueta

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

$$\text{Densidad Real} = \frac{1187,1 \text{ gr}}{501,6 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad Real} = 2,354 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

3.7.5.9. Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad MáxT} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad MáxT} = \frac{100}{\frac{5,2}{1,004} + \frac{100 - 5,2}{2,681}}$$

$$\text{Densidad MáxT} = 2,467 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

3.7.5.10. Porcentaje de Vacíos.

Para este proceso de cálculo se lo realizara para la briqueta identificada como B1.

3.7.5.11. Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv).

$$V_v = \frac{\text{Densidad MáxT} - \text{Densidad Real Promedio}}{\text{Densidad MáxT}} * 100\%$$

$$V_v = \frac{2,467 - 2,354}{2,467} * 100\%$$

$$V_v = 4,56\%$$

3.7.5.12. Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM).

$$VAM = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad Real Promedio}}{\text{Peso específico de asfalto}} + \% \text{ de vacíos}(V_v)$$

$$VAM = \frac{5,2 * 2,354}{1,004} + 4,56$$

$$VAM = 16,76\%$$

3.7.5.13. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV).

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} * 100\%$$

$$RBV = \frac{16,76 - 4,56}{16,76} * 100\%$$

$$RBV = 72,76\%$$

3.7.5.14. Estabilidad y Fluencia.

La estabilidad y la fluencia son propiedades que se obtiene a partir de la prensa Marshall.

Tabla 72. Datos del ensayo de estabilidad y fluencia

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia (plg.)
1	1094	400,00
2	1102	360,00
3	1098	380,00

Fuente: Elaboración propia

Se procede a realizar una corrección de calibración de la prensa Marshall mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad Real} = \text{Lectura dial} * \text{Factor de Unidad}$$

Donde:

Lect. Dial = Es la lectura medida en la prensa Marshall.

Tabla 73. Estabilidad real

Identificación	Estabilidad (lb)		
	Lectura Dial	Real	Promedio
1	1094	2413,15	2308,26
2	1102	2259,92	
3	1098	2251,72	

Fuente: Elaboración propia

Después del cálculo de estabilidad real se procederá corregir por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad Corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor Corrección de Altura}$$

Donde:

Factor Correc. Altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5 mm.

Tabla 74. Alturas promedio y factor de corrección por altura

Identificación	Promedio de alturas (cm)	Factor de corrección por altura
1	6,26	1,025
2	6,18	1,046
3	6,22	1,035

Fuente: Manual de la ABC vol. 4A tabla A0608_1 Factores de Corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASHTO).

Tabla 75. Estabilidad corregida

Identificación	Estabilidad Real (lb)	Promedio del factor de corrección	Estabilidad Corregida (lb)	Estabilidad corregida promedio
1	2413,15	1,025	2473,01	2389
2	2259,92	1,046	2363,88	
3	2251,72	1,035	2330,53	

Fuente: Elaboración propia.

Para la corrección de la fluencia medida en la prensa Marshall se realiza:

$$\text{Fluencia} = \frac{\text{Lectura dial}}{25,4}$$

Tabla 76. Corrección de fluencia

Identificación	Lectura dial	Fluencia 1/100	Promedio
	Fluencia (plg.)		
1	400	15,75	14,96
2	360	14,17	
3	380	14,96	

Fuente: Elaboración propia

3.7.6. Resultados del Diseño de la Mezcla Asfáltica Convencional 85-100

A continuación, se muestra las planillas de resultados:

Tabla 77. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica con RAP 85-100

% de RAP	Identificaci	Altura Promedio	Densidad Real	% Vacíos en la	% Vacíos de agregado	% Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad Corregida	Fluencia 1/100
5	1	6,26	2,354	4,56	16,76	72,76	2389	14,96
	2	6,18						
	3	6,22						
10	4	6,34	2,376	3,68	15,99	76,98	2729	14,0
	5	6,28						
	6	6,31						
15	7	6,28	2,391	3,08	15,47	80,06	2900	13,8
	8	6,32						
	9	6,30						
20	10	6,31	2,386	3,28	15,63	79,05	2778	15,0
	11	6,30						
	12	6,31						
25	13	6,40	2,382	3,43	15,77	78,26	2434	14,0
	14	6,51						
	15	6,40						
30	16	6,30	2,366	4,09	16,34	74,98	2597	15,2
	17	6,34						
	18	6,29						

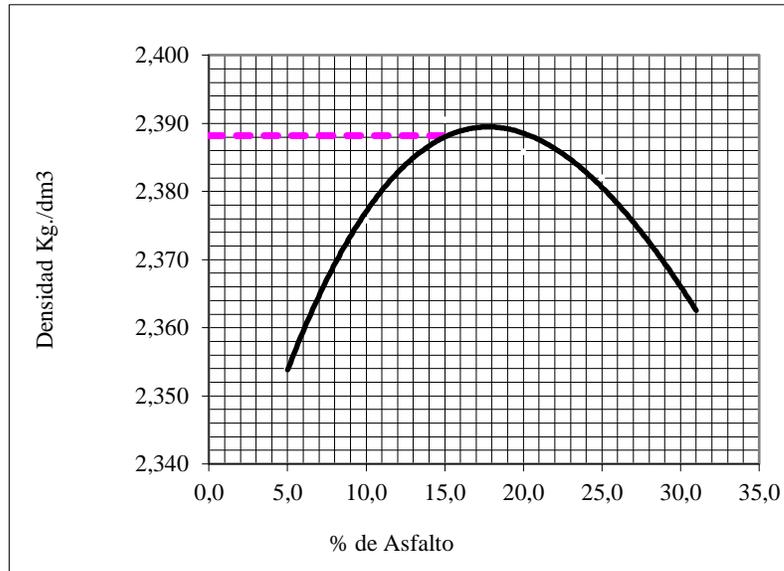
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido todos estos valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

- Porcentaje de Asfalto vs. densidad de la probeta.

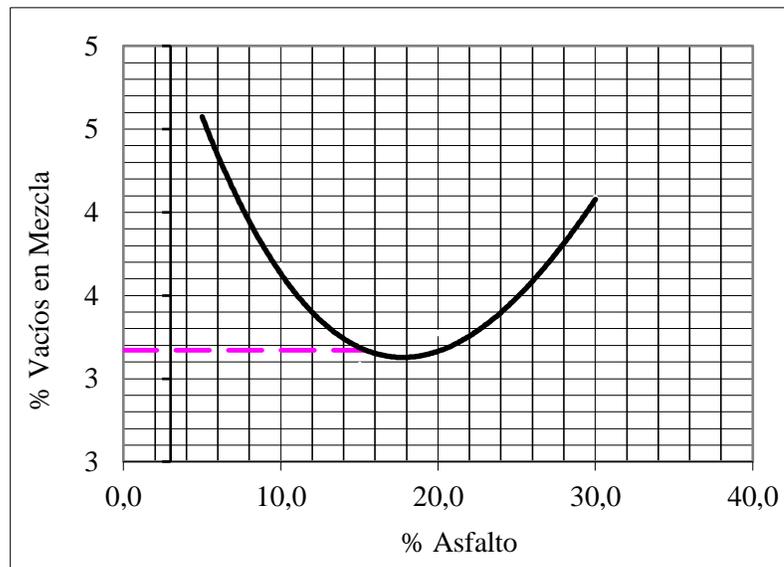
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de Asfalto vs. vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV).
- Porcentaje de Asfalto vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo).

Figura 65. Porcentaje de RAP vs Densidad de la Briqueta



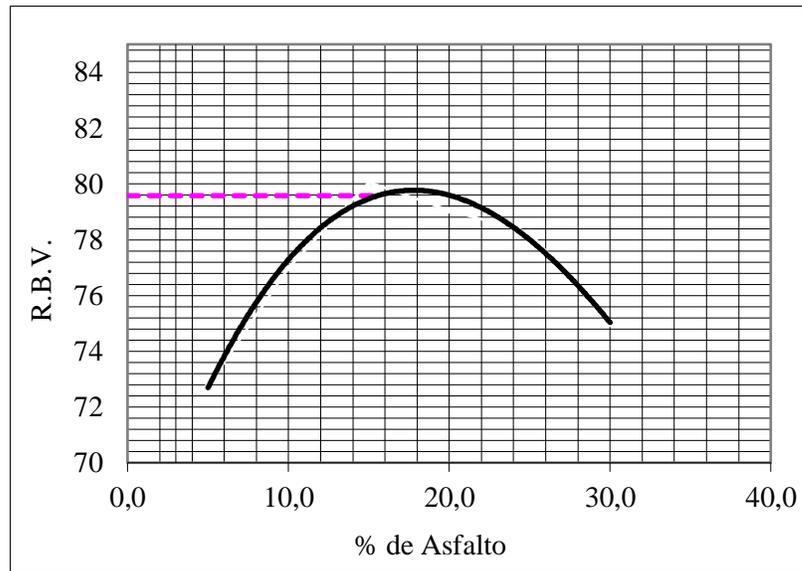
Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Porcentaje de RAP vs Vacíos de la mezcla (Vv).



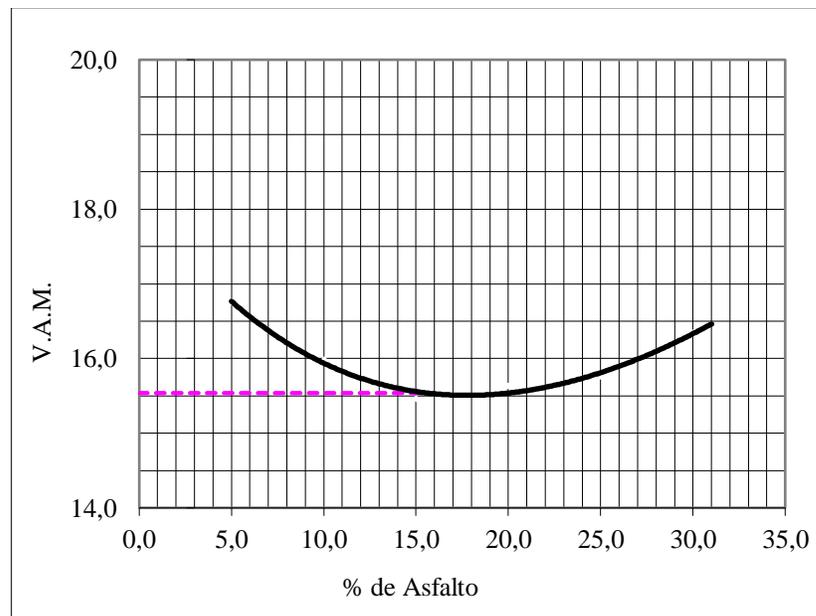
Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Porcentaje de RAP vs RBV



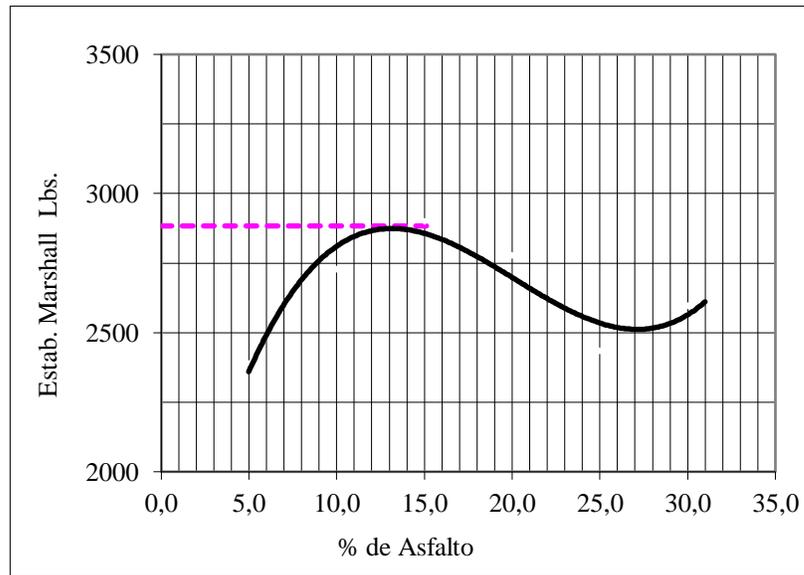
Fuente: Elaboración propia

Figura 68. Porcentaje de RAP vs VAM



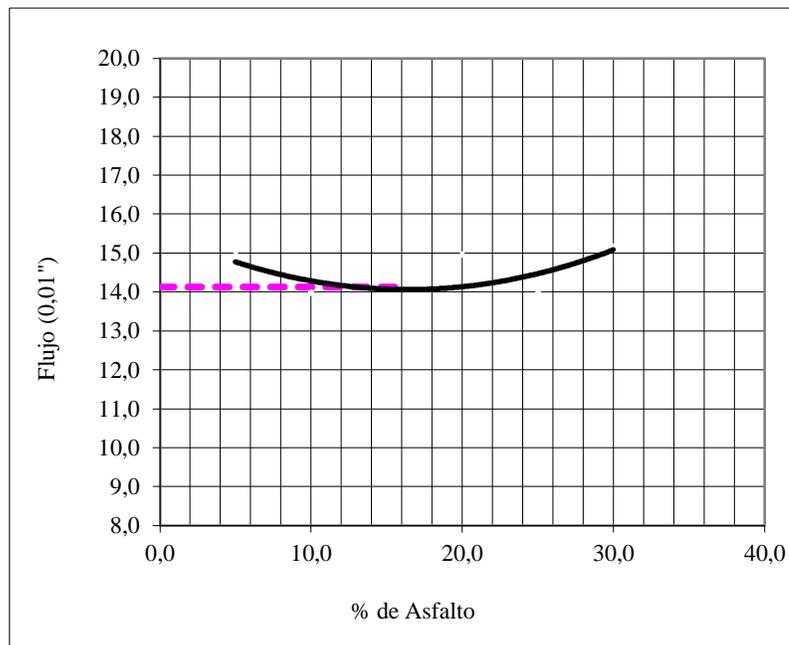
Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Porcentaje de RAP vs Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 70. Porcentaje de RAP vs Fluencia



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 78. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con RAP

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% De rap	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	15,57	2,388	-----	-----
% Vacios	15,57	3,17	3	5
R.b.v.	15,57	79,6	75	82
V.a.m	15,57	15,540	15	
Estabilidad (lb)	15,57	2884,6	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	15,57	14,12	8	16
% Óptimo de RAP propuesto			15,57	

Fuente: Elaboración propia

3.7.7. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo de RAP

Después de calcular cual es el porcentaje óptimo de RAP que se puede incorporar que es igual al 10 % en la briqueta de 1200 gramos, se procede a pesar las muestras para su respectiva comparación, en la siguiente tabla se muestran los pesos retenidos en cada tamiz repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas.

Tabla 79. Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 10%

Tamiz		Resultante	Parcial	% RAP	PST
Pasa	Retiene			10	1200
				Peso Parcial	Peso Acumulado
0	0	100		0	0
2"	1 1/2"	100	0	0	0
1 1/2"	1"	100	0	0	0
1"	3/4"	100	0	0	0
3/4"	1/2"	100	13,05	133,59	133,59
1/2"	Nº4	86,95	34,29	351,04	484,63
Nº4	Nº 8	52,67	13,42	137,38	622,02
Nº 8	Nº 40	39,25	19,05	195,00	817,02
Nº 40	Nº 200	20,2	14,74	150,93	967,95
Nº 200	Fondo	5,46	5,46	55,89	1023,8
Suma Total Agregados				1023,8	
Cemento Asfáltico				62,4	
RAP				113,8	

Fuente: Elaboración propia

Peso Muestra=	1023,8 gr.
Peso RAP (10%)=	113,8
Peso Asfalto (5,2%) =	62,4 gr.
Peso Total Material + C. Asf.=	1200,0 gr.

Tabla 80. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de RAP

% de RAP	Identificación	Altura Promedio (cm)	Peso Seco al aire (gr.)	Peso Sumergido superficial seco(gr.)	Peso Sumergido al agua (gr.)	Lectura Dial Estabilidad	Lectura Dial Fluencia
15.57	1	6,20	1180.1	1181.0	688,0	1212	400
	2	6,21	1172.6	1174.9	684,2	1083	420
	3	6,24	1182.5	1183.9	690,0	1166	400
15.57	4	6,32	1190,4	1191,1	692,1	908	410
	5	6,22	1187.8	1188.3	693,7	1076	400
	6	6,26	1187.1	1187,8	690,7	956	400

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el ensayo las briquetas 4, 5 y 6 fueron los datos obtenidos como los valores de estabilidad remanente a las 24 horas este tiempo fueron sumergidas a baño maría.

Tabla 81. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo a las 24 hr

% de RAP	Identificación	PROPIEDADES MECÁNICAS						
		Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	% Vacíos de agregado (VAM)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
10	1	6,20	2,394				2760.88	
	2	6,21	2,390				2476.14	
	3	6,24	2,394				2645.82	
	Promedio		2,393	3,00	80,51	15,39	2628	16
10	4	6,32	2,386				2018.82	
	5	6,22	2,402				2455.85	
	6	6,26	2,388				2159.02	
	Promedio		2,392	3,03	80,36	15,42	2211	15,9

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la resistencia remanente de 24 horas es:

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{2211}{2628} * 100\%$$

$$\text{Resistencia Remanente} = 84,13\%$$

Análisis de resultados:

Se puede observar un decreciente valor de la estabilidad con respecto al tiempo

Glover Rowe fijo unos valores límites para prevenir el daño por agrietamiento.

Zona de inicio de daño. Indica el inicio del agrietamiento en el ligante asfáltico y está expresado por la siguiente fórmula:

$$G^* \left(\frac{\cos \delta}{\sin \delta} \right) = 180 \text{ kPa}$$

Agrietamiento en bloque. Indica el agrietamiento inminente y está expresado por la siguiente fórmula:

$$G^* * \left(\frac{\cos \delta}{\sin \delta} \right) = 450 \text{ kPa}$$

Dónde:

δ = Ángulo de fase

G^* = Módulo complejo

G' = Módulo de almacenamiento de energía

η' = Viscosidad del material

3.8. Ensayo de extracción de asfalto

Este método es usado para la determinación cuantitativa del contenido de betumen en las mezclas de pavimentación.

Una vez determinado el contenido óptimo de pavimento reciclado que se incorporara a nuestra mezcla, verificamos el contenido de asfalto de una muestra

Determinar el porcentaje de asfalto que se tiene en la nueva mezcla asfáltica donde ya se incorporó el 15,57% de RAP.

Figura 71. Peso del plato más filtro



Fuente: Elaboración propia

Figura 72. Proceso de extracción



Fuente: Elaboración propia

Figura 73. Proceso de extracción



Fuente: Elaboración propia

Tabla 82. Datos de extracción

Extracción asfalto	
	Planta
Peso Filtro +Plato (grs)	3351
P. F. +Plato+ M. (Antes)(grs)	4250
P. F. +Plato+ M. (Desp.)(grs)	4196
Peso Mezcla	899
Peso agregado	845
% Asfalto (%)	6,01

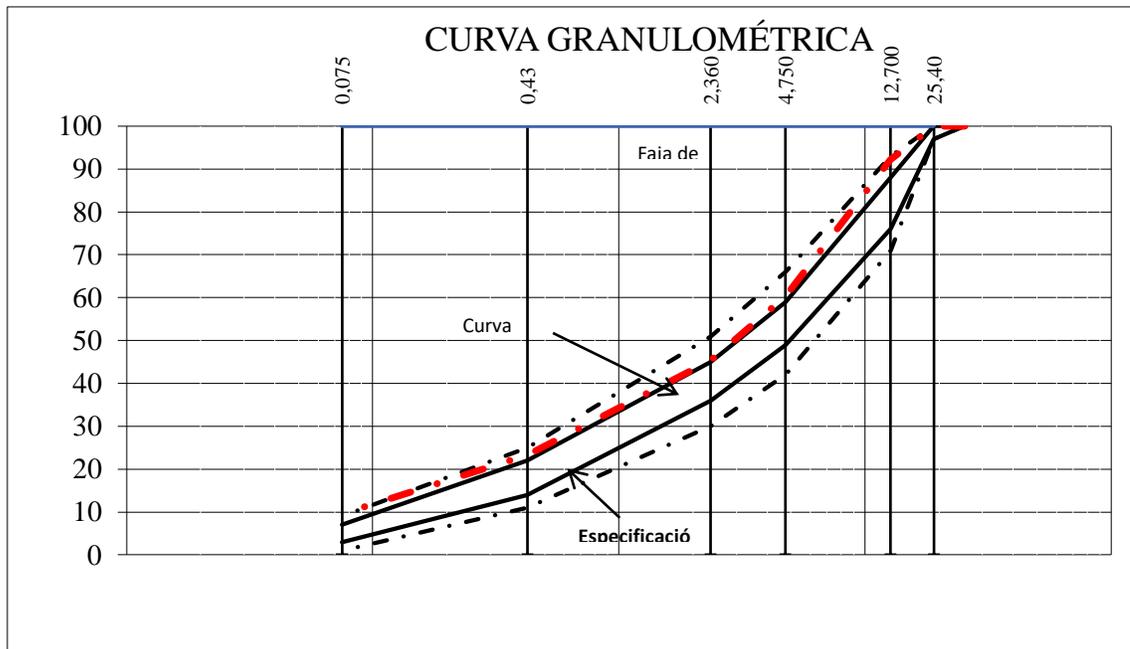
Fuente: Elaboración propia

Tabla 83. Análisis granulométrico

Granulometría			
Tamiz	Peso (grs)	%	Especif.
	Retenido	Pasa	
1"	0	100	100-100
3/4"	0	100	97-100
1/2"	66	92,19	76-88
Nº 4	336	60,24	49-59
Nº 8	462	45,33	36-45
Nº 40	648	23,31	14-22
Nº 200	763,50	9,64	3-7

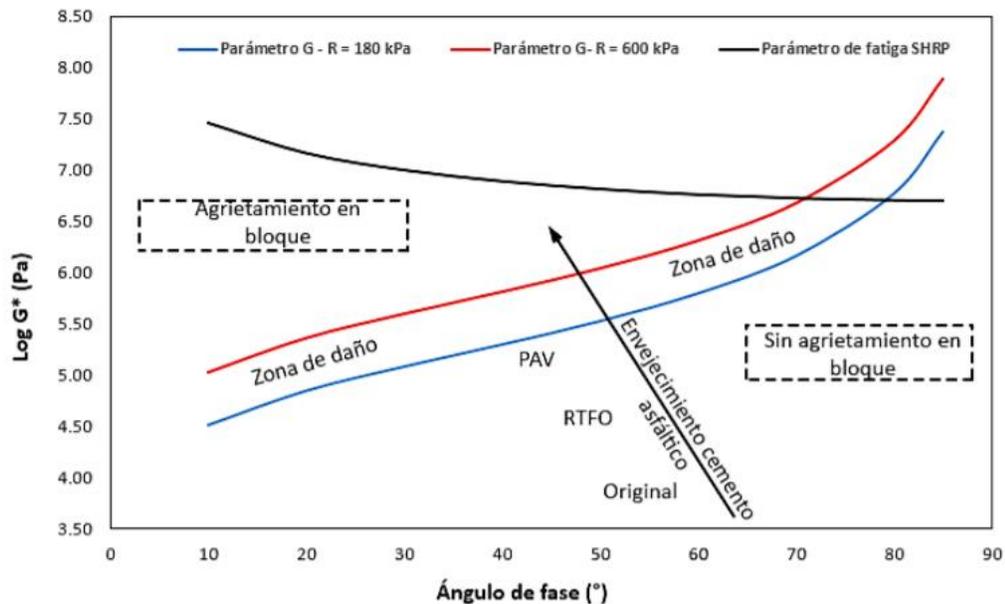
Fuente: Elaboración propia

Figura 74. Curva proyectada



Fuente: Elaboración propia

**Figura 75. Diagrama black space para graficar el parámetro Glover – Rowe
Zona de inicio de daño y Zona de agrietamiento en bloque**



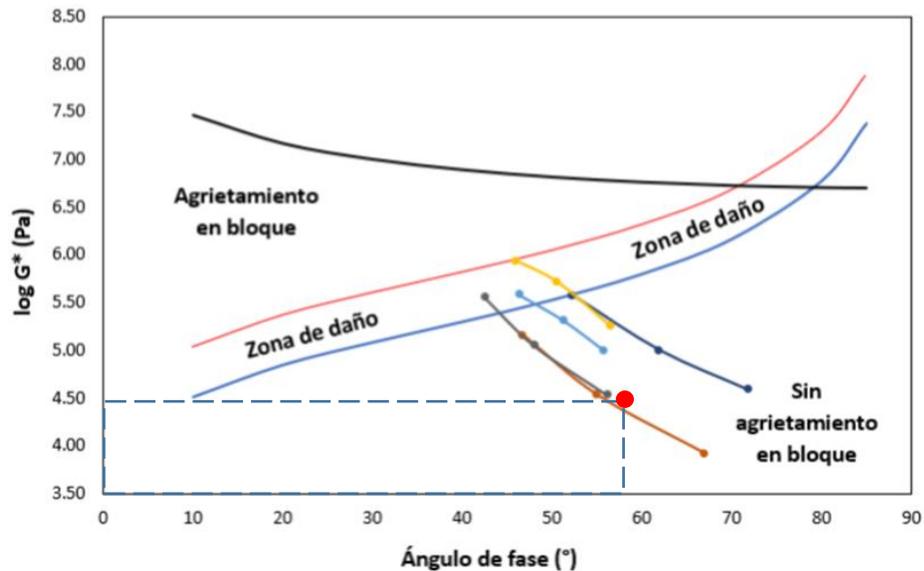
Fuente: aplicación del parámetro Glover-Rowe para la optimización de rap en una mezcla asfáltica en caliente (Villafuerte Pérez David Israel, Ossa López Alexandra, Hernández Fernández Noé)

Este diagrama de Black Space, es de gran utilidad para la interpretación del parámetro de Glover Rowe, en el mismo se muestra un ejemplo donde se observan los límites de ductilidad establecidos. Un límite inferior de la ductilidad expresado por el valor de 180kPa que corresponde al comienzo del daño ocasionado por el agrietamiento y el límite superior de ductilidad expresado por un valor de 600 kPa lo cual significaría problemas graves de agrietamiento.

En el estudio que se realizó originalmente para la correcta optimización de RAP, podemos observar que se utilizó 25% de RAP y que el ajuste es bueno por lo que permiten obtener parámetros reológicos adecuados para su implementación en el diagrama Glover – Rowe.

Mi investigación se está basando en el estudio realizado donde ya tienen graficadas las curvas con diferentes porcentajes de reciclado, en este grafico podemos ver los resultados de este estudio por lo tanto para encontrar mi parámetro de Glover Rowe directamente ubicare un punto donde no esté en zona de daño que es lo que se busca en este estudio y con ese punto dado encontrar mis valores del ángulo de fase y de log de G que voy a asumir para mi estudio.

Figura 76. Diagrama graficado el parámetro Glover – Rowe



Fuente: aplicación del parámetro Glover-Rowe para la optimización de rap en una mezcla asfáltica en caliente (Villafuerte Pérez David Israel, Ossa López Alexandra, Hernández Fernández Noé)

El parámetro de Glover rowe se puede obtener a través de la siguiente expresión

$$\begin{aligned}
 \text{Parámetro (G-R)} &= G^* \left(\frac{(\cos \delta)^2}{\text{sen } \delta} \right) * \omega \\
 &= 10^5 * \left(\frac{(\cos 58)^2}{\text{sen } 58} \right) * 0,67 \\
 &= 100000 * \left(\frac{0,376}{0,790} \right) * 0,67 \\
 &= 100000 * (0,476) * 0,67 = 31892 \\
 &= \log G = 4,50
 \end{aligned}$$

Donde G^* , es el módulo complejo expresado en Pa, δ , es el ángulo de fase, en ° y ω es la frecuencia angular, en rad/s.

Por lo tanto los datos asumidos nos da que el parámetro de Glover Rowe se encuentra por debajo de la zona de Daño lo tanto, el 15,57% de RAP obtenido este estudio está por

debajo de la zona de daño, se optó por realizar de esta manera el estudio, debido a que en Bolivia no se cuenta con una metodología específica para el diseño de mezclas asfálticas con RAP y también por la falta de tecnología en los equipos, con esta investigación se busca motivar a la utilización de RAP ya que es viable y es un material en pro de la sustentabilidad, debido a que se obtienen diversos beneficios económicos y medioambientales.

3.9. Comparación económica de precios unitarios de la mezcla convencional y mezcla con incorporación de RAP

Se realiza el análisis de precios unitarios por metro cúbico para una mezcla convencional y para la mezcla asfáltica con el 15,57% de reciclado

Para ejecución y transporte una carpeta de concreto asfáltico, el análisis de precios unitarios comprende los costos de materiales, mano de obra, equipo y herramientas, gastos generales e impuestos.

Tabla 84. Análisis de precios unitarios, mezcla convencional

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productivo.	Costo Total
1.- MATERIALES				
CEMENTO ASFALTICO	TON	0,078	10.600,00	826,8
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	M3	0,2844	162	46,07
ARENA CLASIFICADA	M3	0,427	145	61,92
DIESEL	LT	18	3,72	66,96
GRAVATRITURADA CLASIFICADA 3/8"	M3	0,237	162	38,39
TOTAL, MATERIALES				1.040,14
2.- MANO DE OBRA				
AYUDANTE MAQUINARIA Y EQUIPO	HR.	0,028	15,14	0,42
CAPATAZ	HR.	1,8	22,6	40,68
CHOFER	HR.	0,0012	16,25	0,02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HR.	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0,082	20	1,64
OPERADOR DE PLANTA	HR.	0,09	24	2,16
PEON	HR.	0,072	12	0,86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64,88
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71,18%	46,18
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14,94%	16,59
TOTAL, MANO DE OBRA				127,65
3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0,0001	422,27	0,04
COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOPROP M2 /HR	HR.	0,035	304,66	10,66
DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS AUTOPROPULSADO M3	HR.	0,028	458,75	12,84
ESCOBA MECANICA AUTOPROPULSADA M2/HR	HR.	0,028	69,45	1,94
PLANTA CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	HR.	0,09	963,34	86,7
RODILLO NEUMATICO TSP >=1000	HR.	0,084	332,33	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	HR.	0,075	683,06	51,23
VOLQUETA >= 12	HR.	0,03	225,06	6,75
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5,00%	6,38
TOTAL, EQUIPO Y HERRAMIENTAS				204,47
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18,00%	247,01
TOTAL, GASTOS GENERALES				247,01
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10,00%	161,93
TOTAL, UTILIDAD				161,93
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3,09%	55,04
TOTAL, IMPUESTOS				55,04
TOTAL, PRECIO UNITARIO				1.836,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 85. Análisis de precios unitarios, mezcla con RAP 15.57%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productivo.	Costo Total
1.- MATERIALES				
CEMENTO ASFALTICO	TON	0,078	10.600,00	826,8
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	M3	0,24242	162	39,27
ARENA CLASIFICADA	M3	0,36363	145	52,73
DIESEL	LT	18	3,72	66,96
GRAVATRITURADA CLASIFICADA 3/8"	M3	0,20202	162	32,73
RAP	M3	0,1557	0	0
TOTAL, MATERIALES				1.018,49
2.- MANO DE OBRA				
AYUDANTE MAQUINARIA Y EQUIPO	HR.	0,028	15,14	0,42
CAPATAZ	HR.	1,8	22,6	40,68
CHOFER	HR.	0,0012	16,25	0,02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HR.	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0,082	20	1,64
OPERADOR DE PLANTA	HR.	0,09	24	2,16
PEON	HR.	0,072	12	0,86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64,88
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71,18%	46,18
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14,94%	16,59
TOTAL, MANO DE OBRA				127,65
3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >= 950 M3	HR.	0,0001	422,27	0,04
COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOPROP M2 /HR	HR.	0,035	304,66	10,66
DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS AUTOPROPULSADO M3	HR.	0,028	458,75	12,84
ESCOBA MECANICA AUTOPROPULSADA M2/HR	HR.	0,028	69,45	1,94
PLANTA CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	HR.	0,09	963,34	86,7
RODILLO NEUMATICO TSP >= 1000	HR.	0,084	332,33	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	HR.	0,075	683,06	51,23
VOLQUETA >= 12	HR.	0,03	225,06	6,75
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5,00%	6,38
TOTAL, EQUIPO Y HERRAMIENTAS				204,47
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18,00%	243,11
TOTAL, GASTOS GENERALES				243,11
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10,00%	159,37
TOTAL, UTILIDAD				159,37
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3,09%	54,17
TOTAL, IMPUESTOS				54,17
TOTAL, PRECIO UNITARIO				1.807,27

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
1.- MATERIALES				
		0,00000	0,00	0,00
TOTAL MATERIALES				0,00
2.- MANO DE OBRA				
CHOFER	HR.	0,00650	16,25	0,11
OPERADOR DE EQUIPO PESADO 1		0,01600	23,28	0,37
PEON	HR.	0,00650	12,00	0,08
SUBTOTAL MANO DE OBRA				0,56
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71,18%	0,40
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14,94%	0,14
TOTAL MANO DE OBRA				1,09
3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
VOLQUETA >= 12	HR.	0,00650	225,06	1,46
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >= 950 M3	HR.	0,01600	422,27	6,76
Fresadora compacta de 155 kW, equipada con banda transportadora, de 100 cm de anchura de fresado y hasta 30 cm de profundidad	HR.	0,02200	1.251,49	27,53
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5,00%	0,05
TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS				35,81
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18,00%	0,40
TOTAL GASTOS GENERALES				0,40
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10,00%	0,26
TOTAL UTILIDAD				0,26
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3,09%	0,09
TOTAL IMPUESTOS				0,09
TOTAL PRECIO UNITARIO				37,66

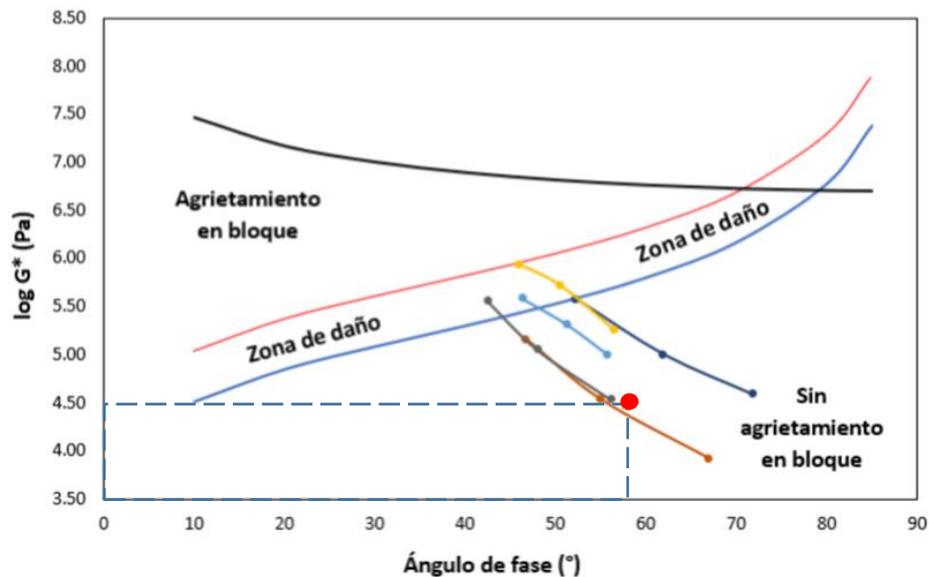
Tabla 86. Comparación de precios unitarios

Actividad	Precio unitario por m ³ (Bs)	Porcentaje de gastos (%)	Porcentaje de aumento de gasto (%)
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica convencional	1836,24	100.00	0,00
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica con incorporación de RAP en un 15,57%	1844,93	100,47	0,47%

Fuente: Elaboración propia

3.10. Análisis de los resultados y comparaciones

Dentro de nuestra investigación requerimos el parámetro de Glover Rowe de manera que estemos en condiciones de asegurar no estar en temperaturas de posible agrietamiento de la mezcla asfáltica con RAP, para ello se asumió las investigaciones ya realizadas en otros países cuyos resultados muestran el comportamiento de las mezclas ante el parámetro Glover Rowe, de los mismos para nuestra investigación se determinó el parámetro para nuestra mezcla como se muestra con el cálculo y gráfica realizada

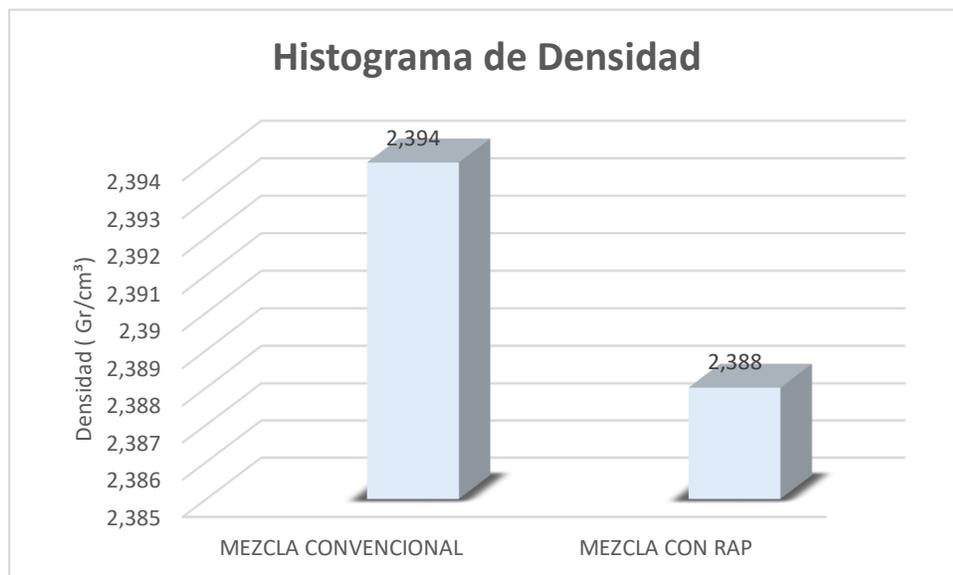


El parámetro de Glover Rowe se puede obtener a través de la siguiente expresión

$$\begin{aligned}\text{Parámetro (G-R)} &= G * \left(\frac{(\cos \theta)^2}{\text{sen } \theta} \right) * \omega \\ &= 10^5 * \left(\frac{(\cos 58)^2}{\text{sen } 58} \right) * 0,67 \\ &= 100000 * \left(\frac{0,376}{0,790} \right) * 0,67 \\ &= 100000 * (0,476) * 0,67 = 31892 \\ &= \log G = 4,50\end{aligned}$$

Con los resultados obtenidos del ensayo Marshall tanto para la mezcla convencional como para la mezcla con RAP se procedió a realizar los cuadros con la finalidad de realizar un análisis comparativo de los resultados mismos que son importantes para determinar las mejoras o desmejoras de la mezcla o si tienen un comportamiento similar.

Figura 77. Histograma de Densidad de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP

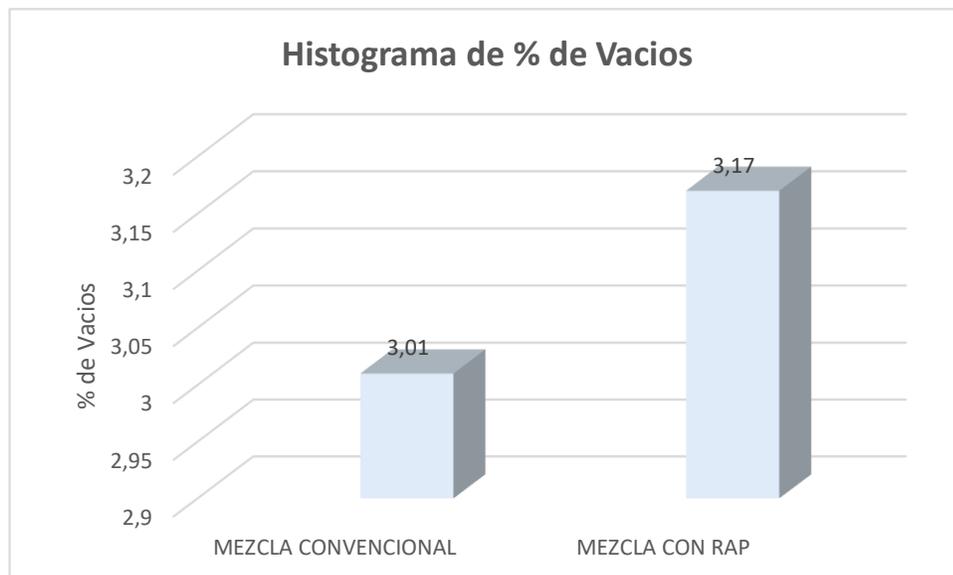


Características	Mezcla convencional	Mezcla con 15,57% de rap
Densidad	2,394	2,388

Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que para la mezcla asfáltica convencional se obtienen una densidad de 2,394 gr/cm³ un valor un poco mayor en comparación a las mezclas asfálticas con RAP que disminuye en un 0,25 % ya que su valor vendría a ser de 2,388 gr/ cm³ ambos valores están dentro de las especificaciones técnicas.

Figura 78. Histograma de % de Vacíos de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP

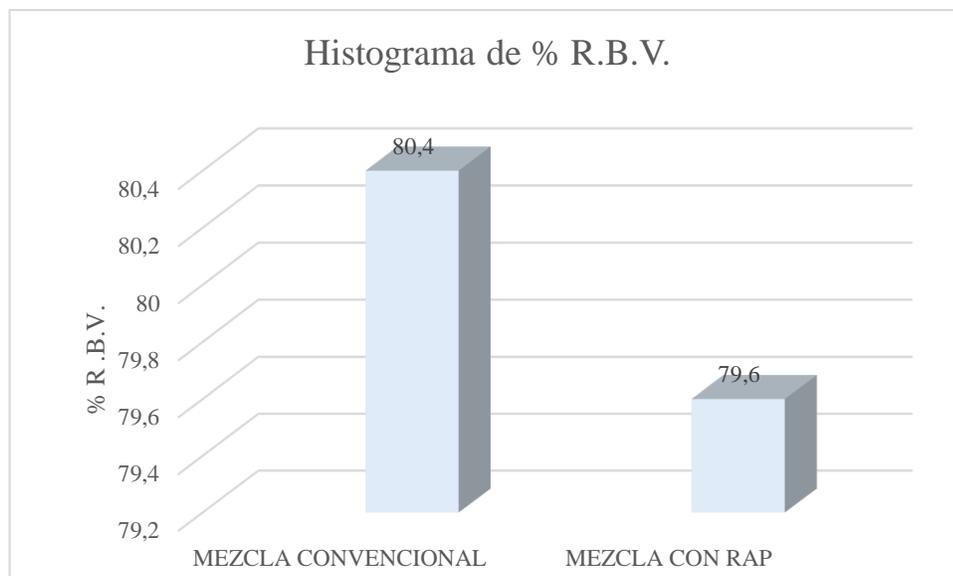


Características	Mezcla convencional	Mezcla con 15,57% de rap
% Vacíos	3,01	3,17

Fuente: Elaboración propia

En la figura se muestran los porcentajes de vacíos de la mezcla convencional y de la mezcla con RAP. Ambos resultados se encuentran más cercanos al límite mínimo de las especificaciones técnicas. El porcentaje de la mezcla asfáltica convencional es de 3,01% y se incrementa. Puede apreciarse que la mezcla con RAP tiene un incremento a 3,17% por lo tanto se tiene que la mezcla con RAP tiene un incremento del 5,32% en sus porcentajes de vacíos en comparación con la mezcla convencional.

Figura 79. Histograma de % de R.V.B. de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP

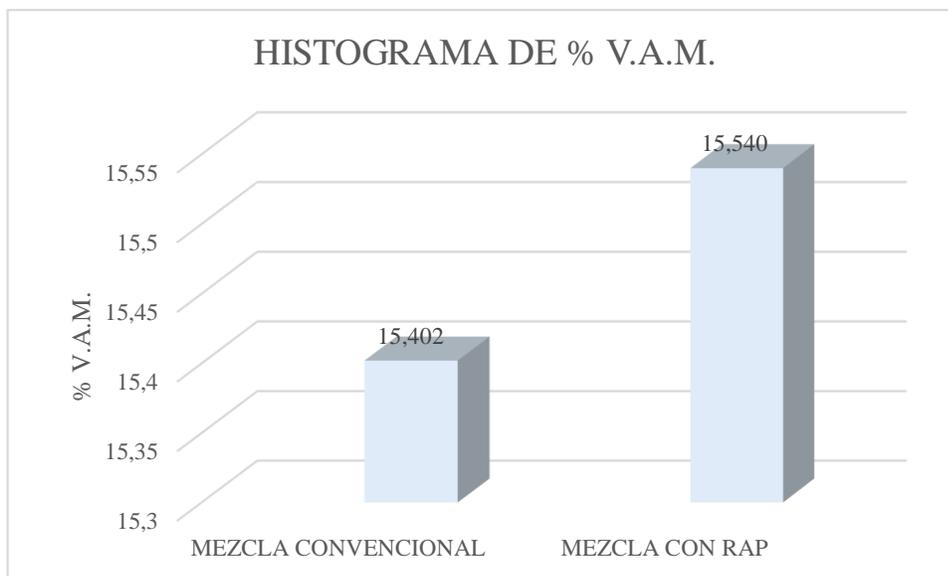


Características	Mezcla convencional	Mezcla con 15.57 % de rap
R.b.v.	80,4	79,6

Fuente: Elaboración propia

En la figura podemos ver los resultados de la relación betumen vacíos, la mezcla convencional tiene un valor de RBV de 80,4% y la mezcla con RAP un valor de 79,6% teniendo una disminución del 0,99 % de la mezcla con RAP esto a diferencia de la mezcla convencional.

Figura 80. Histograma de % de V.A.M. de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP

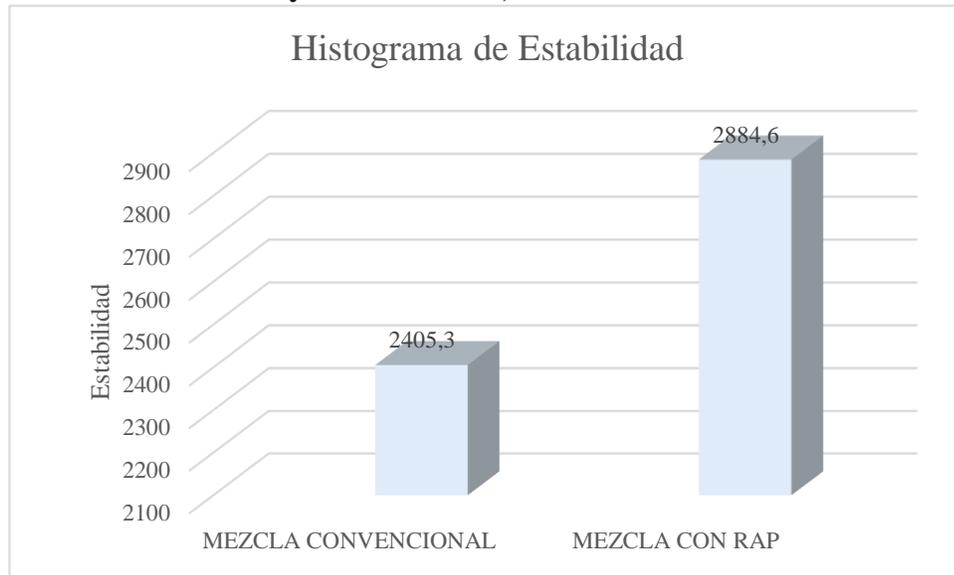


Características	Mezcla convencional	Mezcla con 15.57% de rap
V.a.m	15,402	15,540

Fuente: Elaboración propia

En esta figura se puede apreciar que los Vacíos de agregados minerales de la mezcla asfáltica con RAP tiene un pequeño aumento respecto a la mezcla asfáltica convencional, y de igual manera se encuentran dentro del rango de valores que establecen las especificaciones técnicas del diseño de mezclas para tráfico pesado.

Figura 81. Histograma de % de Estabilidad de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP



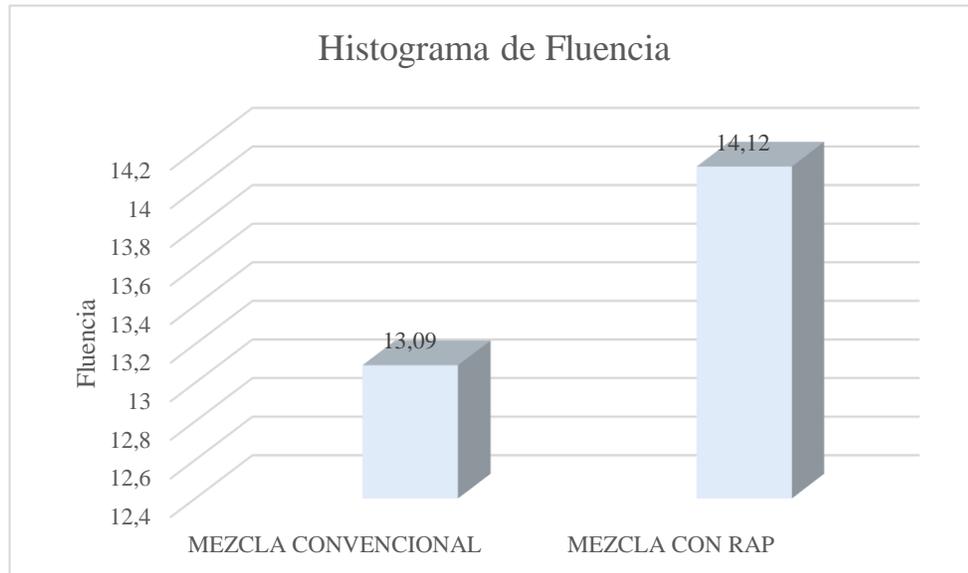
Características	Mezcla convencional	Mezcla con 15.57 % de rap
Estabilidad (lb)	2405,3	2884,6

Fuente: Elaboración propia

En la figura, puede apreciarse que la estabilidad Marshall de la mezcla con RAP, ha incrementado en comparación a la estabilidad obtenida con la mezcla convencional en un 19,93% con este aumento de resistencia demuestra que nuestra mezcla con RAP dio buenos resultados

De tal manera, la estabilidad máxima obtenida de la mezcla con RAP se encuentra dentro del rango establecido por las especificaciones técnicas donde se presenta un valor mayor a 1500 lb.

Figura 82. Histograma de % de fluencia de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP



Características	Mezcla Convencional	Mezcla Con Rap
Fluencia 1/100"	13,09	14,12

Fuente: Elaboración propia

En este cuadro se puede apreciar un aumento del flujo de la mezcla asfáltica con RAP en un 7,87% en relación a la mezcla asfáltica convencional, y de igual manera se encuentran dentro del rango de valores que establecen las especificaciones técnicas del diseño de mezclas para tráfico pesado.

Tabla 87. Resultados de los ensayos de estabilidad Marshall

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características Mecánicas	Mezcla convencional	Mezcla con rap	Especificaciones técnicas	
Densidad	2,394	2,388	-----	-----
% Vacios	3,01	3,17	3	5
R.b.v.	80,4	79,6	75	82
V.a.m	15,402	15,540	15	
Estabilidad (lb)	2405,3	2884,6	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	13,09	14,12	8	16

Fuente: Elaboración propia

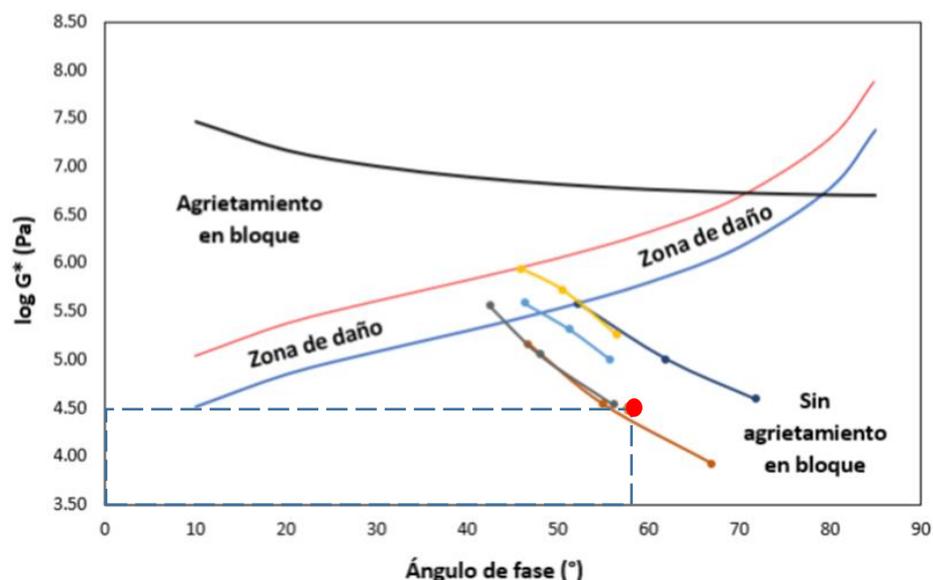
CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En la presente investigación se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logró en base al parámetro de Glover Rowe obtener el porcentaje óptimo de RAP, dando como resultados de resistencia técnicas comparables a las mezclas asfálticas convencionales.
- Los agregados que fueron utilizados para la producción de la mezcla asfáltica son de buena calidad y provienen de un proceso de trituración, por lo que la mayor parte de las partículas son de forma angular y superficie rugosa contribuyendo a aumentar la resistencia al esfuerzo cortante y cumplen con todas las especificaciones técnicas al igual que el cemento asfáltico.
- El parámetro Glover - Rowe utilizado en nuestra investigación fue obtenido en función al ángulo de fase en relación a la zona sin agrietamiento para un valor de 58 c y un parámetro de 4,56 con lo cual se garantiza que el asfalto cumplirá su vida útil sin entrar en la fase de agrietamiento en bloque.



- Se realizó la dosificación y compactación de las briquetas para encontrar el contenido óptimo de RAP cuyo valor obtenido es 15,57 %, para una mezcla asfáltica con incorporación de pavimento reciclado.

- La estabilidad Marshall de la mezcla con RAP, ha incrementado en comparación a la estabilidad obtenida con la mezcla convencional en un 19,93%, de tal manera, que la estabilidad máxima obtenida de la mezcla con RAP se encuentra dentro del rango establecido por las especificaciones técnicas con un valor mayor a 1500 lb.
- El flujo de la mezcla asfáltica con RAP aumenta un 7,87% en relación a la mezcla asfáltica convencional, y de igual manera se encuentran dentro del rango de valores que establecen las especificaciones técnicas.
- Para la mezcla asfáltica convencional se obtienen una densidad de 2,394 gr/cm³ un valor mayor en comparación a las mezclas asfálticas con RAP que disminuye en un 0,25 % ya que su valor es de 2,388 gr/ cm³ ambos valores están dentro de las especificaciones técnicas.
- Los porcentajes de vacíos de la mezcla convencional y de la mezcla con RAP se encuentran cercanos al límite mínimo de las especificaciones técnicas el porcentaje de la mezcla asfáltica convencional es de 3,01% y de la mezcla con RAP tiene un porcentaje de 3,17% por lo tanto se tiene que la mezcla con rap tiene un incremento del 5,32% en sus porcentajes de vacíos en comparación con la mezcla convencional.
- La relación betumen vacíos, tiene como resultados en la mezcla convencional un valor de 80,4% y la mezcla con RAP un valor de 79,6% teniendo una disminución del 0,99 % con respecto a la primera.
- El precio de la mezcla con RAP incrementa un 0,47% debido al transporte del material.
- De acuerdo a los resultados se evidencio que este método es muy amigable con el medio ambiente ya que permite el reciclado de pavimentos envejecidos a costos razonables.

4.2. Recomendaciones

- En lo posterior se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación al reciclado de carpetas asfálticas con el fin de reducir el impacto ambiental generado por la explotación de canteras para la extracción de agregado

naturales y el consumo de otras materias primas y productos químicos diversos para la elaboración de pavimento.

- Para garantizar la calidad de las mezclas asfálticas se deberá realizar la preparación adecuada para evitar daños en la elaboración de las muestras puestas en las briquetas.
- Se recomienda que los agregados a emplearse en las mezclas asfálticas, cumplan con las especificaciones con respecto a la granulometría y al desgaste para garantizar un concreto asfáltico con la mayor densidad, resistencia y durabilidad
- Se deberá tener en cuenta que para la elaboración de las mezclas asfálticas se debe controlar la temperatura de compactación para evitar errores que puedan afectar a los resultados de las propiedades mecánico-resistente.
- Se recomienda que al trabajar con mezcla asfáltica a temperaturas altas se utilice el equipo necesario de seguridad para su manipuleo: guantes de cuero o lona, gafas de seguridad, ropa adecuada de preferencia un overol y mascarillas (tipo barbijo) para evitar la inhalación de gases u otras sustancias.
- Para las mediciones de las propiedades de las mezclas asfálticas obtenidas en el ensayo Marshall las mediciones que efectuaron deberán observar bien la fluencia y la estabilidad, para que no exista un error de paralaje y se evite datos erróneos.
- No sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades.