

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Las vías tienen una función esencial en la actualidad y es la de facilitar el transporte tanto de personas como bienes con total comodidad y seguridad haciendo necesaria la provisión de una red que satisfaga estas necesidades.

Es importante para las regiones contar con carreteras eficientes, es decir que optimicen tiempos de recorrido, reduzcan los riesgos de accidentes y aminoren el desgaste de los vehículos que por ellas circulan.

En presencia de lluvia, lo más común que suceda en las carreteras es la formación de una capa de agua de bajo espesor en la superficie del pavimento. Como consecuencia de esto los usuarios pierden la adherencia neumático - pavimento, además de verse afectados por una notoria disminución de visibilidad, lo que produce una gran cantidad de accidentes de tránsito ante estas condiciones. El primer efecto mencionado trae consigo la pérdida de control del vehículo impidiendo maniobrar en forma segura; mientras que, por otro lado, el agua que proyectan los vehículos de gran tamaño al desplazarse, genera una neblina que obstruye la visibilidad al vehículo de atrás. Para tal efecto se puede pensar en la implementación de mezclas porosas en la capa de rodadura.

Por lo tanto, en condiciones de lluvia se afecta la seguridad y el confort de los usuarios de caminos pavimentados. Para evitar estos problemas se necesita que el agua que cae en la superficie, sea evacuada rápidamente, que es justamente lo que se busca con el uso de las mezclas porosas.

En Bolivia, son pocos los estudios y las aplicaciones sobre los pavimentos porosos, el presente proyecto se desarrolla con el objetivo de evaluar el aporte estructural de mezclas porosas en este caso en pavimentos flexibles. Para tal fin se toma como referencia la normatividad actual vigente de los manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia, donde se analizan comportamiento de la misma, de la siguiente manera: En

cuanto a la capacidad de drenaje se evalúan la permeabilidad y relación de vacíos. En cuanto a la capacidad de resistencia y deformación plástica se evalúan estabilidad, flujo y compresión axial que se desarrollara por el método Marshall y prensa confinada.

El análisis se llevará a cabo mediante una investigación experimental, por medio de la realización de ensayos de laboratorio a los agregados, materiales pétreos y briquetas para dar paso a su evaluación posterior.

Una vez realizada evaluación se podría pensar en la implementación de mezclas porosas, para dar solución a fenómenos importantes que se generan en un pavimento en condiciones de lluvia.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto de aplicación pretende principalmente dar un aporte, que permita el interés en la realización de más investigaciones en cuanto a mezclas porosas, ya que su utilización ha demostrado en experiencias del extranjero un importante número de ventajas sobre las mezclas densas; sin embargo dado los problemas habituales en los pavimentos de nuestro país sobre todo en época de lluvia, como inundaciones, accidentes, causados por el agua acumulada en la superficie del pavimento, y esta a su vez siendo una fuente de deterioro para el pavimento, vale la pena comenzar a incorporar estas mezclas para verificar las bondades que estas mezclas pueden aportar al mejoramiento de nuestros pavimentos.

Para evitar estos problemas se necesita que el agua que cae en la superficie, sea evacuada rápidamente y esto se alcanzará con el uso de las mezclas drenantes o porosas. Ya que algunas de sus propiedades son que permiten que el agua de lluvia caída sobre la calzada se evacúe rápidamente por infiltración, lo que mejora con lluvia el contacto rueda pavimento y reduce las proyecciones de agua de los vehículos, lo que implica un aumento de seguridad. Si bien el aumento de la seguridad es la gran ventaja de estas mezclas, en este proyecto se pretende evaluar el aporte estructural que pueda brindar al pavimento.

Las mezclas drenantes o porosas son mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura que se caracterizan por tener un elevado porcentaje de huecos (entre 18 y 25 %) interconectados entre sí que permiten el paso de agua superficial a través de ella, este elevado porcentaje de huecos se logra mediante el uso de una granulometría especial: un alto porcentaje de áridos gruesos, poco fino, aporte de filler y ligante asfáltico.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación Problemática

Los problemas más frecuentes en tiempos de lluvia que se producen surgen por la acumulación de agua en el pavimento constituyendo una fuente de deterioro para el pavimento, estas aguas superficiales o flujo en superficie y taludes causan socavación provocando fallas en el pavimento. También mediante el punto de vista de la seguridad siendo un peligro para el tránsito, entre estos pueden ser la pérdida de adherencia entre el neumático y el pavimento y la disminución de visibilidad del conductor, ambos provocados como consecuencia de la capa de agua que queda en la superficie. La pérdida de adherencia deja al conductor con poco control de su vehículo, impidiéndole maniobrar en forma segura; si a esto le agregamos el agua que proyectan los vehículos a su paso y la neblina que se forma en la parte de atrás de los vehículos de gran tamaño hacen la conducción en días lluviosos una actividad poco comfortable e insegura.

Sin embargo, los pavimentos tradicionales presentan algunos inconvenientes relacionados con el drenaje y el escurrimiento sobre la capa de rodadura, ocasionando impermeabilizaciones importantes en el espacio urbano, lo cual aumenta los riesgos de inundación y de contaminaciones diferidas a largo plazo de los cuerpos acuáticos receptores (ríos, acuíferos, humedales, etc.).

Esta problemática se observa a lo largo de varios segmentos viales, ocasionando deficiencia en la movilidad y haciendo día a día más notorio el deterioro de la infraestructura vial.

Por lo tanto, en condiciones de lluvia se afecta la seguridad y el confort de los usuarios de caminos pavimentados. Para evitar estos problemas se necesita que el agua que cae en la superficie, sea evacuada rápidamente, que es justamente lo que se busca con el uso de las mezclas porosas.

A pesar de lo anterior, los pavimentos porosos no se han implementado ampliamente en el país y por lo tanto su diseño e instalación no representa una práctica generalizada en la ingeniería boliviana. Una de las posibles razones a lo anterior es que los resultados obtenidos de los diferentes estudios en nuestro medio no se han integrado en

procedimientos de diseño que contemplen consideraciones estructurales, geotécnicas, hidráulicas y ambientales.

1.3.2 Problema

Esto ha llevado a que se realicen innumerables investigaciones en diferentes países proponiendo como una solución, el uso de mezclas asfálticas drenantes o porosas, las cuales proporcionan un mejor drenaje del agua a través de la capa de rodadura y no por sobre la misma, ¿Será que, incorporando las mezclas porosas, se tendrá un mejoramiento en el aporte estructural en el pavimento?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el aporte estructural de las mezclas porosas en pavimentos flexibles, a través de briquetas de mezclas asfálticas combinadas con capa porosa a diferentes porcentajes de vacíos, para el dimensionamiento de pavimentos flexibles.

1.4.2 Objetivos específicos

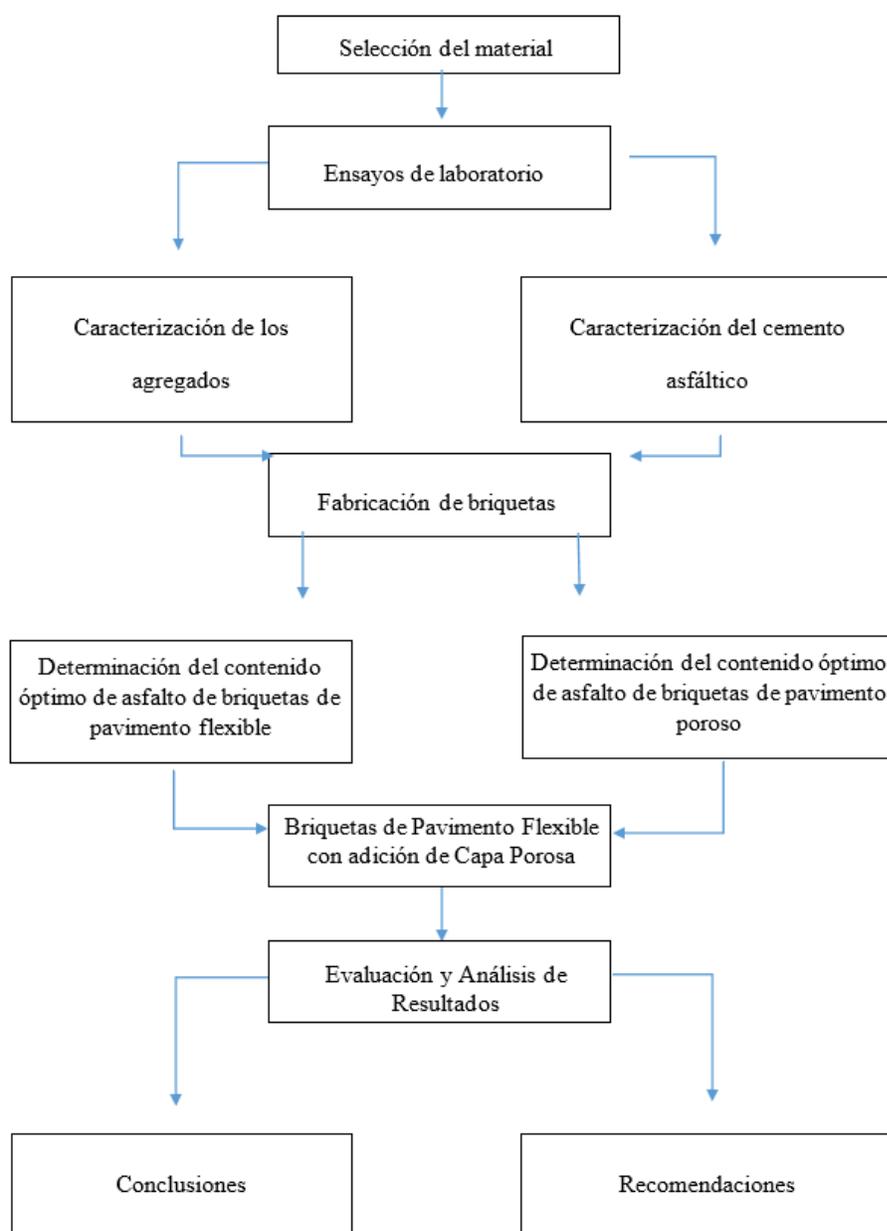
- Analizar los conceptos básicos sobre mezclas porosas en pavimentos
- Realizar ensayos de caracterización a los agregados e identificar si cumplen con las especificaciones técnicas para ser utilizados en la elaboración de mezclas porosas.
- Establecer el contenido óptimo de asfalto y la dosificación apropiada que permita cumplir con las características necesarias para mezclas porosas.
- Comparar las características estructurales del pavimento flexible con y sin una capa de mezcla porosa.
- Analizar los resultados obtenidos con el propósito de evaluar el comportamiento de la mezcla porosa en el aporte estructural.
- Desarrollar las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados de la investigación realizada.

1.5 HIPÓTESIS

Si incorporamos a una mezcla convencional de pavimento, una capa de mezcla porosa para cumplir objetivos hidráulicos, entonces podemos evaluar y analizar el aporte estructural que tiene la capa porosa sobre la mezcla convencional.

1.6 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN

Flujograma de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva



Se realizará la caracterización de los tres tipos de agregados a utilizar, agregado grueso, intermedio y fino. Los ensayos a realizar serán los siguientes: granulometría, peso específico, desgaste mediante la máquina de los Ángeles, caras fracturadas y equivalente de arena.

Caracterización del cemento asfáltico, con los siguientes ensayos: penetración, ductilidad, peso específico, punto de ablandamiento y punto de inflamación.

Dosificar la mezcla asfáltica con la cual, se realizará un cálculo para obtener los porcentajes de cada elemento de la mezcla asfáltica, la cantidad de cemento asfáltico se obtendrá por el ensayo de contenido óptimo (Marshall) para las mezclas convencionales y el ensayo de Cántabro para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para las mezclas porosas.

Para la evaluación del aporte estructural, se utilizará el ensayo de compresión inconfiada, se analizará 8 grupos de muestras de pavimento flexible con adición de mezcla asfáltica porosa a diferentes tipos de porcentaje de cemento asfáltico y vacíos.

Se realizan los ensayos de estabilidad y fluencia tanto a las mezclas asfálticas porosas, convencionales y mezclas convencionales con adición de mezclas asfáltica porosa.

Resultados para los diferentes tipos de muestras, con los agregados y el cemento asfáltico.

Se estudiarán 54 muestras de mezcla asfáltica debidamente preparada y compactada, con las pruebas necesarias de laboratorio con el fin de determinar si cumple con los objetivos del trabajo.

1.7 ALCANCE DEL TRABAJO

Se determinará la evaluación del aporte estructural de mezclas asfálticas porosas en pavimentos flexibles para llegar al objetivo del trabajo, bajo la norma de la ABC del “Manual de ensayos de suelos y materiales-asfaltos V4a” e INVIAS 453-07.

Se desarrolla cada ensayo para la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico;

Las briquetas serán elaboradas con cemento asfáltico de penetración 85-100 procedencia chilena de la empresa PROBISA, para agregados gruesos de 3/4”, 3/8” y agregado fino el banco escogido fue el que dispone la Alcaldía, ubicada en la comunidad de La Pintada

que cumplan las especificaciones de la norma de la ABC e INVIAS, 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, equivalente de arena e índice de caras fracturadas.

La granulometría formada por los agregados será la que se ajuste y adecúe más a los agregados que se tiene, ya sea a la norma ASTM e INVIAS.

Para obtención de contenido óptimo de betumen para las mezclas convencionales se aplicará el método Marshall y para las mezclas porosas el ensayo de Cántabro.

Con la obtención de datos de los diferentes ensayos de laboratorio a realizar, se tabulará los datos y resultados realizando los cálculos correspondientes para aplicar la estadística descriptiva.

De las mezclas asfálticas, se medirá la resistencia, originadas por una carga P en el ensayo de compresión inconfina, también se medirá su estabilidad mediante el ensayo Marshall.

La comparación se dará entre los grupos de mezcla convencional con los grupos con mezcla convencional con adición de mezcla porosa a diferentes porcentajes de vacíos, cada grupo se evaluará su resistencia y estabilidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS

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.

2.1.1 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.

2.1.2 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

2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

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.

Figura 2.1 Tipos de pavimento



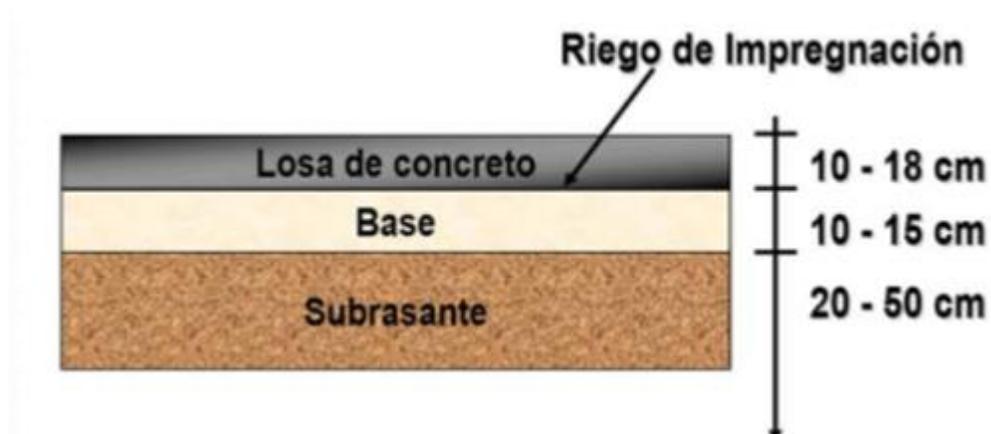
Fuente: <http://essa.com/2017/08/22/pavimentos-porosos/>

2.2.1 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos se integran por una capa (losa) de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante.

La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto.

Figura 2.2 Estructura de un pavimento rígido



Fuente: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf

2.2.2 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 2.3 Estructura de un pavimento flexible



Fuente: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf

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.

2.2.2.1 Duración de un pavimento flexible

La estrategia de diseño seleccionado deberá presentar un mínimo de ocho años antes de que sea obligatoria la superposición de la capa. En general la duración óptima debería estar diseñada para un periodo de 20 años. Cuando mayor sea el módulo que se añada a la capacidad de las capas de pavimento. La carga se distribuye a lo largo de un área más amplia de la sub-base o suelo de apoyo.

2.2.2.2 Características de un pavimento flexible

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

Resistencia estructural

Capacidad de deformación

Durabilidad

Costo

Requerimientos de conservación

Comodidad

2.2.3 Diferencias entre pavimentos de hormigón y asfalto

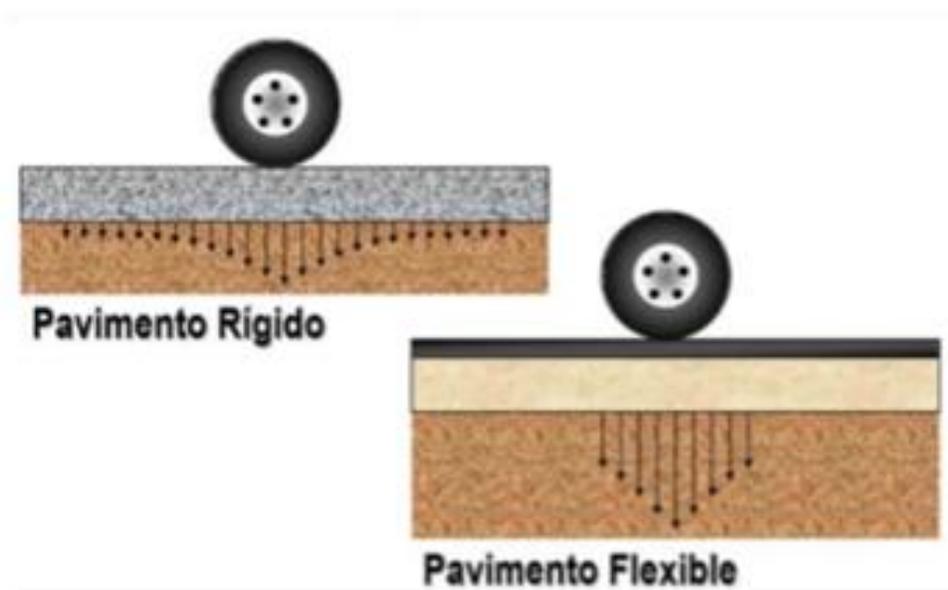
Su principal diferencia es cómo cada uno de ellos transmite las cargas a la subrasante.

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 2.4 Distribución de esfuerzos en un pavimento



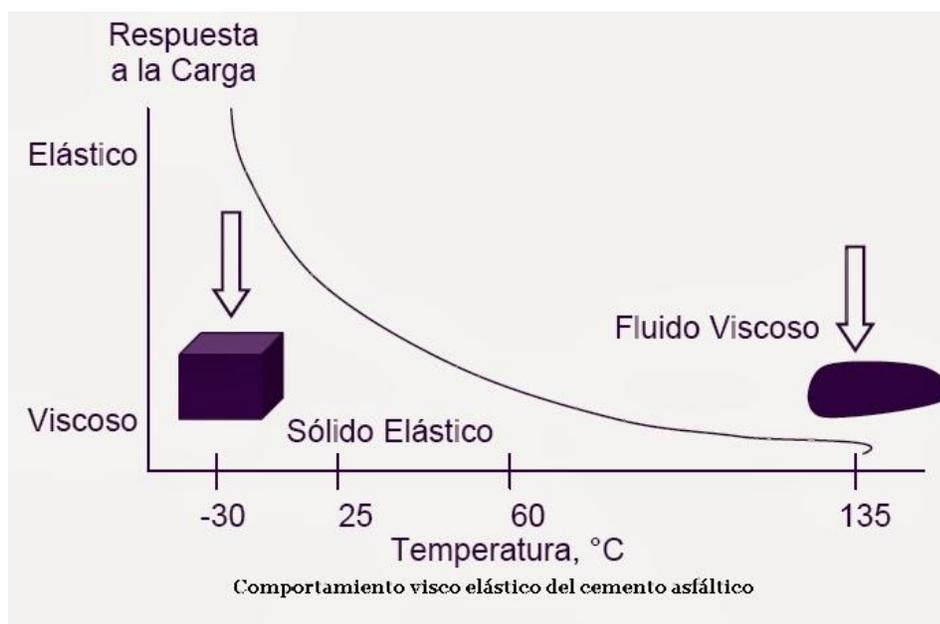
Fuente: https://www.frrro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf

2.3 CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo.

Esté ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías, debido principalmente a que es un material altamente cementante, termoplástico, repelente al agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, que posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento).

Figura 2.5 Comportamiento visco elástico del cemento asfáltico



Fuente: <http://elcementoasfáltico.blogspot.com/2013/11/el-cemento-asfáltico-usos-y-obtencion.html>

2.3.1 Características del cemento asfáltico

- Proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños.
- Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra penetración del agua proveniente de las precipitaciones.

2.3.2 Aplicación y transporte

El cemento asfáltico es comúnmente usado en la construcción de pavimentos para carreteras, autopistas, calles, aeropuertos, áreas de estacionamiento, entre otros; para ello se mezcla con agregados (mezclas en caliente), obteniéndose los denominados concretos asfálticos para pavimentación. Es utilizado también en la industria impermeabilizante y pintura asfáltica, revestimiento de diques, canales y materia prima para las emulsiones asfálticas. El cemento asfáltico a temperatura ambiente, es semisólido y altamente viscoso, por lo que se requiere licuarlo temporalmente por calentamiento, para su manejo durante

la operación de construcción, tales como, bombeo por tubería, transporte de cisternas, mezcla con agregado, Etc.

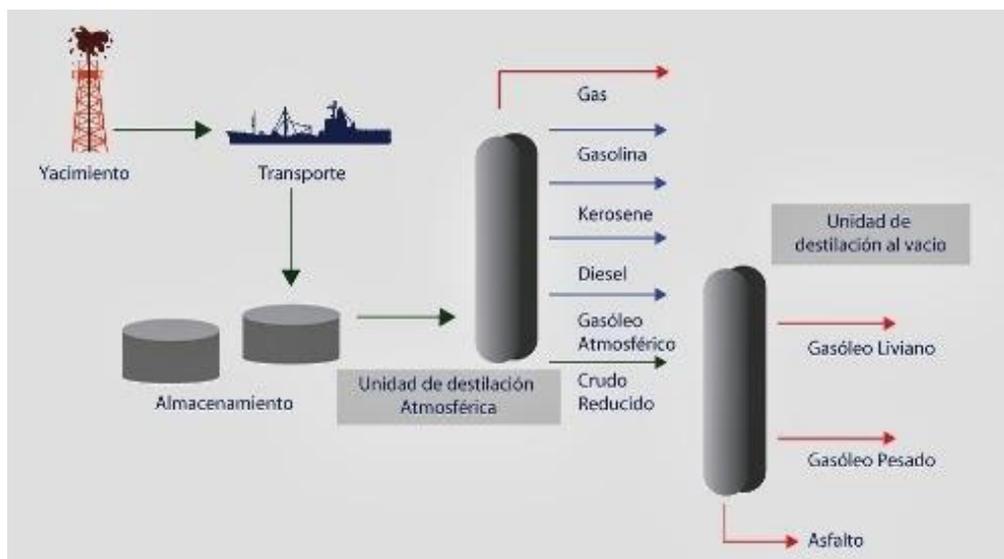
El cemento asfáltico puede ser llevado temporalmente a condición fluida (líquido) durante la operación de construcción de tres maneras:

- Derritiéndolo: después de las operaciones de construcción, el cemento asfáltico líquido y caliente se enfría y retorna de su condición fluida, a su condición normal semisólida.
- Diluyéndolo en solventes de petróleo seleccionados: este proceso se llama recomposición (cutting back). El asfalto obtenido se denomina asfalto diluido (cuttback asphalt). Después de la reconstrucción, el solvente se evapora dejando en el lugar el cemento asfáltico. El uso del asfalto diluido ha declinado debido a la escasez de petróleo y las regulaciones gubernamentales del ambiente.
- Emulsificándolo con agua: como el asfalto y el agua ordinariamente no se mezclan, se puede hacer que lleguen a esta condición mediante la agitación del asfalto con el agua en un molino coloidal y la adición de una pequeña cantidad de agente emulsificante o emulsivo. El producto resultante, denominado emulsión asfáltica, es fluido y está listo para las operaciones de construcción.

2.3.3 Obtención

La obtención del cemento asfáltico se hace a través del petróleo crudo que es extraído de los pozos, éste es separado en una refinería; principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos, de esta manera se obtiene el asfalto producto de la refinación del petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado. El cemento asfáltico es obtenido como residuo o producto residual del petróleo crudo.

Figura 2.6 Obtención del cemento asfáltico



Fuente: <http://elcementoasfáltico.blogspot.com/2013/11/el-cemento-asfáltico-usos-y-obtencion.html>

2.4 DEFINICIÓN DE 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 pesados intensos.

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

2.5 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

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

a) Por fracciones de agregado pétreo empleado.

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Por la temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

- Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

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

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

- Mezclas cerradas o densas: la proporción de vacíos no supera el 6 %.

- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos está entre el 6 y 10 %.

- Mezclas abiertas: la proporción de vacíos supera el 12 %.

- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 18 %.

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

- Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

- e) Por la estructura del agregado pétreo.
- Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
 - Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.
- f) Por la granulometría.
- Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.
 - Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

Tabla 2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
	En frio
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>

2.6 MEZCLA ASFÁLTICA POROSA

Las mezclas porosas son mezclas bituminosas utilizadas en capas de rodadura, que se dosifican con el objetivo principal de conseguir un gran número de vacíos interconectados entre sí (18 a 25 %) que permitan el drenaje del agua superficial y su evacuación hacia las

zonas laterales fuera de la calzada, como solución a los problemas de seguridad vial que se generan en los pavimentos mojados.

Este tipo de mezclas combinan el concepto tradicional de impermeabilizar la superficie de la carretera, trasladando esta función a la capa inferior o a la interfase entre ambas. Para conseguir elevados niveles de vacíos es necesario reducir drásticamente el contenido de mortero y deben ser mezclas con altos porcentajes de agregado grueso (alrededor del 85 %). En mezclas convencionales, hay entre un 35 y un 50 % de agregados de tamaño inferior a 2-2.5 mm, mientras que en mezclas porosas se reduce a un 10-15 %, o incluso a porcentajes menores si se desea conseguir vacíos mayores al 25 %.

2.6.1 Ventajas de las mezclas porosas

Las mezclas porosas ofrecen una gama de ventajas para el usuario en condiciones de lluvia (Muñoz, 2001). Entre ellas se puede mencionar las siguientes:

- **Eliminación de hidropilaje:** Se habla de este fenómeno cuando la capa de agua que se forma entre el neumático y el pavimento rompe el contacto entre ambos, haciendo que el conductor pierda el control de su vehículo. Una rápida evacuación del agua de la superficie del camino (que ofrece la mezcla porosa o drenante), ayuda a impedir este fenómeno.
- **Reducción de proyecciones de agua:** Estas mezclas, como permiten mantener la superficie del pavimento libre de agua cuando está lloviendo, previenen que se produzcan tanto el levantamiento como la pulverización del agua al paso de los vehículos. Esto provoca un mejoramiento destacable en la visibilidad del conductor en condiciones de lluvia.
- **Menor deslumbramiento de luces vehiculares:** Cuando está lloviendo de noche, los conductores se ven enfrentados al deslumbramiento por efecto de luces de vehículos que circulan en sentido contrario, ocasionando reflexión de la luz en los pavimentos mojados tradicionales. El uso de pavimentos de textura rugosa, al liberar el agua de la superficie, reducen este problema permitiendo al conductor ver mejor la vía y la señalización.
- **Reducción de ruido al paso de vehículos:** Las mezclas porosas contribuyen a la absorción de ruidos generados por el roce entre el neumático y el pavimento cuando

el vehículo está en movimiento (tanto en condiciones de lluvia como en seco), ya que el alto porcentaje de huecos de aire interconectados, permiten disipar los ruidos hacia el interior. Gracias a esta reducción de ruidos, las personas que viven cerca de carreteras son las que más se ven favorecidas. Se estima que la reducción media en la sonoridad ambiental es entre 3 a 6 decibeles en comparación a una mezcla normal, apreciándose incluso una diferencia mayor sobre pavimentos húmedos.

2.6.2 Desventajas de las mezclas porosas

En otro sentido, las mezclas porosas presentan las siguientes desventajas con respecto a una mezcla asfáltica convencional (Ruiz, 2000):

- **Colmatación de poros:** Los huecos de las mezclas porosas durante su vida útil tienden a colmatarse por la acumulación de polvo, arena, materia orgánica u otros. Este fenómeno, a pesar de constituir una pérdida en las propiedades porosas de la mezcla (y por ende en la reducción de ruidos, efecto neblina e hidroplaneo), no afecta en el funcionamiento como carpeta de rodadura. En la actualidad, existen máquinas de origen japonés que mediante técnicas de lavado a presión lograrían la limpieza de los poros, anulando temporalmente la colmatación.
- **Mayor costo:** Estas mezclas deben construirse necesariamente con asfaltos modificados y áridos de una calidad superior a la normal, lo cual establece un aumento del costo directo tanto de su construcción como del mantenimiento de esta obra (con respecto a una mezcla asfáltica convencional).
- **Diseño geométrico estricto:** La mezcla porosa, cuando es utilizada como carpeta de rodadura, obligadamente se debe extender sobre una capa que sea impermeable y estructuralmente estable. Adicionalmente esta capa requiere de una geometría adecuada para la evacuación del agua hacia los costados de la pista.
- **Drenaje lateral exigente:** Los huecos de esta mezcla hacen escurrir el agua de la superficie hacia drenes laterales, lo cual implica forzosamente la construcción de ductos y otras obras asociadas a la evacuación de las aguas.

2.6.3 Métodos empleados en el diseño de mezclas asfálticas porosas

Debido a las características propias de estas mezclas, la necesidad de desarrollar ensayos que ayuden a comprender de una mejor forma su comportamiento y evaluación es

evidente; ya que, debido a la particularidad de su estructura interna supone que la energía de compactación necesaria para lograr la compacidad en obra es menor que en las mezclas convencionales, por lo que es necesario evaluar para que la energía de compactación se alcanza la máxima densidad en la metodología Marshall, no obstante, se debe tener presente que para el caso de las mezclas porosas las propiedades requeridas nada tienen que ver con su estabilidad, son otras propiedades y características las que importan siempre y cuando se adapten a los fines buscados y tomando en cuenta las solicitudes a las que la mezcla estará sometida

Algunas de las metodologías normalmente utilizadas son:

- **CÁNTABRO (Origen ESPAÑA).**

El método parte del estudio de la cohesión en la mezcla, la cual se realiza en base a exigencias de estudios a sus agregados y asfaltos disponibles. Se fabrican numerosos especímenes para analizarlos en laboratorio, determinando la pérdida por desgaste de Los Ángeles sin la carga de bolas de acero, se evalúan de antemano las características fundamentales en la mezcla, como son la macro textura, la cantidad de vacíos y la fricción, parámetros iniciales de diseño

- **AUSTRALIANA (Open Graded Asphalt Design Guide, originada en la Australian Asphalt Pavement Association).**

Se basa en una “Guía de Diseño”, la cual hace la composición de ensayos y determinaciones características, mediante “Cartas de Diseño”. Con esto es posible establecer qué porcentaje de asfalto es el necesario en el diseño de la mezcla de obra, respetando valores de ensayos tales como:

Cántabro seco, Cántabro Húmedo, Vacíos, Esguerramiento.

Tipo I, TMDA (Transito Medio Diario Anual) < 500 ($N < 5 \times 10$)

Tipo II, TMDA (Transito Medio Diario Anual) > 500 ($N > 5 \times 10$)

El Tipo I, provee una modesta performance, el Tipo II está destinado a la más alta performance, con elevado contenido de asfalto, así como el uso de asfalto modificado. La Guía de Diseño consta de: Selección del TMN; selección de la granulometría y del asfalto de prueba. Previamente a la determinación del contenido de asfalto de la mezcla, debe

determinarse la absorción de asfalto por parte del agregado pétreo. La metodología se refiere únicamente al asfalto efectivo. Existe un mínimo contenido de asfalto referido al TMN y vinculado al recubrimiento, con una película que asegure cohesión y durabilidad. El máximo se relaciona a la posibilidad de escurrimiento de asfalto durante el transporte.

- **RP (Origen CHILE).**

Esta metodología fue desarrollada en Chile, en el laboratorio Nacional de Vialidad, MOP, por los Ing. Héctor Rioja V. y Gabriel Palma P. la metodología consiste en la medición del esfuerzo a penetración, a temperatura y velocidad controlada, que presentan probetas de Mezcla asfáltica abierta, fabricadas de acuerdo con la metodología Marshall. Utilizando en este caso 45 golpes por cara y distintos contenidos de asfalto, considerando que la mezcla óptima es aquella que presenta el valor máximo de esfuerzo a la penetración.

- **TRACCIÓN INDIRECTA (Origen BRASIL).**

Esta es una metodología sencilla que se basa en obtener un esfuerzo de tracción por compresión diametral. El conocimiento de los valores de tracción indirecta en laboratorio representa una herramienta más al conocimiento, puesto que el único control que se le realiza a una capa terminada es la determinación de su densidad y se compara con la obtenida en compactación Marshall.

En esta investigación, la metodología Cántabro será la que se utilizará para su desarrollo.

2.6.4 Metodología para la caracterización de asfaltos mediante el empleo del ensayo Cántabro.

En el año 1979, en el laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, los Ingenieros Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer iniciaron los estudios encaminados a la caracterización de las mezclas asfálticas de granulometría abierta para su empleo en capas de rodadura, especialmente para establecer una metodología de dosificación en laboratorio para mezclas porosas.

En un inicio, no se contaba con procedimientos que indicaran cada uno de los pasos a seguir en el diseño y evaluación de estas mezclas en laboratorio, lo que significó uno de los tantos problemas al que había que dar solución, otros problemas fueron la falta de

métodos de ensayos que proporcionan información del comportamiento mecánico de la mezcla. Era evidente la marcada diferencia de los materiales empleados en la hechura de estas mezclas para la construcción de carreteras, en comparación con las mezclas tradicionales (densas) en su estabilidad y los ensayos han sido desarrollados con el fin de evaluar particularmente esta propiedad.

Paralelamente es lo que ocurre con la mayoría de los métodos de dosificación y proyecto de mezclas, basados en la obtención de la estabilidad máxima.

Finalmente se llegaron a desarrollar dos ensayos para la caracterización de las mezclas porosas:

1. Ensayo cántabro, para medir la pérdida por desgaste utilizando la máquina Los Ángeles.
2. Permeámetro de carga variable LCS, para poder verificar los porcentajes de vacíos en la mezcla, ya sea en laboratorio o en campo. La realización del ensayo cántabro puede realizarse tanto en estado seco como en húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que facilita el estudio y dosificación de estas mezclas.

Se supone entonces que se obtiene menores pérdidas con la realización del ensayo, cuando se tienen una mayor calidad y un porcentaje acorde de los componentes que proporcionan la cohesión en la mezcla.

2.6.4.1 Metodología

En esa metodología Cántabro se contemplan los pasos siguientes:

- Elección de la curva granulométrica: esto dependerá de la norma del país o región en base a la cual se esté trabajando; en el caso de no poseerse normativa propia alguna, tal y como sucede en nuestro país, que carecemos de valores propios de porcentajes requeridos en cada una de las mallas para este tipo de mezclas.
- Elección de los porcentajes de asfalto para el diseño: serán esos porcentajes a ser adicionados a los agregados para la fabricación de la mezcla, con los cuales serán elaboradas las probetas de ensayo; y con las que realizara el análisis del comportamiento de la mezcla.

Se realizan los ensayos especificados (cántabro seco y cántabro húmedo) con el fin de determinar para que porcentaje de asfalto adicionado a la mezcla se cumple con las exigencias establecidas, realizándose, de ser necesario las correcciones en el diseño que garanticen el cumplimiento de dichas especificaciones.

Para la determinación de la densidad aparente de cada probeta, el volumen se obtiene de forma geométrica.

2.6.4.2 Propósito de la metodología

El propósito del método cántabro es determinar el contenido óptimo de asfalto para la combinación seleccionada de agregados, se basa fundamentalmente en la realización del ensayo Cántabro tanto en estado seco como húmedo y, se apoya en los resultados de ensayos complementarios con el fin de asegurar las características que se buscan en la mezcla porosa.

2.6.4.3 Descripción general

El ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se ha diseñado y objeto de estudio, una probeta de tipo Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de Los Ángeles (sin bolas) a una temperatura dada, después de un número determinado de vueltas se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo masa, debido al desgaste de los áridos situados en la superficie. Esta masa es registrada, como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

Los dos estados en que se puede realizar el ensayo son:

2.6.4.4 Cántabro seco

La Norma LT-352/86 contiene la descripción del procedimiento que debe seguirse, empleando la máquina de Los Ángeles. El procedimiento descrito puede ser empleado tanto en el proyecto de mezclas realizadas en el laboratorio como para el control que sea llevado en obra. El campo de aplicación hace referencia a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta cuyo tamaño es inferior a 25 mm. El ensayo es realizado a una temperatura de 25 °C, lo cual permite valorar indirectamente la cohesión y trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito.

2.6.4.5 Cántabro húmedo

La norma NLT-362/92 contiene la descripción del procedimiento que debe seguirse, empleando la máquina de Los Ángeles. La realización del ensayo en estado húmedo permite establecer una valoración de la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en la mezcla y el efecto producido por el empleo de asfaltos modificados en la mejora de esa propiedad.

Si al realizarse el cántabro húmedo de mezclas se obtienen pérdidas altas o un índice de aumento de las perdidas respecto al ensayo de cántabro seco también alto se estaría, ante un indicativo de una falta de resistencia de la mezcla a la acción del agua. Aspecto no deseable en las mezclas porosas.

2.6.5 Especificaciones de la metodología

Las recomendaciones más usuales para mezclas porosas para capas de rodadura establecen los siguientes valores máximos y mínimos de exigencias:

- % Huecos > 20 %
- Pérdida al Cántabro seco (25 °C) < 25 %
- Pérdida al Cántabro tras inmersión (24 hrs. 60 °C) < 35 % oscilan entre 3 % y 5 %, puesto se espera el contenido óptimo se encuentre en dicho rango.

En los países que poseen normativa referente a mezclas porosas los rangos granulométricos varían, sin embargo, suele conservarse el TMN de $\frac{1}{2}$.

En posteriores capítulos se analizarán con más detalle los parámetros que se utilizarán para el diseño de la mezcla, los cuales han sido seleccionados de normativas extranjeras debido a la falta de documentación respecto a este tema; normativas como la colombiana, del Instituto Nacional de Vías (conocidas como INVIAS), la cual servirá de base al estudio; las normas ASTM y ASSHTO para el testeo de los componentes de la mezcla y evaluación de las características propias de esta, que puedan ser evaluadas mediante estas últimas dos normativas, como es el caso de los vacíos presentes en la mezcla, por ejemplo.

2.6.6 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño

El diseño de la mezcla porosa según la normativa INVIAS establece que, el contenido óptimo de asfalto en la mezcla deberá ser elegido de forma tal que sean cumplidos los siguientes criterios:

- % vacíos (Norma AASHTO T269 – 97 (2003)): $20 \% < \text{vacíos} < 25 \%$
- Permeabilidad: 100 ml atraviesan una probeta en un tiempo no mayor a 15 segundos.
- Pérdida al cántabro seco (25 °C) (Norma NLT 352/86): $< 25 \%$
- Pérdida al cántabro tras inmersión (24 hrs, 60 °C) (Norma NLT 352/86): $< 40 \%$

2.6.7 Procedimiento de diseño de la fórmula de trabajo de la mezcla porosa

La normativa con la cual será analizada la mezcla porosa para la presente investigación, será la proporcionada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia que a su vez está basada en la norma española.

2.6.7.1 Especificaciones técnicas de los agregados de mezclas porosas

En la normativa colombiana "INVIAS", en el aparato de mezclas porosas, se muestra específicamente las características que deben cumplir los agregados a utilizar en la elaboración de la mezcla, de acuerdo a estudios realizados y a la experiencia de este país en la utilización de este tipo de mezclas asfálticas, dichas características se mostraran a continuación.

Los agregados pétreos a emplear deben ser naturales o artificiales, y deben provenir de rocas sanas y no deben ser susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que pueden darse en la zona de empleo. Tampoco deben dar origen, con el agua, a disoluciones que causan daños a estructuras u otras capas del paquete estructural o contaminar corrientes de agua.

2.6.7.2 Agregado grueso

Se define como agregado grueso al agregado que es retenido por el tamiz N ° 4 según las ASTM E- 11.

En la siguiente tabla se presentan los requisitos que este agregado debe cumplir para ser usado en mezclas porosas, según las normas publicadas en Argentina, Chile y Colombia.

Tabla 2.2 Requisitos del agregado grueso

Ensayo	Norma	Exigencia		
		Chilena	Colombiana	Argentina
Partículas trituradas en dos caras	ASTM D-5821	> 98 %	> 70 %	> 75 %
Índice de lajas	AASHTO C-142	< 25 %	-----	< 25 %
Coefficiente de desgaste de los Ángeles	ASTM C-131	< 20 %	< 25 %	< 25 %
Índice de plasticidad	ASTM D-4318	N.P	N.P	N.P

Fuente: Art. 453-07 Mezcla Porosa del Instituto Nacional de Vías Colombia

2.6.7.3 Agregado fino

El agregado fino es aquel que pasa por la malla N° 4 y queda retenido en la malla N° 4 y queda retenido en la malla N° 200 según la norma ASTM E – 11 El agregado fino puede proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena, sin embargo, se establece la siguiente condición:

La proporción de arena natural no puede exceder del 15 % de la masa total del agregado combinado, cuando el tránsito sea 5.0×10^5 ejes equivalentes a 80 kn en el carril de diseño, ni exceder de 25 % para tránsitos de menor intensidad.

En todo caso la proporción de agregado fino no triturado no puede exceder la del agregado fino triturado empleado en la mezcla.

2.6.7.4 Relleno mineral (filler)

Se denomina filler aquella fracción que pasa por la malla N ° 200 según la norma ASTM E-11. Debe proceder de los agregados pétreos de productos comerciales como cemento hidráulico y cal hidratada. Debe estar libre de partículas de arcilla y de materia orgánica.

El filler total deberá estar formado por un mínimo de 50 % de aprobación y el porcentaje restante proveniente de los agregados grueso y fino.

Si se utilizan los materiales comerciales como filler de aporte en este tipo de mezclas, se recomienda no superar el valor de la misma al 3 % del peso total de los agregados pétreos.

El conjunto de agregado grueso, agregado fino y filler deberá ajustarse a la gradación indicada en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 Franja granulométrica para la mezcla porosa

Tamiz ASTM	Tamaño (mm)	MD-1	
		Esp. inf	Esp. sup
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	70	100
3/8"	9.50	50	75
N° 4	4.75	15	32
N° 10	2.00	9	20
N° 40	0.425	5	12
N° 200	0.075	3	7

Fuente: Artículo 453-13, normativa INVIAS (Mezcla Porosa)

Realización del ensayo Cántabro:

Con la composición granulométrica obtenida en el laboratorio basada en la especificación de la tabla, se preparan un mínimo de cuatro briquetas para cada contenido de asfalto a ser ensayado (en este caso se preparan seis briquetas por cada contenido de asfalto)

Las distintas fracciones de áridos que componen la mezcla se secan en horno hasta obtener masa constante a una temperatura de 105 a 110 °C.

El asfalto a ser utilizado debe ser calentado hasta una temperatura tal que su viscosidad permita una buena envoltura de los agregados sin que se produzca escurrimiento.

Se preparan las distintas fracciones de agregados que conforman la mezcla, la calidad total de los agregados para cada probeta a fabricar será 1000 g, el resto del proceso sigue el mismo para el procedimiento Marshall.

En la compactación de la mezcla se utiliza el equipo y procedimiento de compactación Marshall. Sin embargo, se tiene una diferencia en la energía de compactación, puesto que será de 50 golpes por cara.

Una vez desmoldadas las probetas, se determinan su densidad y contenido de vacíos a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad relativa de los materiales.

En el cántabro seco, una a una las probetas se introducen en el tambor de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a una velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 3 rpm), durante 300 vueltas, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15 y 30 °C, con una tonelada máxima de ± 1 °C.

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada briqueta ensayada.

En el cántabro húmedo las probetas deberán introducirse en un baño maría por 24 horas a una temperatura de ± 60 °C, luego se dejan secar durante 24 horas a una temperatura de 25 °C y finalmente se les practica el mismo proceso que en el Cántabro seco a fin de conocer el valor de pérdida por desgaste de cada una de las briquetas.

- El ensayo cántabro debe realizarse tanto en estado seco como húmedo.
- Se recomienda realizar prueba de permeabilidad con el fin de asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados.
- El contenido de asfalto en la briqueta que cumpla con las especificaciones con que se esté trabajando será el seleccionado como el contenido óptimo de asfalto para la granulometría seleccionada.

2.7 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:

2.7.1 Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422; AASHTO T88)

a) Objeto

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

b) 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 2.4 Serie de tamices

Tamaño nominal de abertura	
(mm)	ASTM
75	(3")
63	(2 ½")
50	(2")
37,5	(1 ½")
25	(1")
19	(¾")
9,5	(3/8")
4,75	(N° 4)
2	(N° 10)
0,425	(N° 40)
0,075	(N° 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.

Horno

Mortero

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

c) 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 ligeramente superior a la Tabla 2.8, 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 2.5 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

d) Procedimiento

1. Pesarse 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 (3/4"), 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 Mi, 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.

e) 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:

M_i = 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.

$$R_i = C * \frac{M_i}{C(C + D)} * 100(\%)$$

Calcular el porcentaje retenido en el tamiz i del material bajo 4.75 mm, de acuerdo a la siguiente ecuación.

Donde:

M_i = 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.

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

a) Objeto

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.

b) 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.

c) 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.

d) 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.

e) 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.

f) 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.

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

Objeto

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 d hormigones y obras asfálticas.

a) 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.

b) 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.

c) 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 (M_m).
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 (m_s).
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 (M_a).

d) Cálculos

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

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

Densidad real del árido seco (ρ_{RS})

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

Densidad neta (ρ_N)

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

Absorción de agua (α)

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

Donde:

ρ = Densidad (Kg/m³)

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:

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

Absorción de agua de la integral:

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

Donde:

ρ = Densidad (real o neta) de la integral (kg/m^3)

ρ_r = Densidad (real o neta) de la fracción retenida (kg/m^3)

ρ_p = Densidad (real o neta) de la fracción que pasa (kg/m^3)

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/m^3)

α_r = Absorción de agua de la fracción retenida (kg/m^3)

α_p = Absorción de agua de la fracción que pasa (kg/m^3)

Expresar las densidades en kg/m^3 , aproximando a 1 kg/m^3 , y la absorción en porcentaje, aproximando a la centésima.

e) 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/m^3 en la determinación de densidades.

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

2.7.4 Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)

a) Objeto

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).

b) Equipo y materiales

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

c) 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.

d) 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.

e) 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 (Nt) 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 (Na) aproximando al milímetro.

f) Cálculos

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

$$EA(\%) = \left(\frac{Na}{Nt} \right) * 100$$

Donde:

EA =Equivalente de arena (%)

N_a = Nivel superior de la arena (mm)

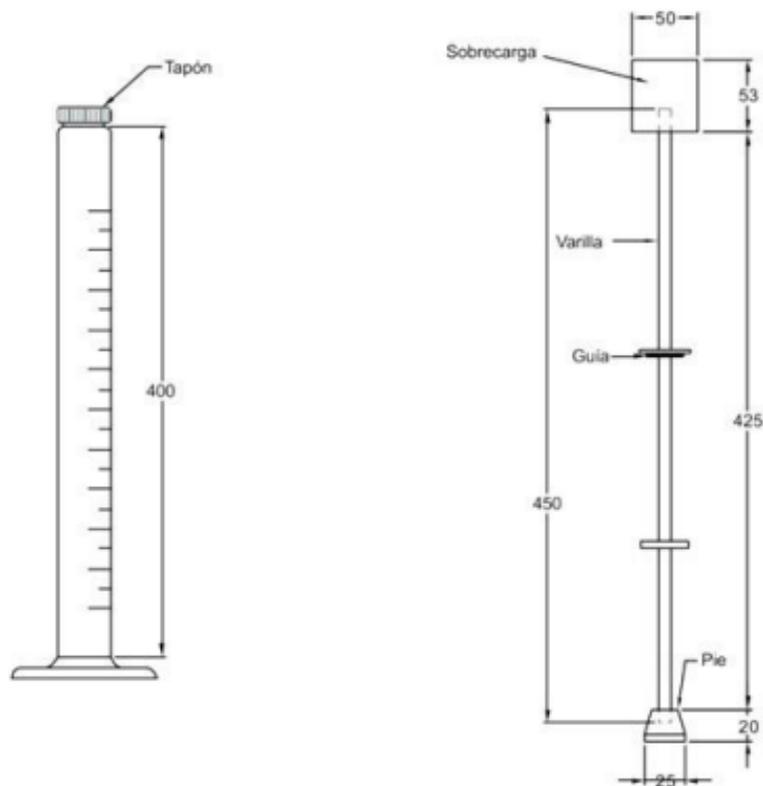
N_t = Nivel superior de la arcilla (mm)

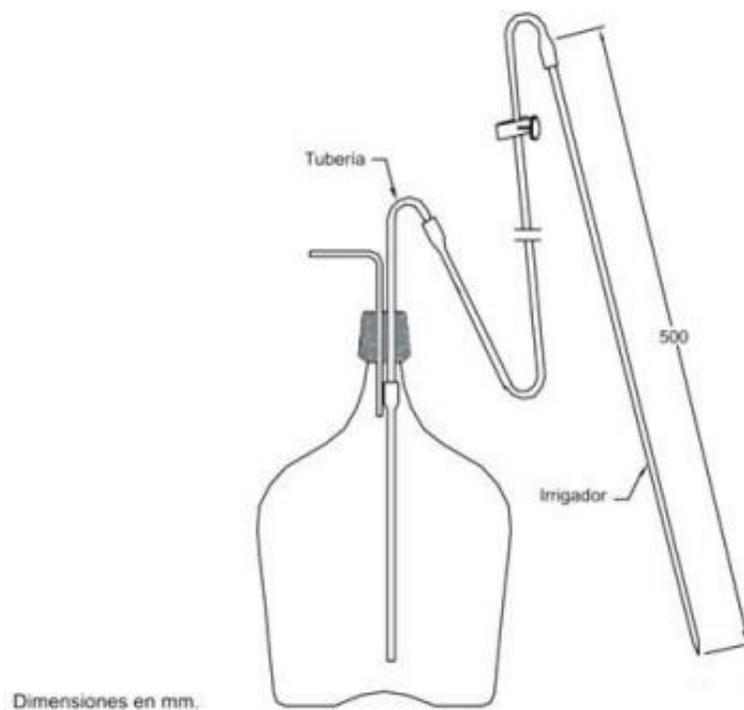
Calcular el equivalente de arena de cada muestra como el promedio aritmético de los resultados de dos ensayos paralelos, con aproximación al 1 % superior.

g) 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 2.7 Probeta graduada, Sifón





Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

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

a) Objeto

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.

b) 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

Cuartheador

Un cuartheador 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.

c) Preparación de la muestra

Seque la muestra lo suficiente para obtener una separación limpia de agregado fino y grueso en la operación de cribado. Crible 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 2.6 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

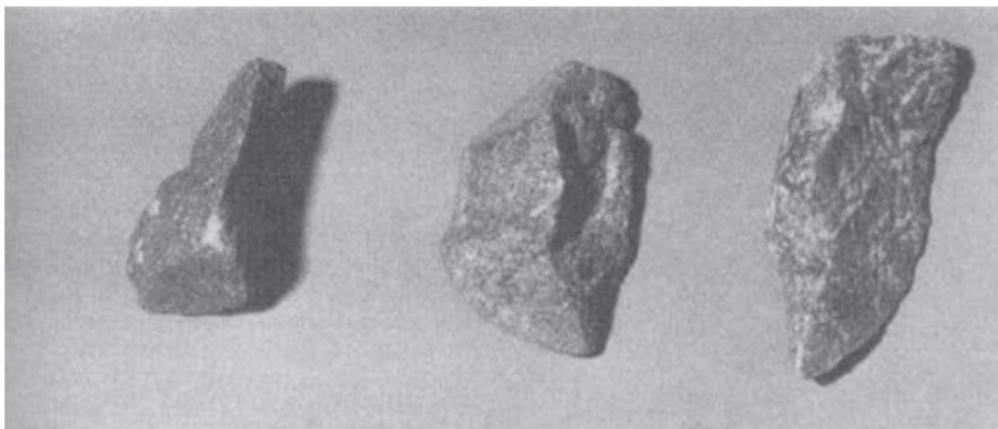
Para agregado con tamaño nominal máximo de 19.0 mm (3/4”) o mayor, donde el contenido de partículas fracturadas se va a determinar para el material retenido en la malla de 4.75 mm (N° 4) o una malla más pequeña, la muestra de prueba puede separarse sobre la malla de 9.5 mm (3/8”). La porción que pasa 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.

d) 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 2.8 Partículas fracturadas (orillas angulosas y superficie rugosa)



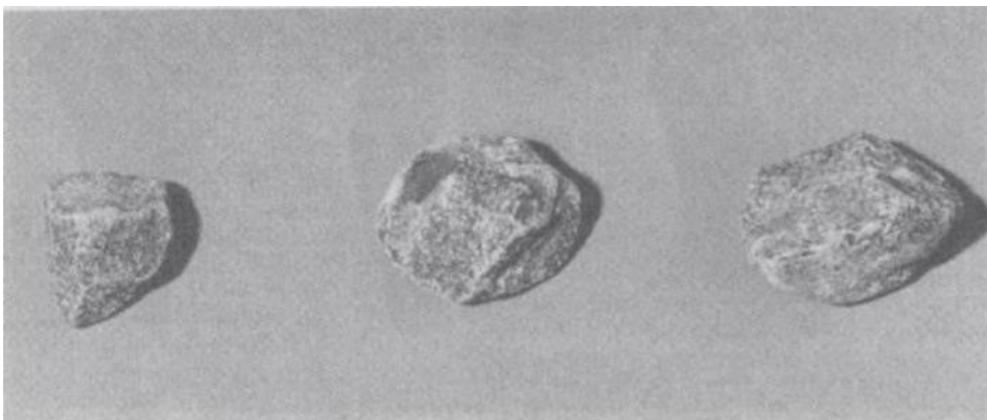
Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 2.9 Partícula fracturada (orillas angulosas, superficie lisa)



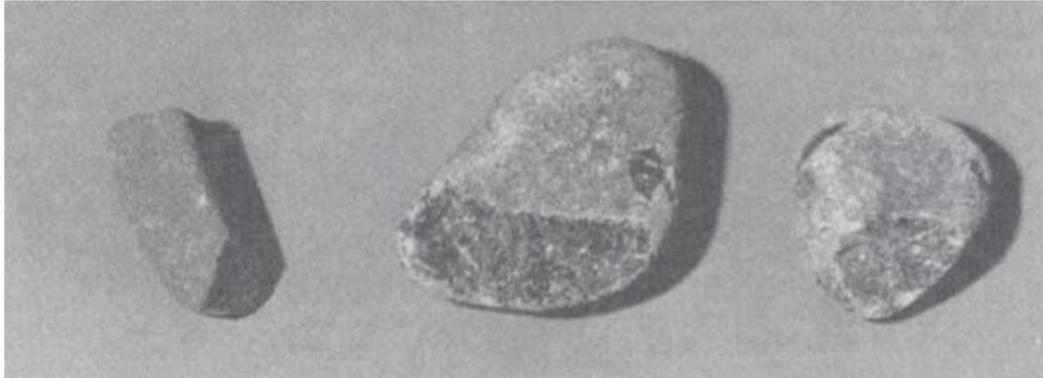
Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 2.10 Partícula fracturada (orillas redondeadas, superficie rugosa)



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

Figura 2.11 Partícula fracturada (centro) acompañada por dos partículas no fracturadas



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

e) 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.

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

a) Objeto

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.

b) 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

c) 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 2.10 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.

d) 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.
3. Separar la carga abrasiva.

4. Efectuar un primer tamizado en un tamiz de 2.36 mm o superior, luego en un tamiz de 1.7 mm.
5. 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 (mf), aproximando a 1 g.

e) 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)

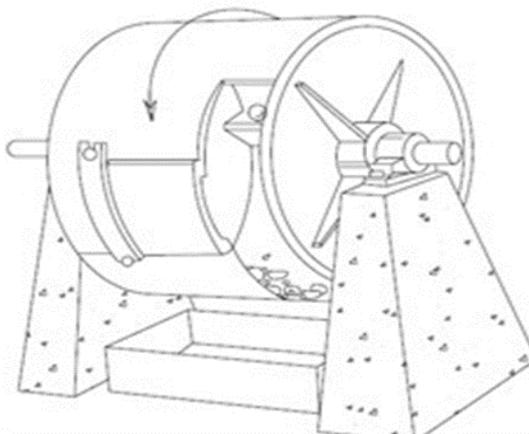
m_f = Masa final de la muestra (g)

Tabla 2.7 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 2.12 Máquina de los Ángeles



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.8 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BETUMEN

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

a) Objeto

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.

b) 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 ± 0.05 g. El peso total de la aguja y el vástago será de 50.0 ± 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 ± 0.05 g y 100.0 ± 0.05 g.

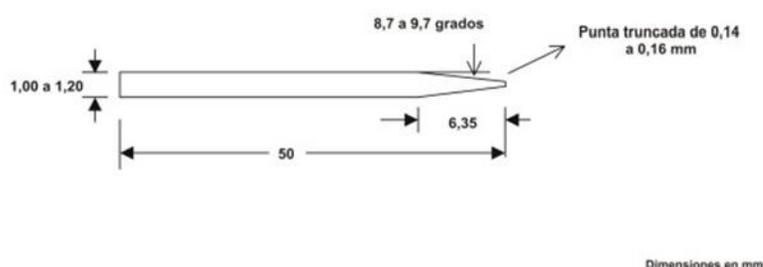
La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

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 ± 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 2.13 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 ± 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 ± 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.

c) 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 2.8 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

d) 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.

e) 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 ± 0.1 g.
2. 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.
3. 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.

f) 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 2.9 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

f) Informe

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 2.10 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

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

a) Objetivo

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.

b) 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.

c) 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.

d) Procedimiento

1. Llenar la copa a una temperatura conveniente, no excediendo los 100 °C por encima de los esperados 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 estén 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 ángulo 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 1s 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.
- e) 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 2.11 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

- f) 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.

- g) 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.

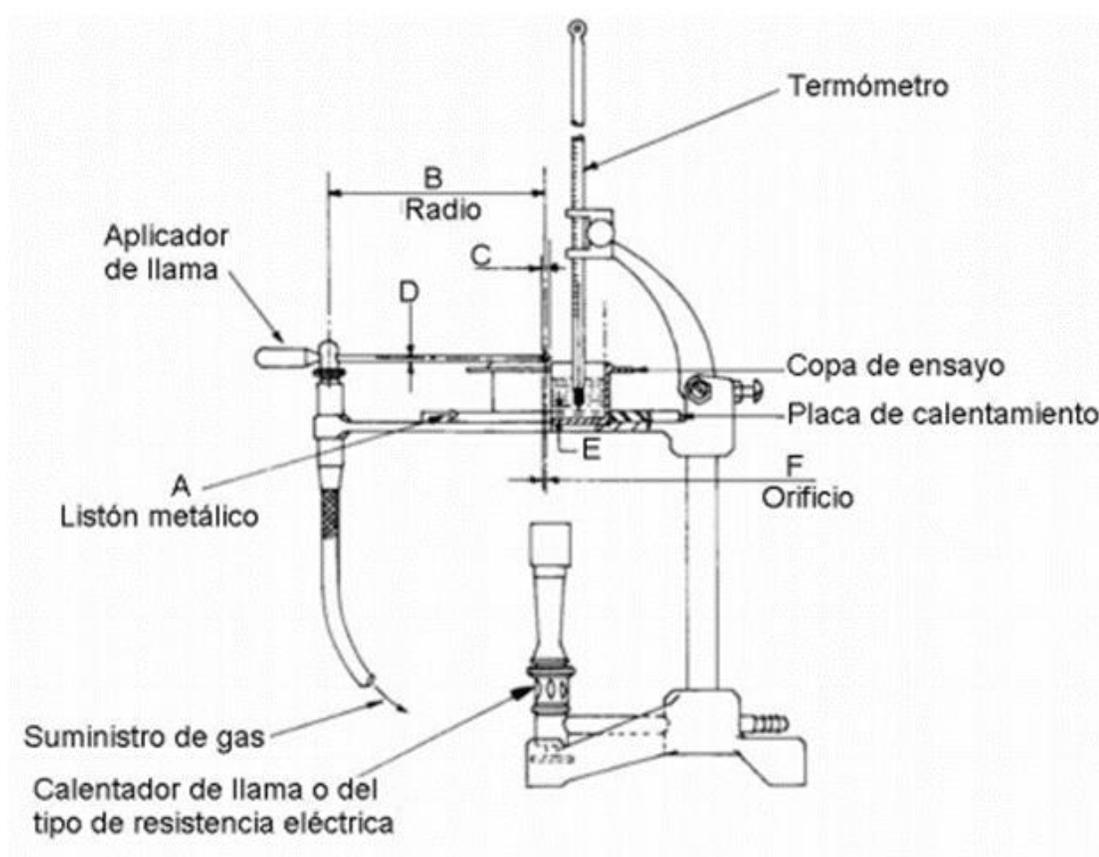
Reproducibilidad

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.

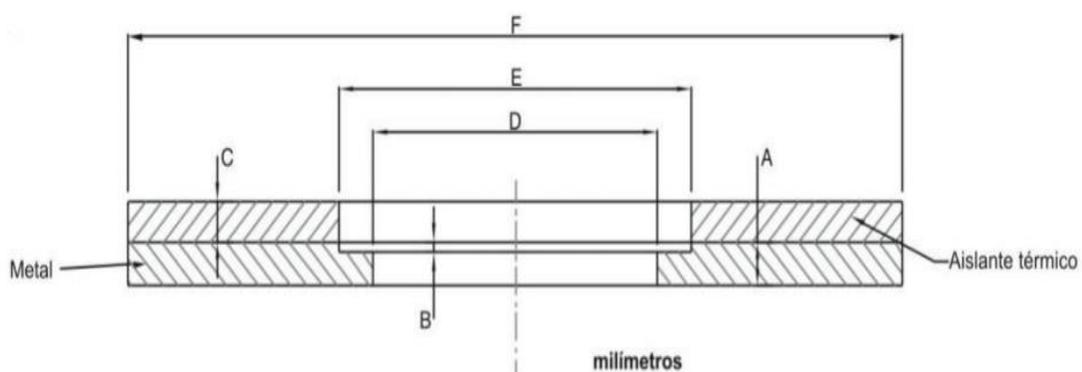
Figura 2.14 Copa abierta de Cleveland



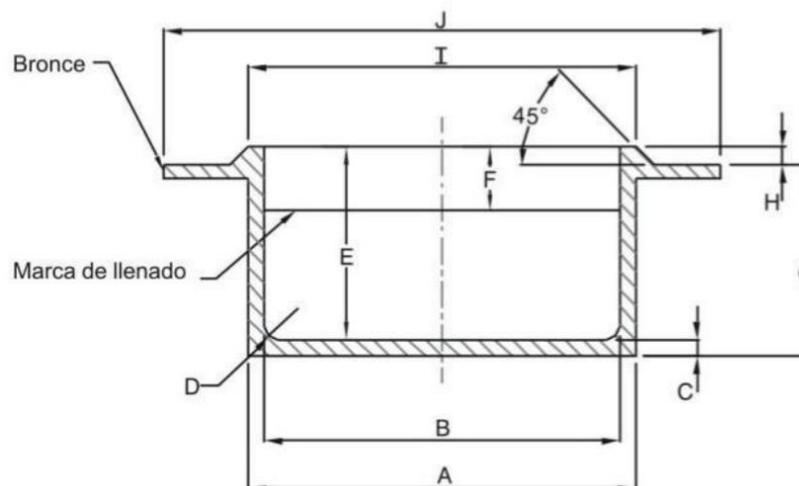
Diámetro	Milímetros		Pulgadas	
	Min	Max	Min	Max
A Diámetro	3.8	5.4	0.2	0.2
B Radio	152	nominal	6	nominal
C Diámetro	1.6	5	0.1	0.2
D	5		0.2	
E	6.4 aprox.		0.3 aprox.	
F Diámetro	0.8	nominal	0.03	nominal

Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

Figura 2.15 Placa de calentamiento, Copa abierta de Cleveland



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



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

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

a) Objeto

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 ± 0.5 °C y a una velocidad de 5 cm/min ± 5 %. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

b) 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 ± 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.

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 ± 0.5 °C.

d) Informe

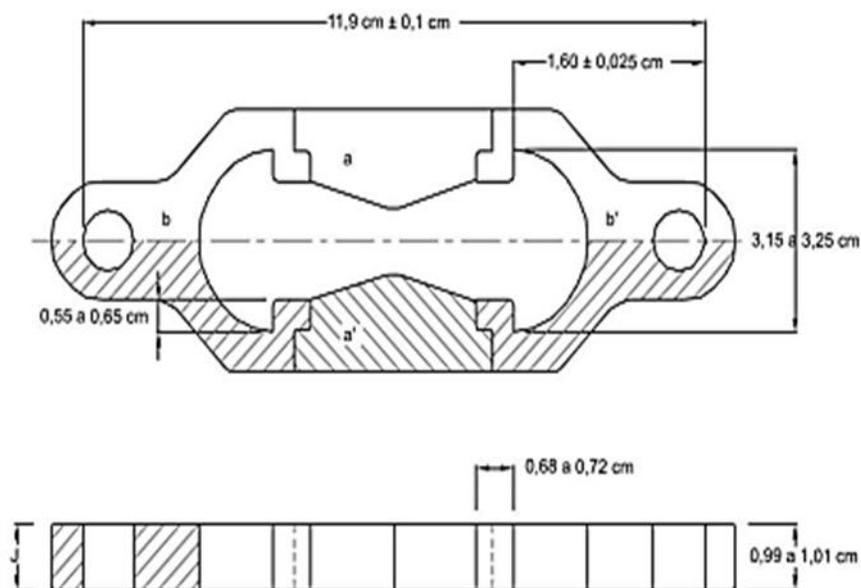
Un ensayo normal es aquel en el cual el material entre dos clips se ha estirado hasta el punto de convertirse en un hilo y la ruptura ocurre en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal. Informar el promedio de tres ensayos normales como la ductilidad de la muestra, indicando 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 2.16 Molde para ductilidad de muestra de ensayo



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

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

a) Objeto

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

b) Equipos y materiales

Picnómetro de 24 a 30 ml de capacidad (ver Figura 2.17).

Balanza analítica

Baño termostático capaz de mantener la temperatura requerida en un rango ± 0.1 °C.

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

Agua destilada

c) 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

d) 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).

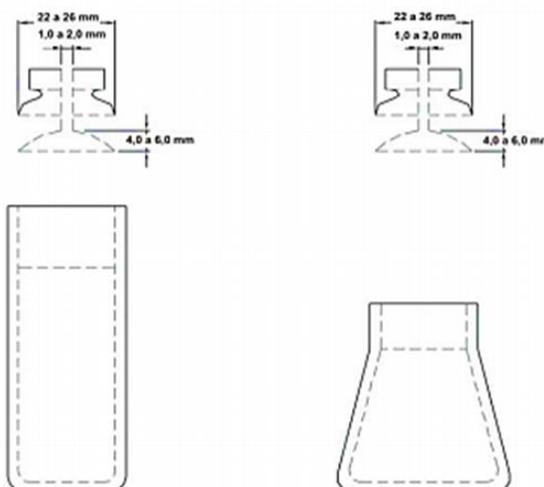
e) Informe

El informe debe incluir:

La densidad, aproximada a 1 (kg/m³)

La temperatura de ensayo.

Figura 2.17 Picnómetros



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia

2.9 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL

2.9.1 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.

2.9.2 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 semi-cilindros, 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 $60^{\circ} \pm 1$ °C (140 ± 1.8 °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

2.9.3 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 2.12 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) (lb)	3336		5338		8006	
	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 2.13 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-22

2.9.4 Criterios de diseño normalizados

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 2.14 Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano que clase textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	El objeto es conocer la calidad de material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando sulfato de sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosférica desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados de la para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando estos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor a 0.5%.
Equivalente de arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de partículas	ASTM D692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que se debe evitar partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C 127 ASTM C 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de la partícula constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con las condiciones secas cuando se evalúa el comportamiento del agregado en el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso unitario y vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Proctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: Instituto de asfalto

Tabla 2.15 Ensayos de laboratorio normalizados para asfaltos

Ensayo de laboratorio para asfaltos	Norma	Propósito
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en decimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicaran consistencia suave.
Punto de inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura específica.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzara un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en tricloroetileno	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso específico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra, pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son: <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezcla en caliente.

Fuente: Instituto de asfalto

2.9.5 Requisitos del agregado pétreo

Tabla 2.16 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: Construcción de pavimentos. Serie de manuales No.22 (MS-22)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS EMPÍRICO 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, pero 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 la Alcaldía, ubicada en la comunidad de La Pintada, 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.

Figura 3.1 Chancadora para la provisión de material



3.1.2 Cemento asfáltico

El Betún como ligante asfáltico C.A. 85-100 de procedencia chilena de la empresa PROBISA, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos

analizados en laboratorio de suelos, hormigones y asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

3.2.1 Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422; AASHTO T88)

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.

Figura 3.2 Juego de tamices



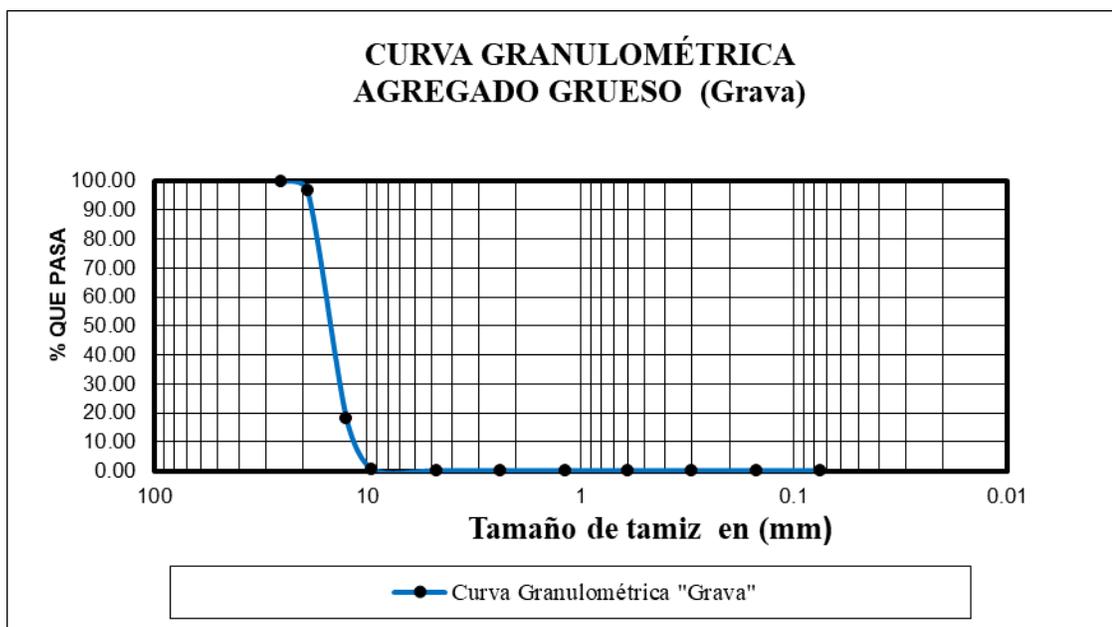
RESULTADOS

GRANULOMETRÍA - AGREGADO GRUESO (Grava)

Tabla 3.1 Resultado de granulometría del agregado grueso

Tamices	Tamaño(mm)	% que pasa del total
1"	25.4	100
3/4"	19	94.4
1/2"	12.5	14.7
3/8"	9.5	0.8
Nº 4	4.8	0.5
Nº 8	2.4	0.5
Nº 16	1.2	0.5
Nº 30	0.6	0.5
Nº 50	0.3	0.5
Nº 100	0.2	0.5
Nº 200	0.1	0.5
BASE	-	0.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1 Curva granulométrica agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

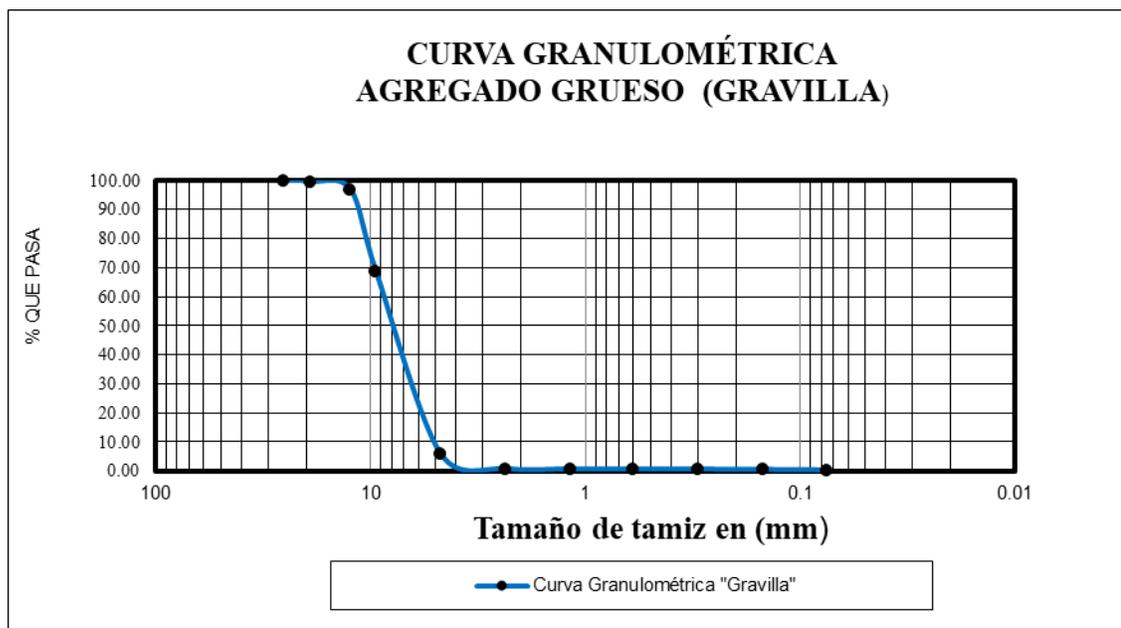
GRANULOMETRÍA - AGREGADO GRUESO (Gravilla)

Tabla 3.2 Resultado de granulometría de la gravilla

Tamices	Tamaño(mm)	% que pasa del total
1"	25.4	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	99.3
3/8"	9.5	67.4
Nº 4	4.8	1.8
Nº 8	2.4	0.2
Nº 16	1.2	0.2
Nº 30	0.6	0.2
Nº 50	0.3	0.2
Nº 100	0.2	0.2
Nº 200	0.1	0.2
BASE	-	0.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2 Curva granulométrica agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

GRANULOMETRÍA - AGREGADO FINO (Arena)

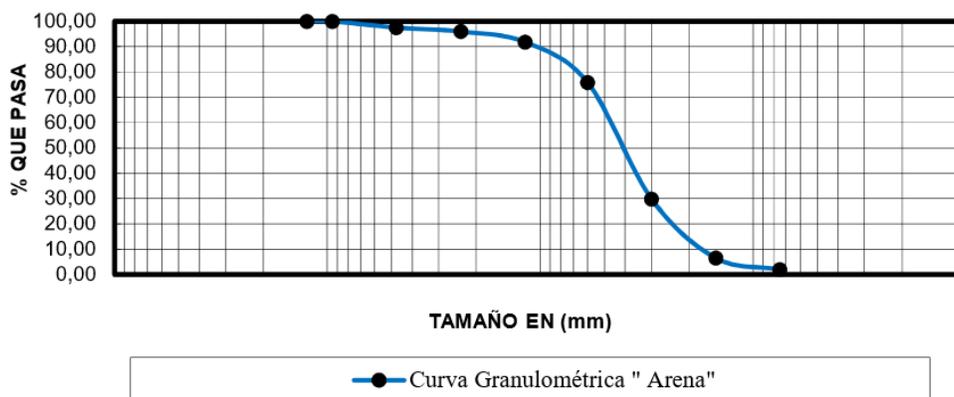
Tabla 3.3 Resultado de granulometría de agregado fino

Tamices	Tamaño(mm)	% que pasa del total
1/2	12.5	100.
0.375	9.5	100
Nº 4	4.8	97.52
Nº 8	2.4	95.96
Nº 16	1.2	91.79
Nº 30	0.6	75.86
Nº 50	0.3	29.79
Nº 100	0.2	6.54
Nº 200	0.1	1.96
BASE	-	0.78

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3 Curva granulométrica agregado fino

CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO FINO (Arena)



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 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 tiene por objeto la determinación la densidad real la densidad neta y la absorción de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

Figura 3.3 Pesaje del material retenido en el tamiz N° 4



Figura 3.4 Muestra saturada dentro del agua y uso del cesto



RESULTADOS

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO GRUESO (Grava)

Tabla 3.4 Resultados densidad real del agregado grueso

Densidad real del árido sup.seco (gr/cm ³)	Densidad real del árido seco Sup. Seca (gr/cm ³)	Densidad neta (gr/cm ³)	% De absorción
2.53	2.56	2.59	0.88

Fuente: Elaboración propia

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO GRUESO (Gravilla)

Tabla 3.5 Resultados densidad real del agregado grueso (gravilla)

Densidad real del árido sup. Seco (gr/cm ³)	Densidad real del árido seco (gr/cm ³)	Densidad neta (gr/cm ³)	% De absorción
2.47	2.53	2.62	2.31

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 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 tiene como objetivo determinar la densidad real y la densidad neta, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Figura 3.5 Muestra sumergida en agua 24 horas



Figura 3.6 Secado superficial con secadora



Figura 3.8 Verificación de la condición de la muestra saturada con superficie seca



Figura 3.7 Matraz + agua + muestra



Figura 3.10 Contenido del matraz que será secada en el horno



Figura 3.9 Obtención del peso de la muestra seca



RESULTADOS

Tabla 3.6 Resultados peso específico del agregado fino (arena)

P.E. A granel (gr/cm ³)	P.E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P.E. Aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2.47	2.49	2.53	0.93

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)

El equivalente de arena está definido como el porcentaje de arena propiamente tan con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculantes, partículas arcillosas.

Este método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena.

Establece un procedimiento rápido para determinar la proporción relativa de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4.75 mm (N° 4). Tiene como objetivo determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

Figura 3.11 Determinación del equivalente de arena



RESULTADOS

Tabla 3.7 Resultados equivalente de arena (%)

Equivalente de arena (%)	Norma
95.19	> 50 %

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 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.

MATERIAL GRUESO

Material que para tamiz $\frac{3}{4}$ " y retiene $\frac{1}{2}$ "

Tabla 3.8 Caras fracturadas $\frac{3}{4}$ " – $\frac{1}{2}$ "

N° de Ensayos	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom.
Peso de la muestra seca (grs.)	1367.10	1378.50	1394.50	
Peso de las caras fracturadas (grs.)	1126.10	1125.40	1136.10	
Porcentaje de caras fracturadas (%)	82.37	81.64	81.47	81.83

Fuente: Elaboración Propia

Material que pasa tamiz ½” y retiene 3/8”

Tabla 3.9 Caras fracturadas ½” – 3/8”

N° de Ensayos	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom.
Peso de la muestra seca (grs.)	477.70	469.30	478.10	
Peso de las caras fracturadas (grs.)	345.60	347.10	342.90	
Porcentaje de caras fracturadas (%)	72.35	73.96	71.72	72.68

Fuente: Elaboración propia

3.2.6 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 2.5 mm, mediante la máquina de Los Ángeles.

Este ensayo es para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, planos de cristalización, forma de las partículas, cuyo objetivo es determinar la dureza de los materiales pétreos que se emplean en mezclas asfálticas, carpetas por riegos, riegos de sello, material de balasto, etc.

Figura 3.12 Máquina de los ángeles



Figura 3.13 Material que se obtuvo después del uso de la máquina de los ángeles



RESULTADO

Tabla 3.10 Según el tamaño de material que se tenía

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

Fuente: Elaboración propia

Gradación B	
Tamiz	Peso retenido
1/2"	2500.9
3/8"	2500.5

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

Tabla 3.11 Resultados obtenidos a través del método para determinación del desgaste

Material	Peso inicial	Peso final obtenido al tamizar el material por el tamiz N° 12	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5001.4	3832.6	23.37	35 % MAX

Fuente: Elaboración propia

3.2.7 Tabla resumen de la caracterización de los agregados a utilizarse

Ensayo	Norma	Exigencia	Resultados de laboratorio
Resistencia al desgaste de los Ángeles	ASTM C-131	25 % Max.	23.37 %
Caras fracturadas	ASTM D 5821-13	70 % Min.	77.26 %
Equivalente de arena	ASTM D2419	50 % Min.	95.19%

Fuente: Elaboración propia

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

3.3.1 Ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97)

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 penetrometro por medio de una aguja normalizada se aplica a la muestra bajo condiciones específicas.

Figura 3.14 Muestras de asfalto sometidas a una temperatura de 25 °C



Figura 3.15 Ensayo de penetración



RESULTADOS

Tabla 3.12 Resultados de ensayo de penetración

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25 °C, 100s. 5 seg (0.1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	mm.	90	93	96	93	85	100
	Lectura N° 2		94	95	92			
	Lectura N° 3		88	99	89			
	Promedio		91	96	92			

Fuente: Elaboración propia

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

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 3.16 Ensayo punto de inflamación por el vaso abierto de Cleveland



RESULTADOS

Tabla 3.13 Resultados de punto de inflamación por el vaso abierto de Cleveland

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	>282	>296	>315	>298	>230	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Ductilidad de materiales bituminosos (AASHTO T 51-93; ASTM: D 113-79)

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 3.17 Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos



RESULTADOS

Tabla 3.14 Resultados ensayo de ductilidad

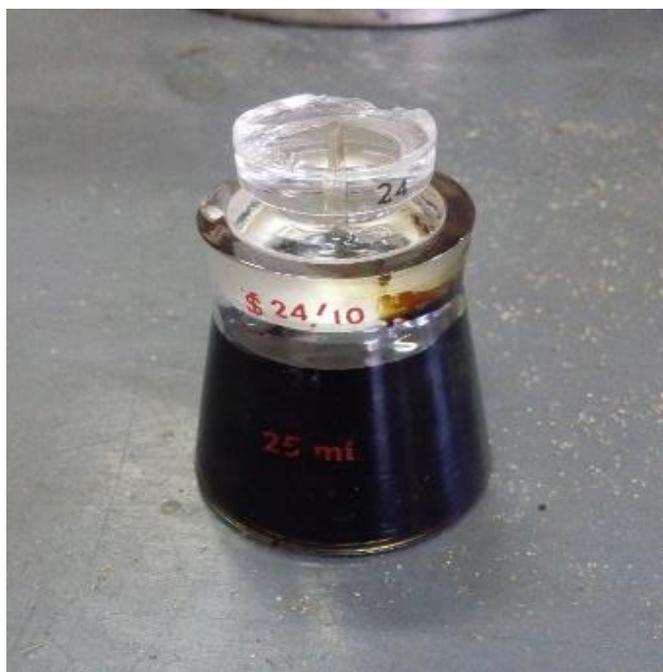
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad	cm	127.0	129.0	131.0	129	100	

Fuente: Elaboración propia

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

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 3.18 Ensayo de gravedad específica con el uso de picnómetro



RESULTADOS

Tabla 3.15 Resultados de gravedad específica

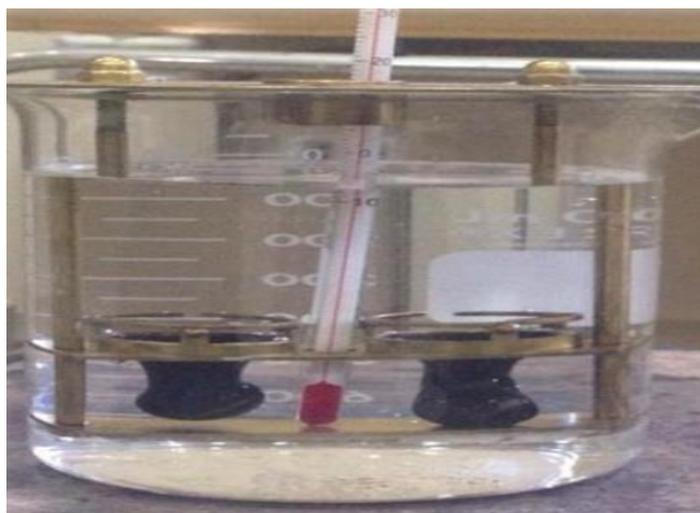
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	38.10	38.10	38.20	1.01	1	1.05
Peso Picnómetro + Agua (25 °C)	grs.	62.80	62.80	62.70			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	57.30	57.40	57.80			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62.80	62.90	63.20			
Peso Específico	grs./cm ³	0.96	1.01	1.02			

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36; AASHTO T53-96)

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 3.19 Ensayo punto de ablandamiento



RESULTADOS

Tabla 3.16 Resultados punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	44.0	46.0	47.0	46	42	53

Fuente: Elaboración propia

Análisis

Una vez obtenidos todos los datos de la caracterización del betumen se pudo observar que los resultados están dentro de los márgenes estipulados de calidad para cemento asfáltico de penetración 85-100 por lo tanto puede usarse como material para mezclas en caliente.

3.3.6 Tabla resumen de la caracterización de asfalto a utilizarse

Ensayo	Norma	Especificaciones	Resultados de Laboratorio
Ensayo de penetración	ASTM D5	85-100	93
Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland	ASTM D1310-01	> 230 °C	298 °C
Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos	ASTM D2419	Min 100	129
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	42 °C - 53 °C	46 °C

Fuente: Elaboración propia

3.4 DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

3.4.1 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.

3.4.2 Curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica para el diseño Marshall

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

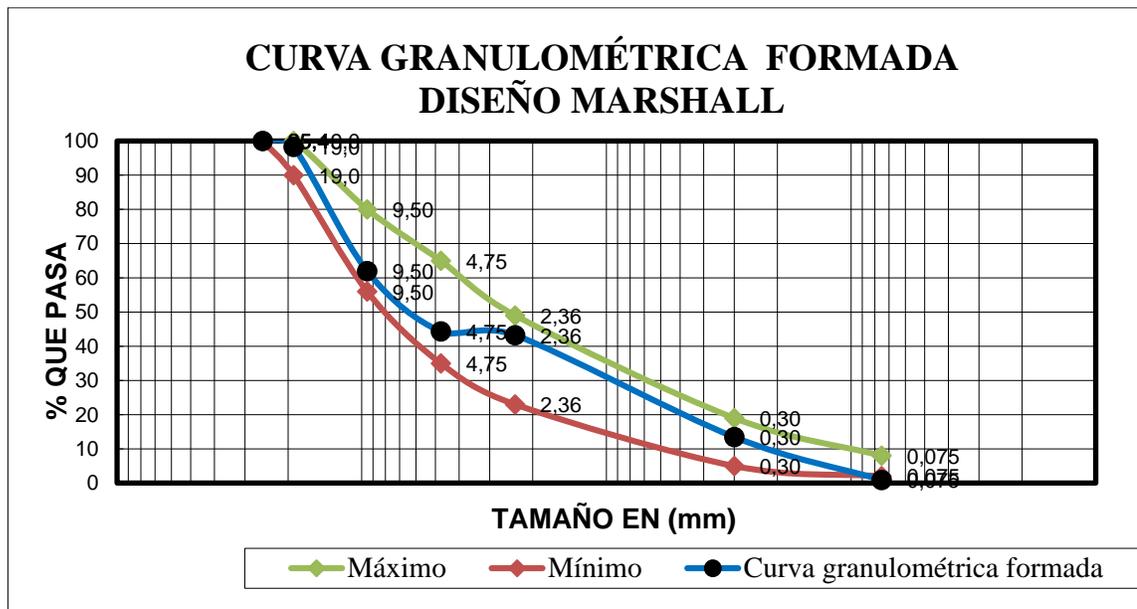
Tabla 3.17 Selección de curva granulométrica para el diseño de mezclas asfálticas densas

TABLA GRANULOMÉTRICA FORMADA - DISEÑO MARSHALL

Agregado		Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL				Especificaciones	
Tamices	tamaño	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	al	al	al	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa	Mínimo	Máximo
(plg)	(mm)	a 3000 gr	a 3000 gr	a 3000 gr	0.30	0.25	0.45	1.00			del total		
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.00	173.00	0.00	0.00	51.90	0.00	0.00	51.90	51.90	1.73	98.27	90	100
1/2"	12.50	2396.00	23.00	0.00	718.80	5.75	0.00	724.55	776.45	25.89	74.11	-	-
3/8"	9.50	417.00	957.30	0.00	125.10	239.33	0.00	364.43	1140.88	38.04	61.96	46	80
Nº 4	4.75	9.00	1968.70	74.40	2.70	492.18	33.48	528.36	1669.23	55.66	44.34	35	65
Nº 8	2.36	0.00	49.19	46.95	0.00	12.30	21.13	33.43	1702.66	56.78	43.22	23	49
Nº 16	1.18	0.00	0.00	124.95	0.00	0.00	56.23	56.23	1758.88	58.65	41.35	-	-
Nº 30	0.60	0.00	0.00	478.05	0.00	0.00	215.12	215.12	1974.01	65.82	34.18	-	-
Nº 50	0.30	0.00	0.00	1381.56	0.00	0.00	621.70	621.70	2595.71	86.55	13.45	5	19
Nº 100	0.15	0.00	0.00	697.50	0.00	0.00	313.88	313.88	2909.58	97.02	2.98	-	-
Nº 200	0.075	0.00	0.00	137.40	0.00	0.00	61.83	61.83	2971.41	99.08	0.92	2	8
BASE	-	3.00	0.90	58.69	0.90	0.23	26.41	27.54	2998.95	100.00	0.00	-	-
SUMA		2998.00	2999.10	2999.50	899.40	749.77	1349.78	2998.90					
PÉRDIDAS		2.00	0.90	0.50									

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.4 Curva granulométrica pavimento flexible



Fuente: Elaboración propia

Análisis

Como se puede evidenciar, nuestra curva granulométrica se encuentra dentro de la línea de control, son puntos de paso obligado para la curva granulométrica del diseño Marshall.

Por lo tanto, se trabajará con 6 porcentajes de acuerdo a la siguiente banda cemento asfáltico de (4-10) % para la elaboración de testigos nuevos.

Tabla 3.18 Márgenes aceptables de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

Tamaño de tamiz	Designación de la mezcla usando el tamaño máximo nominal de agregado				
	37.5 mm (1 1/2")	25 mm (1")	19mm (3/4 ")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")
	porcentaje total que pasa (en peso)				
50 mm (2 ")	100				
37.6 mm (1 1/2")	90 a 100	100			
25 mm (1")		90 a 100	100		
19 mm (3/4")	56 a 80		90-100	100	
12.5 mm (1/2")		56 a 80		90 a 100	100
9.5 mm(3/8")			46-80		90 a 100
4.75 mm (N° 4)	23 a 53	29 a 59	35-65	44 a 74	55 a 85
2.36 mm (N° 8)	15 a 41	19 a 45	23-49	28 a 58	32 a 67
1.18 mm (N° 16)					
0.60 mm (N° 30)					
0.30 mm (N° 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	7 a 23
015 mm (N° 100)					
0.075 mm (N° 200)	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	2 a 10
cemento asfáltico porcentaje en peso del total de la mezcla	3 a 80	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 12

Fuente: Construcción de pavimentos. Serie de manuales No.22 (MS-22)

Datos

Tabla 3.19 Datos para dosificación de testigos a 4.5 % de betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	4.5 %
% agregado =	95.5 %
Peso del betumen =	54 gr
Peso del agregado=	1146 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Datos para dosificación de testigos a 5 % de betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	5 %
% agregado =	95 %
Peso del betumen =	60 gr
Peso del agregado=	1140 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Datos para la dosificación de testigos a 5.5 % betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	5.5 %
% agregado =	94.5 %
Peso del betumen =	66 gr
Peso del agregado=	1134 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22 Datos para la dosificación de testigos a 6% de betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	6 %
% agregado =	94 %
Peso del betumen =	72 gr
Peso del agregado=	1128 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23 Datos para la dosificación de testigos a 6.5 % de betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	6.5 %
% agregado =	93.5 %
Peso del betumen =	78 gr
Peso del agregado=	1122 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24 Datos para la dosificación de testigos a 7 % de betumen

Peso Total de Briqueta =	1200 gr
% del betumen=	7 %
% agregado =	93 %
Peso del betumen =	84 gr
Peso del agregado=	1116 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25 Cantidad de cemento asfáltico y agregado pétreo utilizado para obtener el porcentaje de cemento asfáltico óptimo

Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Porcentaje de Total Agregado (%)	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00	84.00
Peso de Grava (gr)	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60	334.80
Peso de Gravilla (gr)	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50	279.00
Peso de Arena (gr)	515.70	513.00	510.30	507.60	504.90	502.20
Peso total de la briqueta (gr)	1200.0 0	1200.0 0	1200.0 0	1200.0 0	1200.0 0	1200.0 0

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 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.

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.

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.

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 3.25.

Se extraen las muestras con la ayuda de un gato hidráulico.

Figura 3.20 Proceso de elaboración de briquetas



Figura 3.21 Briquetas finalizadas



3.4.4 Determinación de la cantidad de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall

Determinación de la cantidad de la densidad

La densidad real es la que considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Para calcular la densidad real de la mezcla se usa el método con superficie saturada seca, ya que este método se emplea para muestras con porcentajes de absorción menores a 2 %.

Procedimiento

Dejar secar las muestras a temperatura ambiente, pesar y registrar este valor como “A”. Sumergir en baño de agua a 25 ± 1 °C por 5 minutos, secar superficialmente, pesar y llamar este valor como “B”. Sumergir la muestra y el peso registrar con “C”.

Figura 3.22 Ensayos para determinar la densidad de la mezcla



Cálculos

Porcentaje de absorción:

$$\text{Abs} = \frac{B - A}{B - C} * 100 \quad (\%)$$

Densidad real:

$$\text{Densidad} = \frac{A}{B - C} \quad \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

Donde:

A= Masa de la probeta al aire (g).

B= Masa de la probeta al aire superficie seca (g).

C= Masa de la probeta sumergida (g).

Ensayos de estabilidad y fluencia

Una vez que se hayan obtenido los valores para calcular la densidad se debe medir con un vernier en 4 puntos de la briqueta, las alturas, para sacar un promedio y usar un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser sumergidas en baño de agua a 60 °C ±5 °C durante un tiempo de 25 minutos, no mayor a 30 minutos.

Se limpia las superficies de las mordazas, se debe verificar previamente la aplicación de la carga, que es el indicador del dial del anillo, que se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto, hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C se anota como el valor de “Estabilidad Marshall”, el cual después se anotará como Kilogramo fuerza, para el sistema que se maneja en el medio.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo), en posición sobre la varilla guía, leer y anotar como valor de flujo de la briqueta, expresado en milímetros (mm).

Figura 3.23 Ensayo de Marshall



Cálculos y resultados

$$\text{Carga} = (0.012 * \text{Lec.} - 0.0812) * 102 * 2.20 \text{ (lb)}$$

Los factores de corrección para las diferentes alturas se encuentran en anexos

$$\text{Carga corregida} = \text{Carga} * \text{Factor de corrección}$$

Después se realiza un promedio de las 3 briquetas corregidas:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{briqueta}_1 + \text{briqueta}_2 + \text{briqueta}_3}{3}$$

Finalmente se convierte al sistema que se maneja en el medio (SI):

$$1 \text{ lb} = 0.4535923 \text{ Kg}$$

Contenido óptimo de cemento asfáltico

Se deben realizar los cálculos del porcentaje de vacíos total de la mezcla y la relación betumen vacíos (R.B.V.). De las cuales se obtendrá el valor de contenido de cemento asfáltico a 4 % de vacíos y 75 % de R.B.V.

Cálculos y resultados

Densidad máxima teórica:

$$\text{Densidad max. teo.} = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{P.E. C.A.} + \left(\frac{100 - \% C.A.}{P.E. agreg.}\right)}$$

Porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{\text{Densidad max. teo.} - \text{Densidad prom.}}{\text{Densidad max. teo.}} * 100$$

Porcentaje de vacíos agregado mineral (V.A.M.)

$$V.A.M. = \% \text{ Vacíos} + \frac{\text{Densidad prom.} * \% C.A.}{P.E. C.A.}$$

Relación betumen vacíos (R.B.V.):

$$R.B.V. = \frac{V.A.M. - \% \text{ Vacíos}}{V.A.M.} * 100$$

RESULTADOS

Tabla 3.26 Peso específico de los agregados

Agregado	P.E.	%
Grava	2.59	30
Gravilla	2.62	25
Arena	2.53	45
Filler	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27 Peso específico del ligante asfáltico

Número de golpes 75	
Cemento asfáltico 85-100	
Peso específico del ligante AASHTO t-228	1.01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 Peso específico total

Pesos específicos		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.6	55
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.53	45
Peso Específico Total	2.57	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29 Tabla de resultados obtenidos de la práctica por el método Marshall

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulg
1	6.65	4.50	4.71	1177.40	1163.90	639	524.90	2.24	2.23	2.40	7.09	17.04	58.37	667	1777.88	0.934	1660.18	1752.60	16	15.00
2	6.65			1172.90	1172.60	648	524.60	2.24						699	1864.05	0.934	1740.64		14	
3	6.79			1177.40	1179.70	649	530.70	2.22						773	2063.31	0.900	1856.98		15	
4	6.70	5.00	5.26	1166.60	1168.50	649	519.50	2.25	2.25	2.39	5.74	16.87	65.99	855	2284.12	0.923	2107.10	2335.80	13	14.00
5	6.58			1169.10	1171.50	650	521.50	2.24						957	2558.79	0.947	2422.91		15	
6	6.64			1172.50	1174.00	655	519.00	2.26						990	2647.65	0.936	2477.40		14	
7	6.73	5.50	5.82	1201.10	1200.90	669	531.90	2.26	2.26	2.37	4.58	16.89	72.86	995	2661.11	0.915	2434.92	2466.30	12	14.00
8	6.61			1186.80	1188.60	661	527.60	2.25						1000	2674.58	0.941	2517.58		15	
9	6.52			1161.00	1159.80	649	510.80	2.27						955	2553.4	0.958	2446.41		15	
10	6.51	6.00	6.38	1176.90	1181.40	663	518.40	2.27	2.26	2.35	3.70	17.16	78.42	976	2609.95	0.960	2505.55	2372.40	16	15.00
11	6.40			1153.60	1156.10	649	507.10	2.27						887	2370.29	0.988	2340.66		14	
12	6.72			1187.10	1189.70	662	527.70	2.25						926	2475.31	0.918	2271.09		15	
13	6.47	6.50	6.95	1158.20	1157.80	649	508.80	2.28	2.27	2.34	2.92	17.51	83.33	790	2109.09	0.970	2045.81	2058.90	16	15.67
14	6.50			1151.10	1153.50	644	509.50	2.26						795	2122.55	0.963	2042.95		15	
15	6.44			1152.20	1155.40	647	508.40	2.27						800	2136.02	0.978	2087.95		16	
16	6.42	7.00	7.53	1158.10	1160.10	645	515.10	2.25	2.26	2.32	2.49	18.16	86.30	660	1759.03	0.983	1728.24	1570.50	17	18.33
17	6.53			1160.20	1162.20	649	513.20	2.26						611	1627.08	0.956	1555.97		20	
18	6.30			1140.50	1141.20	640	501.20	2.28						530	1408.96	1.013	1427.27		18	
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	75				1800	8			
				máximo						5	-	82				-	16			

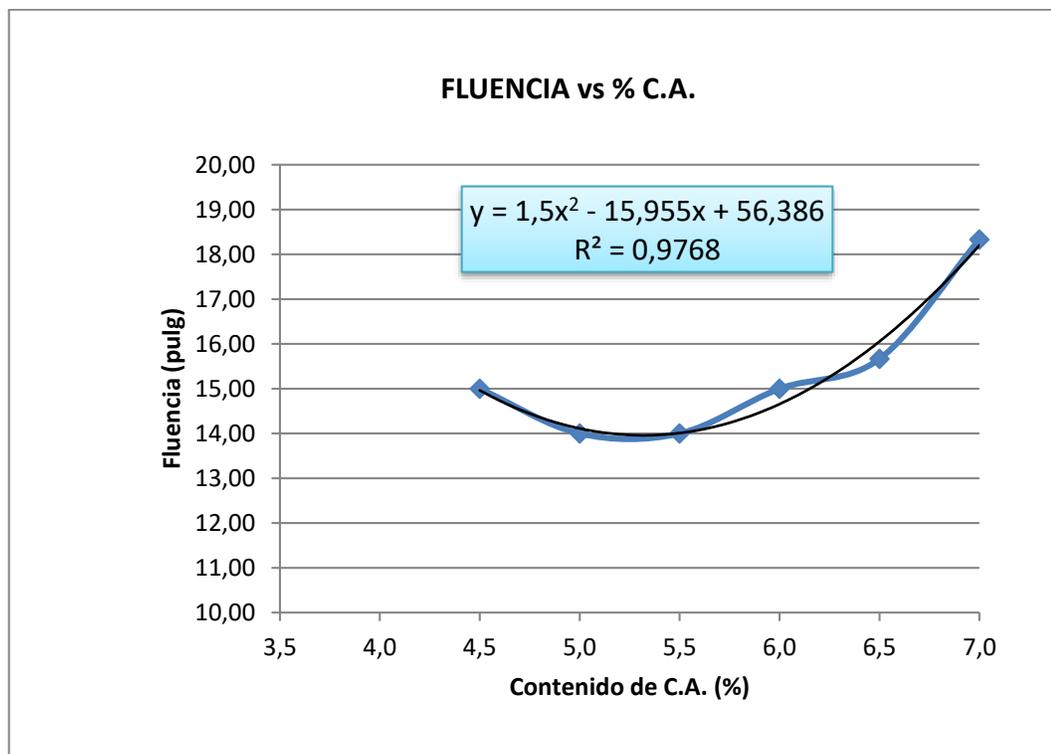
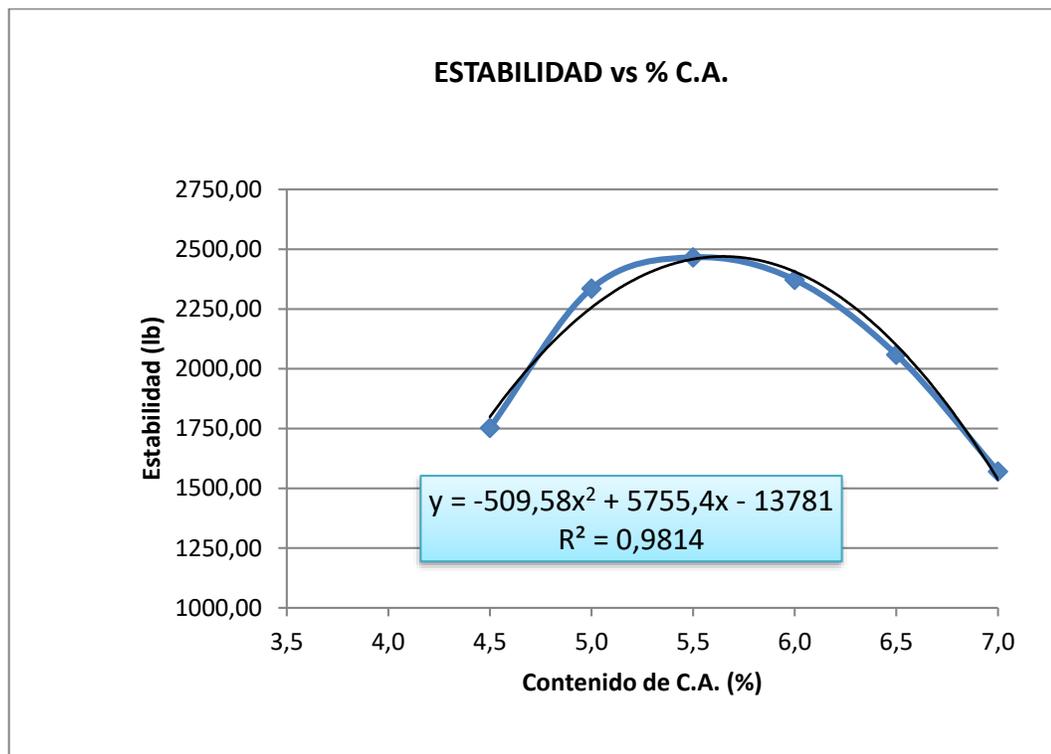
Fuente: Elaboración Propia

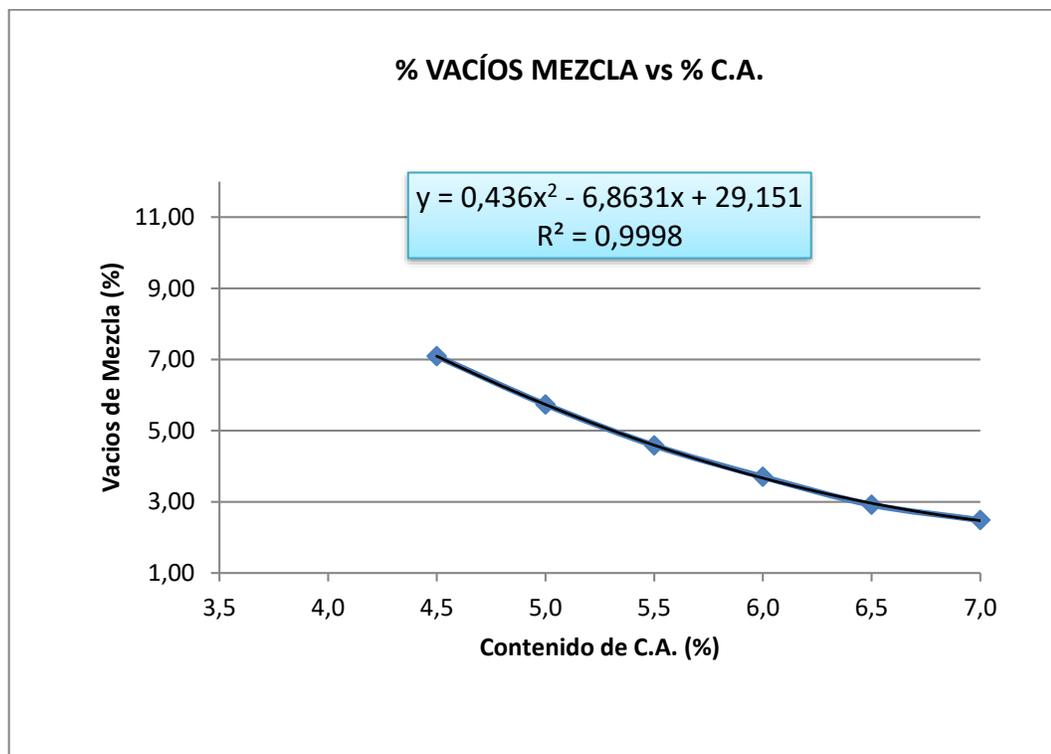
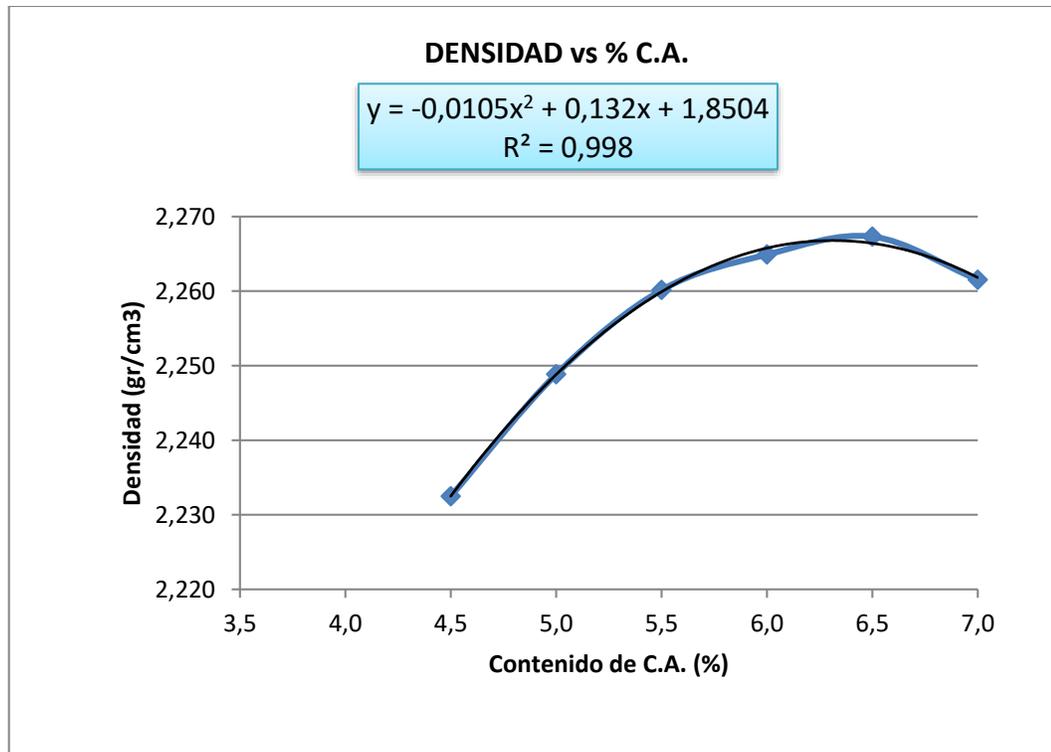
Tabla 3.30 Datos obtenidos

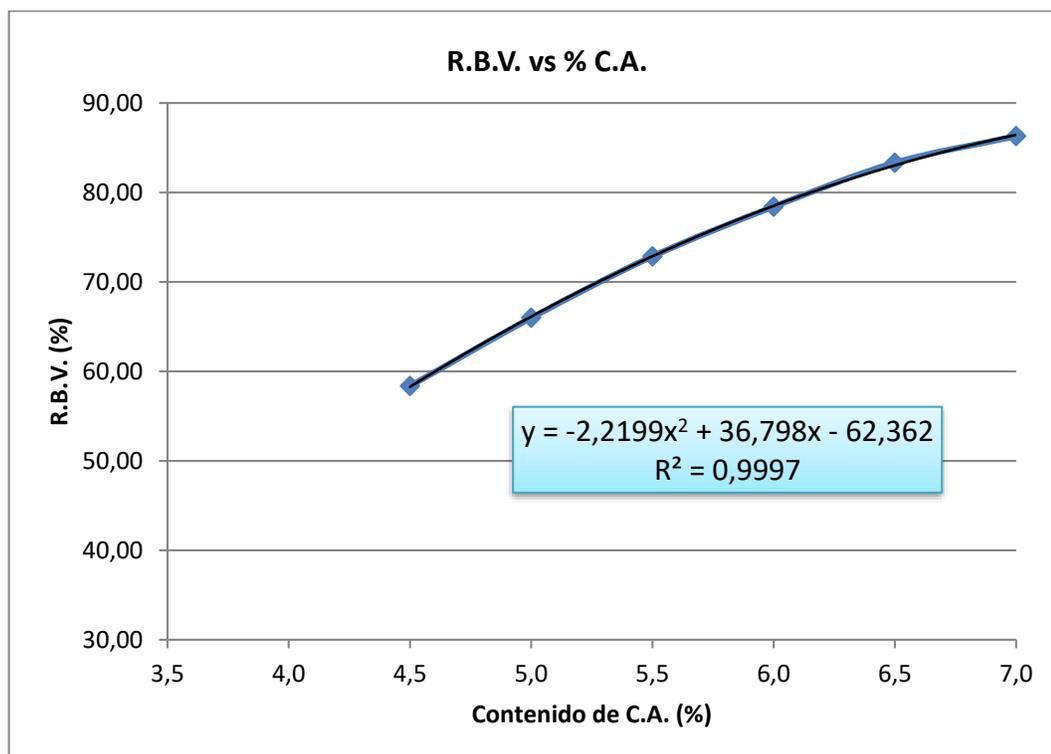
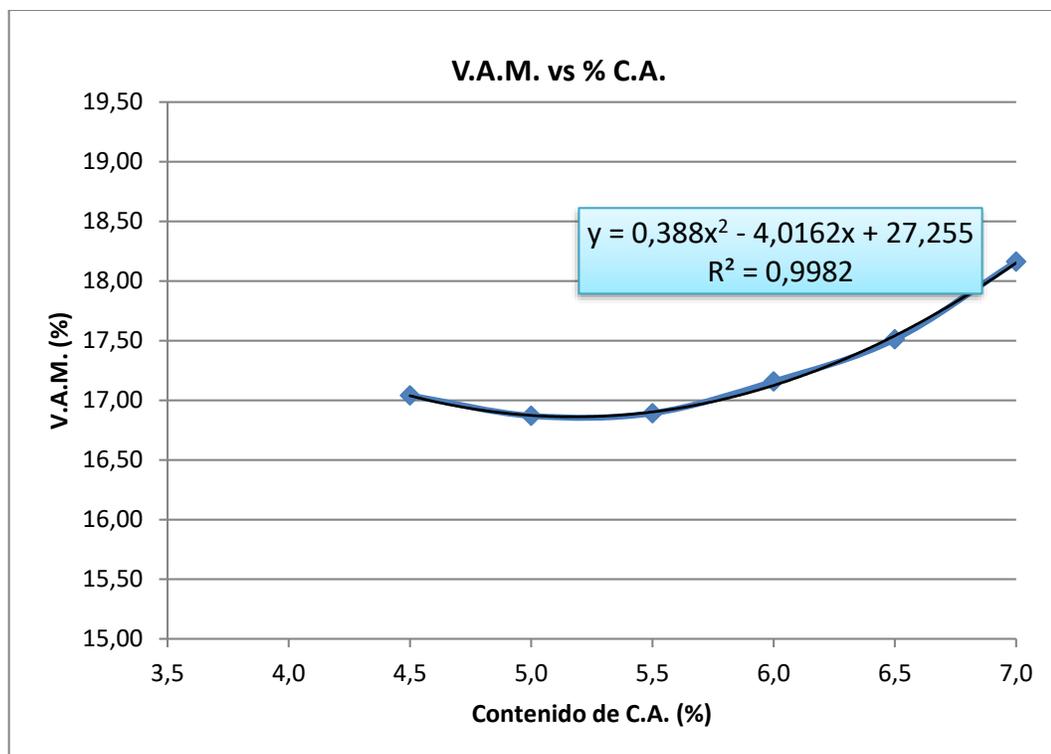
Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	r.b.v. (relación betún vacíos) (%)	v.a.m. (vacíos de agregado mineral) (%)
4.5	2.232	1752.60	15.00	7.09	58.37	17.04
5.0	2.249	2335.81	14.00	5.74	65.99	16.87
5.5	2.260	2466.31	14.00	4.58	72.86	16.89
6.0	2.265	2372.44	15.00	3.70	78.42	17.16
6.5	2.267	2058.91	15.67	2.92	83.33	17.51
7.0	2.262	1570.50	18.33	2.49	86.30	18.16

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.5 Graficas generadas para verificación y obtención del contenido de cemento asfáltico óptimo







Fuente: Elaboración Propia

3.4.5 Determinación del porcentaje óptimo de betumen

El contenido óptimo de betumen en una mezcla depende en gran medida de las características del agregado como la graduación y absorción.

Es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con espesor suficiente para resistir los elementos de intemperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad. En las mezclas asfálticas es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo; ya que en una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tan que sea suficiente de resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa ya que además de resultar antieconómica puede provocar una pérdida de estabilidad en la carpeta, además este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie.

Máximos y mínimos de un vértice

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Condición para determinar un vértice:

$$a < 0 \quad \text{ocurre un máximo}$$

$$a > 0 \quad \text{ocurre un mínimo}$$

Determinación de las coordenadas de un vértice:

$$x_{\text{vértice}} = -\frac{b}{2a} \quad y_{\text{vértice}} = f(x_{\text{vértice}})$$

Ecuaciones en estudio:

Estabilidad máxima

$$y = -509.58x^2 + 5755.4x - 13781$$

$$a = -509.58 < 0 \quad \text{máximo}$$

$$b = 5755.4$$

$$c = -13781$$

X máx. = 5.65 Contenido de ligante para la estabilidad máxima

Y máx. = 2469.95 Estabilidad máxima

Densidad máxima

$$y = -0.0105x^2 + 0.132X + 1.8504$$

$$a = -0.0105 < 0 \quad \text{máximo}$$

$$b = 0.132$$

$$c = 1.8504$$

X máx. = 6.29 Contenido de ligante para la densidad máxima

Y máx. = 2.27 Densidad máxima

Vacíos en la mezcla

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3, 4 o 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en “y” para obtener el valor de la incógnita “x” (contenido de ligante a ese % de vacíos).

$$y = -0.436x^2 - 6.8631X + 29.151$$

$$a = 0.436 > 0 \quad \text{mínimo}$$

$$b = -6.8631$$

$$c = 29.151$$

X máx. = 5.81 Contenido de ligante para los vacíos de la mezcla mínimo

Y máx. = 4.00 Vacíos de la mezcla mínimo

Tabla 3.31 Tabla de resultado del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	2469.95	5.65
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.27	6.29
	Relación betun vacíos	4.00	5.81
	% Porcentaje óptimo de C.A.		5.91
	Promedio =		

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Elaboración de briquetas de pavimento flexible

Una vez encontrado el porcentaje de contenido óptimo de cemento asfáltico se procedió a la elaboración de 42 briquetas de las cuales 32 estarán destinadas para la adición posterior de la capa porosa, 6 para briquetas control de la estabilidad y flujo y 6 briquetas control de resistencia en el ensayo de compresión inconfinaada.

La dosificación de los agregados es la siguiente:

Tabla 3.32 Dosificación mezcla flexible con porcentaje óptimo de C.A.

Porcentaje de total agregado (%)	94.09 %
Porcentaje del cemento asfáltico (%)	5.91 %
Peso del cemento asfáltico (gr)	73.88
Peso de grava (gr)	352.84
Peso de gravilla (gr)	294.03
Peso de arena (gr)	529.26
Peso total de la briqueta (gr)	1250

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.33 Valores de estabilidad y fluencia para las briquetas con contenido óptimo de pavimento flexible

N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
		Base Mezcla	Base Agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad final	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad final	lectura dial del flujo	Fluencia final
		%	%																	
1	6.9	5.91	6.28	1237.0	1239.8	690	549.8	2.25	2.25	2.36	4.46	17.63	87.24	812	2168.3	0.87	1901.41	1901.41	15	15
2	6.97	5.91	6.28	1239.7	1242.3	695	547.3	2.27	2.27	2.36	3.82	17.07	86.73	990	2647.7	0.864	2287.04	2287.04	12	12
3	6.92	5.91	6.28	1245.3	1246.0	700	546.0	2.28	2.28	2.36	3.15	16.50	86.18	1000	2674.6	0.87	2335.44	2335.44	15	15
4	6.84	5.91	6.28	1231.9	1234.0	691	543.0	2.27	2.27	2.36	3.67	16.94	86.61	940	2513.0	0.88	2231.80	2231.80	10	10
5	6.96	5.91	6.28	1239.4	1242.1	693	549.1	2.26	2.26	2.36	4.16	17.36	87.00	915	2445.7	0.86	2117.23	2117.23	16	16
6	7.01	5.91	6.28	1237.3	1239.7	690	549.7	2.25	2.25	2.36	4.42	17.59	87.21	977	2612.6	0.85	2237.21	2237.21	15	15

Fuente: Elaboración Propia

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.

3.5 DISEÑO DE LA MEZCLA POROSA

3.5.1 Introducción

Lo anteriormente visto en este proyecto ha sido el estudio de los conceptos sobre las mezclas porosa 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 establecidos en la norma INVIAS que son las que han servido a los propósitos de esta investigación, se presentan resúmenes de los ensayos realizados a la mezcla para la evaluación de su desempeño, ensayos basados en las normas AASHTO y ASTM en aquellos casos donde ha sido como cántabro se ha tomado el procedimiento que establece las INVIAS por no haber equivalencias del ensayo en las otras normativas.

Finalmente, se realiza el análisis de los resultados de laboratorios para establecer el contenido óptimo

3.5.2 Dosificación de los agregados

La elaboración de una mezcla porosa implica el empleo de una composición granulométrica muy diferente a la de las mezclas tradicionales, como se ha visto en el desarrollo de esta investigación. En estas el contenido de arena suele ser muy elevado,

generalmente comprendido entre un 33 % y un 60 % y por ello la resistencia de la mezcla, está basada principalmente en la cohesión proporcionada por el asfalto utilizado.

El rozamiento interno de la mezcla únicamente, se moviliza frente a las altas sollicitaciones, mantenidas en el tiempo.

En las mezclas porosas para poder obtener un contenido en vacíos elevado, es necesario modificar la proporción agregado grueso/ agregado fino de tal forma que, en general el contenido de arena suele ser inferior al 20 %. Debido a ello, la cohesión, puesto que falta mortero, sino en el razonamiento interno.

Esta falta de cohesión hace que la mezcla sea bastante crítica ante ciertos esfuerzos del tráfico, especialmente los de tipo tangencial, provocan fenómenos de disgregación.

Para conjugar una buena porosidad con una buena resistencia a la disgregación, es necesario realizar un diseño cuidadoso de la mezcla, eligiendo con detalle los distintos componentes, sus proporciones, y utilizando los distintos ensayos puestos a punto.

En capítulos anteriores se abordaron las recomendaciones hechas por la normativa colombiana (INVIAS) respecto a los agregados a utilizar en mezclas porosas, de donde se retomará la tabla. Se observan los límites de la especificación granulométrica de dicha normativa a estas mezclas.

Tabla 3.34 Franja granulométrica para la mezcla porosa

Tamiz ASTM	Tamaño (mm)	<i>MD-1</i>	
		Esp.inf	Esp.sup
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	70	100
3/8"	9.50	50	75
N° 4	4.75	15	32
N° 10	2.00	9	20
N° 40	0.425	5	12
N° 200	0.075	3	7

Fuente: Artículo 453-07, normativa INVIAS (Mezcla Porosa)

El objeto de la dosificación de agregados es ajustar la mezcla de manera que su gradación se ajuste a estas recomendaciones; para el diseño se han empleado tres fracciones diferentes de agregados, se ha utilizado grava con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$, arena y como

sugiere la normativa INVIAS, se ha adicionado filler con el propósito de mejorar la adherencia en la mezcla, el material que será utilizado como filler será cemento portland.

La dosificación que se adoptó para realizar el diseño de la mezcla es 86.55 % de agregado grueso, 11.47 % de agregado fino triturado y 1.98 % de filler, para realizar la dosificación tenemos que tener en cuenta la banda granulométrica con la que estamos trabajando, y ver que nuestros agregados se adapten a la misma para no tener inconvenientes más adelante.

Se tomó con tamaño máximo de partícula al material que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ ".

La dosificación será la siguiente:

- Agregado Grueso = 86.55 %
- Agregado Fino = 11.47 %
- Polvo Mineral Filler = 1.98 %

El método de tanteos recibe este nombre porque se tantean los porcentajes de aporte de cada material, hasta que la curva de la granulometría de la mezcla entre en el rango de las especificaciones.

3.5.2.1 Planilla de la granulometría proyectada

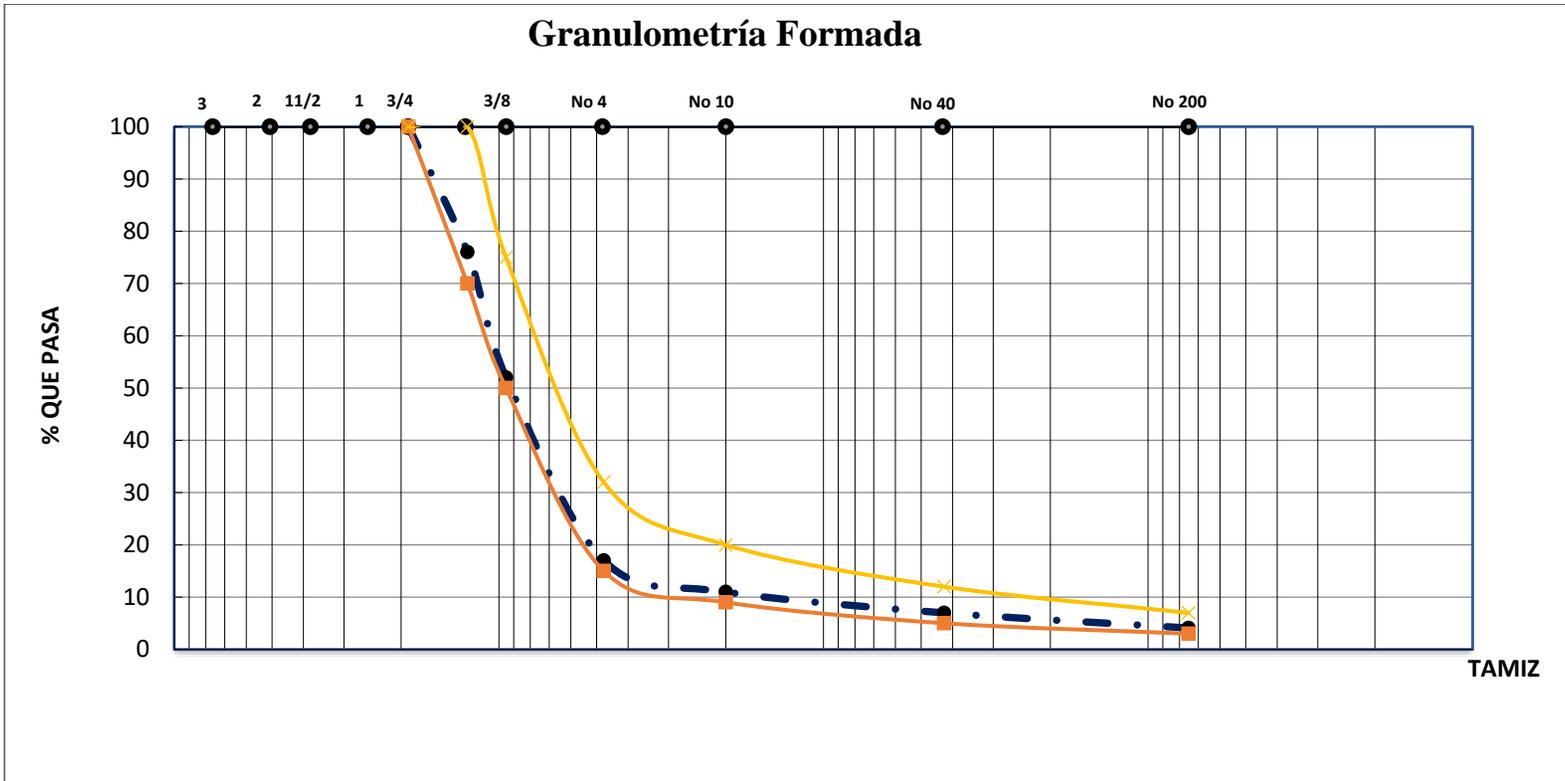
Tabla 3.35 Dosificación adoptada para realizar el diseño de la mezcla porosa

Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Peso Ret.	Total	Ret. Acum	% Ret	% Que Pasa	BANDA GRANULOMÉTRICA	
	(mm)	(gr)	Filler (gr)	(gr)	(gr)		del Total	MD-1	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2"	12.50	120.00	0.00	120.00	120.00	24.00	76.00	70	100
3/8"	9.50	120.00	0.00	120.00	240.00	48.00	52.00	50	75
N° 4	4.75	175.00	0.00	175.00	415.00	83.00	17.00	15	32
N° 10	2.00	30.00	0.00	30.00	445.00	89.00	11.00	9	20
N° 40	0.425	20.00	0.00	20.00	465.00	93.00	7.00	5	12
N° 200	0.075	5.00	9.50	14.50	479.50	95.90	4.10	3	7
BASE	-	10.00	0.00	10.00	489.50	97.90	2.10	-	-

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2 Gráfica de la granulometría

Gráfica 3.6 Granulometría mezcla porosa



Fuente: Elaboración Propia

3.5.2.3 Dosificaciones finales: Pesos retenidos por tamices y su respectivo porcentaje de asfalto

Tabla 3.36 Pesos de los agregados y cemento asfáltico para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Porcentaje de cemento asfáltico	4.00%	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%
Porcentaje de agregado	96.00%	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	42.00	47.25	52.50	57.75	63.00	68.25
Peso Tamiz 1/2" (gr)	252.26	250.95	249.64	248.32	247.01	245.69
Peso Tamiz 3/8" (gr)	252.26	250.95	249.64	248.32	247.01	245.69
Peso Tamiz N° 4 (gr)	367.88	365.97	364.05	362.14	360.22	358.30
Peso Tamiz N° 10 (gr)	63.07	62.74	62.41	62.08	61.75	61.42
Peso Tamiz N° 40 (gr)	42.04	41.82	41.61	41.39	41.17	40.95
Peso Tamiz N° 200 (gr)	10.51	10.46	10.40	10.35	10.29	10.24
Peso Filler (gr)	19.97	19.87	19.76	19.66	19.55	19.55
Peso total de la briqueta (gr)	1050.00	1050.00	1050.00	1050.00	1050.00	1050.10

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.24 Material dosificado



3.5.3 Diseño de la mezcla asfáltica porosa

En lo que respecta al diseño de mezclas porosas, las normativas INVIAS, en su aparato sobre mezclas porosas, establece que este se realizara a partir de probetas cilíndricas del tipo Marshall elaboradas de acuerdo a los procedimientos establecidos en la misma, similar a la norma AASTHO con la diferencia en la masa de los agregados para cada probeta.

Para la selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla se establecen los siguientes 5 criterios:

1. Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos de acuerdo al procedimiento establecido ASTM T-269, deberán variar en el rango del dieciocho por ciento (18 %), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %).
2. Para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados, se realizara una prueba de permeabilidad. La capacidad de drenaje se mide colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta pre humedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 s).
3. Las pérdidas por desgaste a veinticinco grados Celsius (25 °C), determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV E-760, no deberán ser superiores a veinticinco por ciento (25 %).
4. La dosificación del material bituminoso no podrá ser inferior a cuatro y medio por ciento (4.5 %), respecto del peso seco de los agregados, incluido la llenante mineral.
5. Se deberá comprobar, además, la adhesividad entre el agregado y el ligante, caracterizando la mezcla en presencia de agua. Al efecto, la perdida por abrasión en el ensayo Cántabro, según la norma de ensayo INV E-760, tras ser sometidas las probetas a un proceso de inmersión en agua durante veinticuatro horas (24 h) a sesenta grados Celsius (60 °C), no podrá exceder de cuarenta por ciento (40 %).

Si se supera este valor, se deberá mejorar la adhesividad mediante un aditivo mejorador de adherencia apropiado.

Con lo anterior, se establece que los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Vacíos en la mezcla
- Desgaste en la máquina de los Ángeles (estado seco)
- Desgaste en la máquina de los Ángeles (estado húmedo)
- Permeabilidad

Estos parámetros son los que han sido evaluados en la investigación, empleando la dosificación seleccionada al inicio de este capítulo (86.55 % de grava, 11.47 % de arena y 1.98 % de filler).

3.5.3.1 Elaboración de briquetas

Antes de comenzar con la evaluación de criterios, será necesario hablar sobre la elaboración de briquetas, las cuales se hicieron bajo el procedimiento planteado en la norma AASTHO T-245 con la diferencia que la masa de agregados por briqueta debe ser de 1000 g a diferencia de los 1.200 g del método Marshall.

El procedimiento consiste en la fabricación de briquetas cilíndricas de 101.6 mm (4´´) de diámetro y 63.5 mm (2 ½´´) de altura, preparadas como se describe en la norma.

Figura 3.25 Briquetas tipo Marshall de mezcla porosa



Se procedió en primer lugar a preparar los materiales con la dosificación de diseño. En un recipiente tarado se fueron pesando sucesivamente las cantidades de las fracciones de tal modo que la cantidad total de árido para cada briqueta fuera de 1000 g.

Se colocó a continuación el recipiente al horno para calentar la dosificación de agregados a una temperatura de 190 °C.

Se colocó la cantidad de asfalto necesaria para la fabricación de las briquetas en un recipiente y se llevó a una temperatura de 180 °C, de acuerdo a las propiedades del asfalto utilizado cuya temperatura de mezclado y compactación a utilizar es de 180 °C y 150 °C respectivamente.

Se vertieron los agregados en el recipiente para el mezclado y se efectuó una mezcla del mismo, se añadió por pesada la cantidad exacta de asfalto calculado para la mezcla.

Manteniendo la temperatura de los materiales dentro de los límites especificados para su mezcla, se inició el proceso de mezclado, y se continuó hasta que la mezcla se observara homogéneamente cubierta.

Figura 3.26 Proceso de mezclado



La compactación de las briquetas se realizó empleando la máquina y el procedimiento de compactación descrito en la norma AASHTO T-245, sin embargo, el número de golpes fue establecido en base a la norma INV E-760 “CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CÁNTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE” de la normativa INVIAS.

Establece que el número de golpes deberá de ser de 50 por cara.

Figura 3.27 Proceso de compactación con el martillo Marshall



3.5.3.2 Vacíos

Para el cálculo de los vacíos en la mezcla se ha utilizado AASHTO T 269. Se ha tomado el procedimiento descrito en esta norma para la evaluación de vacíos de aire en las probetas para mezclas abiertas, donde se define a las mezclas abiertas como aquellas cuyo contenido de vacíos son del 10 % o más, que es el caso.

3.5.3.2.1 Densidad bulk

Se determinó la densidad bulk de 6 briquetas, de una mezcla asfáltica compactada, a partir de su masa seca (en gr) y de su volumen (en cm³) y se promediaron los resultados.

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$$

Tal como establece el procedimiento, se midió la altura del espécimen con especial cuidado y precisión; así mismo, se midió su diámetro en cuatro sitios diferentes y se calculó su promedio.

Luego se calculó el volumen de la briketa geoméricamente, usando la altura y diámetros promedios.

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

Una vez encontrado el volumen para todas las briquetas fue posible estimar la densidad de la briketa para una vez así poder convertir la densidad bulk en gravedad específica bulk, dividiendo por 0.99797 g/cm³.

A continuación, se mostrarán los pasos a seguir para obtener la gravedad específica bulk, para contenido de asfalto y para efectos de demostración se desarrollará el cálculo para una briketa.

Ejemplo:

Datos

Contenido de asfalto = 3.5 %

Peso seco o masa = 992 gr

D promedio = 10.1775 cm

H promedio = 6.2225 cm

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi 10.1775^2 * 6.2225}{4}$$

$$V_{cilindro} = 506.22 \text{ cm}^3$$

Para la densidad:

$$\text{Densidad} = \frac{992.0}{506.22}$$

$$\text{Densidad} = 1.96 \text{ g/cm}^3$$

Para obtener la gravedad específica bulk:

$$G_{eb} = \frac{1.96}{0.99707}$$

$$G_{eb} = 1.965$$

De la misma manera se realizará para el resto de las briquetas y se promediarán valores, el cálculo deberá realizarse para cada contenido de asfalto.

3.5.3.2.2 Densidad específica máxima teórica

El peso máximo teórico de una mezcla asfáltica compacta es la que se considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos lleno de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A}{G_{CA}} + \frac{100 - \%C.A}{G_{agreg}}}$$

(Densidad Máxima Teórica)

Donde:

D_{mt} = Densidad máxima teórica

%C.A = Porcentaje de cemento asfáltico

G_{CA} = Peso específico de cemento asfáltico

G_{agreg} = Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compacta se expresa generalmente en kilos por metro cúbico (kg/m^3), gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3), o libras por pie cúbico (lb/ft^3). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m^3) o ($62,416 \text{ lb/ft}^3$). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad en el laboratorio (porque en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100 %).

3.5.3.2.3 Cálculo de vacíos

Con los datos de densidades específica bulk y máxima teórica podemos proceder a realizar el cálculo de los vacíos de las muestras y para hacerlo usaremos la siguiente fórmula:

$$vacios = \frac{Dmt - Geb}{Dmt} * 100$$

Donde:

Dmt = Densidad máxima específica teórica

Geb = Gravedad específica Bulk (promediado)

3.5.3.3 Ensayo de permeabilidad

Los estudios españoles desarrollaron el permeámetro L.C.S. para la evaluación de este parámetro; sin embargo, en la normativa colombiana INVIAS, se contempla la evaluación de la permeabilidad como un ensayo complementario, lo utilizan para la verificación, de que los vacíos de aire contenido en la mezcla, realmente se encuentren interconectados.

En las normativas INVIAS no existe una norma para esta prueba, solo establece que se debe verter 100 ml de agua sobre la probeta pre-humedecida y medir el tiempo que esta tarda en atravesar la probeta, sin que este tiempo sea mayor de 15 s, para establecer condiciones semejantes entre cada prueba, las briquetas se mantuvieron sumergidas por un tiempo de 4 minutos.

La prueba se hizo sobre las briquetas aún contenidas en los moldes Marshall donde fueron compactadas, las cuales antes de la realización fueron sumergidas en agua por un periodo

de 4 min, y dejadas reposar hasta dejar de observar en la cara inferior escurrimiento del agua retenida en la briqueta, luego se vertieron 15 ml de agua sobre la misma y se tomó el tiempo en que tardó en atravesar el agua la briqueta.

Figura 3.28 Ensayo de permeabilidad



3.5.3.4 Tabla de resultados de vacíos y permeabilidad

Tabla 3.37 Planilla de resultados de vacíos y permeabilidad

Identificación	Base mezcla	Altura briqueta				Promedio altura briqueta	Diámetro briqueta				Promedio diámetro briqueta	Volumen briqueta	Peso briqueta en seco inicial	Densidad briqueta				% Vacíos		Permeabilidad	
														real	especifica	promedio	máxima teorica	mezcla	promedio mezcla	real	promedio
		%	cm				cm	cm				cm ³	grs.	grs/cm ³	-	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	seg.	seg.
B1	3.50	6.51	6.48	6.46	6.47	6.48	10.21	10.22	10.20	10.20	10.20	529.50	995.43	1.88	1.89	1.90	2.54	25.76	25.21	6.30	7.03
B2		6.50	6.52	6.50	6.51	6.51	10.18	10.17	10.20	10.16	10.18	529.40	1003.45	1.90	1.90			25.15		8.00	
B3		6.49	6.52	6.52	6.49	6.51	10.17	10.18	10.21	10.18	10.19	529.98	1004.87	1.90	1.90			25.13		5.90	
B4		6.48	6.45	6.47	6.47	6.47	10.19	10.18	10.20	10.21	10.20	527.96	995.30	1.89	1.89			25.56		7.80	
B5		6.47	6.46	6.45	6.46	6.46	10.18	10.17	10.20	10.19	10.19	526.31	1000.34	1.90	1.91			24.95		6.90	
B6		6.45	6.45	6.46	6.45	6.45	10.17	10.18	10.16	10.19	10.18	524.67	1000.10	1.91	1.91			24.73		7.30	
B7	4.00	6.47	6.40	6.40	6.44	6.43	10.18	10.16	10.16	10.15	10.16	521.35	1006.43	1.93	1.94	1.94	2.52	23.17	23.01	6.90	7.32
B8		6.40	6.36	6.38	6.44	6.40	10.16	10.17	10.17	10.17	10.17	519.23	1009.34	1.94	1.95			22.64		7.00	
B9		6.40	6.43	6.42	6.38	6.41	10.15	10.16	10.19	10.18	10.17	520.50	1008.98	1.94	1.94			22.85		7.50	
B10		6.39	6.40	6.41	6.42	6.41	10.16	10.16	10.16	10.19	10.17	520.04	1005.40	1.93	1.94			23.06		7.80	
B11		6.41	6.40	6.42	6.40	6.41	10.20	10.18	10.17	10.16	10.18	521.27	1003.50	1.93	1.93			23.38		7.20	
B12		6.40	6.42	6.41	6.40	6.41	10.16	10.17	10.16	10.19	10.17	520.50	1007.30	1.94	1.94			22.98		7.50	
B13	4.50	6.44	6.33	6.40	6.45	6.41	10.17	10.16	10.16	10.19	10.17	520.30	1019.56	1.96	1.97	1.96	2.50	21.41	21.59	7.90	8.18
B14		6.40	6.35	6.40	6.35	6.38	10.16	10.17	10.16	10.16	10.16	517.10	1015.87	1.96	1.97			21.21		8.00	
B15		6.50	6.40	6.30	6.40	6.40	10.16	10.18	10.16	10.19	10.17	520.15	1012.56	1.95	1.95			21.92		8.50	
B16		6.37	6.39	6.40	6.38	6.39	10.19	10.16	10.19	10.18	10.18	519.69	1019.76	1.96	1.97			21.30		8.10	
B17		6.37	6.40	6.37	6.54	6.42	10.16	10.17	10.19	10.16	10.17	521.52	1014.35	1.95	1.95			21.99		8.10	
B18		6.45	6.40	6.41	6.39	6.41	10.15	10.19	10.18	10.19	10.18	521.67	1018.12	1.95	1.96			21.72		8.50	

Identificación	Base mezcla	Altura briqueta				Promedio altura briqueta	Diámetro briqueta				Promedio diámetro briqueta	Volumen briqueta	Peso briqueta en seco inicial	Densidad briqueta				% Vacíos		Permeabilidad	
														real	especifica	promedio	máxima teorica	mezcla	promedio mezcla	real	promedio
														grs/cm3	-	grs/cm3	grs/cm3	%	%	seg.	seg.
%	cm				cm	cm				cm	cm3	grs.	grs/cm3	-	grs/cm3	grs/cm3	%	%	seg.	seg.	
B19	5.00	6.44	6.33	6.40	6.45	6.41	10.15	10.16	10.16	10.15	10.16	518.76	1029.30	1.98	1.99	2.00	2.48	19.81	19.57	8.50	8.65
B20		6.30	6.25	6.30	6.26	6.28	10.16	10.15	10.16	10.16	10.16	508.69	1027.40	2.02	2.03			18.37		8.90	
B21		6.50	6.40	6.30	6.40	6.40	10.16	10.16	10.16	10.15	10.16	518.61	1020.00	1.97	1.97			20.51		8.19	
B22		6.27	6.29	6.30	6.28	6.29	10.15	10.16	10.15	10.16	10.16	509.04	1020.60	2.00	2.01			18.96		8.10	
B23		6.37	6.40	6.37	6.54	6.42	10.16	10.15	10.15	10.16	10.16	519.98	1030.40	1.98	1.99			19.91		9.10	
B24		6.45	6.40	6.41	6.39	6.41	10.15	10.15	10.16	10.15	10.15	519.11	1029.50	1.98	1.99			19.84		9.10	
B25	5.50	6.38	6.33	6.37	6.40	6.37	10.16	10.16	10.15	10.14	10.15	515.67	1025.10	1.99	1.99	2.00	2.46	19.04	18.58	13.76	11.54
B26		6.35	6.30	6.31	6.40	6.34	10.16	10.16	10.15	10.14	10.15	513.25	1032.10	2.01	2.02			18.10		11.11	
B27		6.34	6.30	6.31	6.30	6.31	10.16	10.16	10.15	10.16	10.16	511.52	1028.10	2.01	2.02			18.14		10.61	
B28		6.24	6.22	6.23	6.32	6.25	10.13	10.13	10.14	10.15	10.14	504.67	1009.50	2.00	2.01			18.53		11.10	
B29		6.20	6.30	6.40	6.41	6.33	10.16	10.16	10.15	10.15	10.16	512.49	1018.00	1.99	1.99			19.10		11.13	
B30		6.29	6.30	6.32	6.30	6.30	10.15	10.16	10.15	10.15	10.15	510.21	1020.00	2.00	2.01			18.58		11.50	
B31	6.00	6.23	6.18	6.20	6.19	6.20	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	502.65	1014.30	2.02	2.02	2.05	2.44	17.19	16.32	12.50	13.72
B32		6.00	6.13	6.00	6.10	6.06	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	491.10	981.90	2.00	2.01			17.95		13.00	
B33		6.05	6.00	6.10	6.11	6.07	10.15	10.15	10.16	10.15	10.15	490.98	1010.00	2.06	2.06			15.58		14.50	
B34		6.00	6.00	6.06	6.03	6.02	10.16	10.15	10.16	10.16	10.16	488.02	985.50	2.02	2.03			17.13		14.33	
B35		6.04	6.05	6.14	6.10	6.08	10.16	10.15	10.15	10.16	10.16	492.64	1018.20	2.07	2.07			15.18		14.20	
B36		6.03	6.09	6.10	6.05	6.07	10.17	10.16	10.16	10.16	10.16	492.15	1020.90	2.07	2.08			14.87		13.80	

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.5 Cántabro seco (Maquina de Los Ángeles)

El ensayo de desgaste conocido también como ensayo cántabro, permite valorar indirectamente la cohesión, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito, ensayo desarrollado en España y retomado por diversos países como Colombia que su normativa ha sido adaptada; este ensayo no tiene equivalencia con las normas ASTM y AASHTO por lo que para su evaluación se utilizó la adaptación colombiana, la norma INV E 760 “CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE”.

Se prepararon tres probetas para cada contenido de asfalto y el ensayo se realizó procurando que la temperatura de ensayo estuviera comprendida entre 15° y 30 °C, con una tolerancia máxima de ± 1 °C como recomendación de la norma.

Luego se determinó la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g.

Se introdujo a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hizo girar el tambor a la misma velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm) del ensayo de desgaste de agregados, pero durante 300 vueltas.

Figura 3.29 Máquina de desgaste de Los Ángeles para el método Cántabro



Al final del ensayo, se sacó la probeta y se determinó de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g.

Se calculó el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = \frac{w1 - w2}{w1} * 100$$

Donde:

P = valor de la pérdida por desgaste, en %

W1 = masa inicial de la briqueta, en gramos.

W2 = masa final de la briqueta, en gramos.

Y por último se calculó el valor medio de las 3 probetas ensayadas, esto para cada contenido de asfalto.

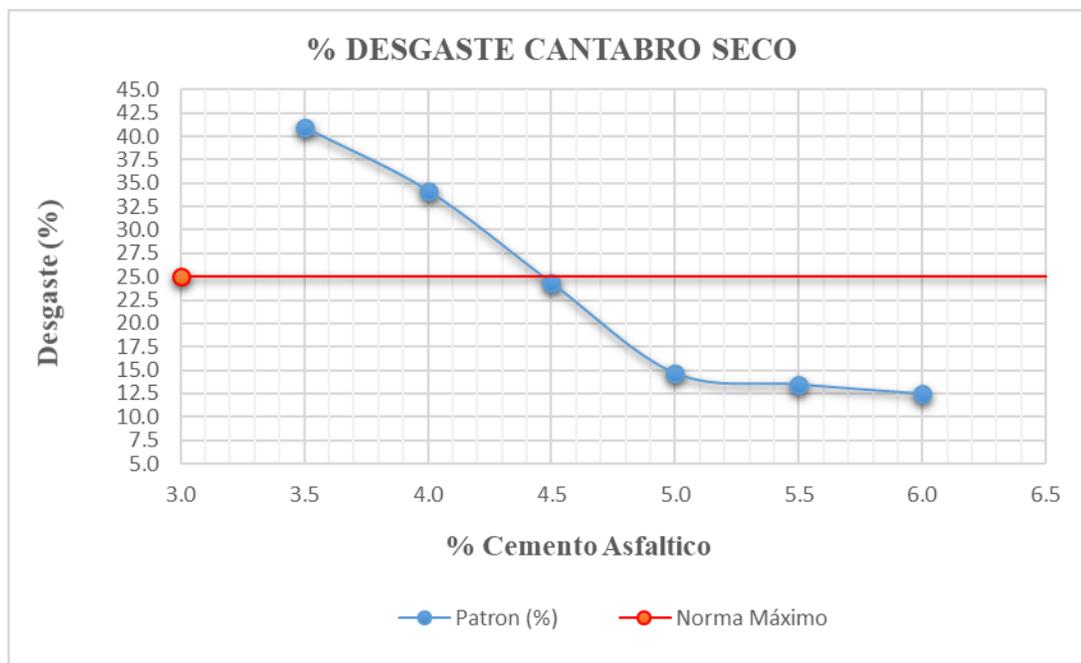
Tabla 3.38 Resultados de laboratorio para ensayo cántabro seco

Planilla de diseño mezclas porosas (cántabro seco)					
Identificación	% cemento asfáltico mezcla	Peso briqueta en seco inicial	Peso briqueta final	% desgaste	
				Cántabro seco	Promedio cántabro seco
	%	grs.	grs.	%	%
B1	3.50	995.43	652.30	34.47	40.97
B2		1003.45	580.60	42.14	
B3		1004.87	539.60	46.30	
B7	4.00	1006.43	613.20	39.07	34.19
B8		1009.34	689.90	31.65	
B9		1008.98	687.50	31.86	
B13	4.50	1019.56	777.90	23.70	24.31
B14		1015.87	798.20	21.43	
B15		1012.56	731.20	27.79	
B19	5.00	1029.30	850.10	17.41	14.64
B20		1027.40	906.00	11.82	
B21		1020.00	870.10	14.70	
B25	5.50	1025.10	890.80	13.10	13.41
B26		1032.10	900.10	12.79	
B27		1028.10	880.60	14.35	

B31	6.00	1014.30	885.10	12.74	12.42
B32		981.90	879.60	10.42	
B33		1010.00	867.50	14.11	
Especificaciones					-
					25 %

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.7 Desgaste cántabro seco



Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.6 Cántabro húmedo (Maquina de los Ángeles)

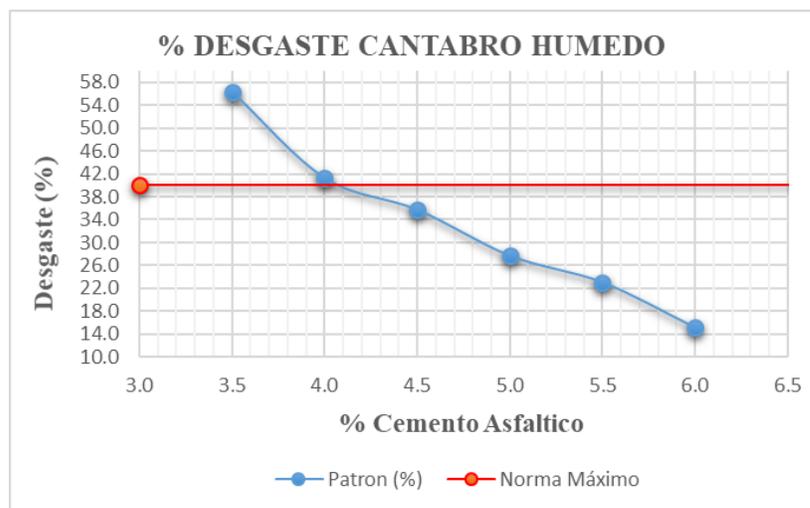
El ensayo de desgaste en estado húmedo se realiza de igual forma que el descrito anteriormente, igual número de briquetas y condiciones para el ensayo, con la diferencia que estas han permanecido sumergidas en agua a 60 °C por un periodo de 24 horas, los cálculos se realizan de igual forma que en estado seco.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.39 Resultados de laboratorio para ensayo cántabro húmedo

Planilla de diseño mezclas porosas (cántabro húmedo)					
Identificación	% cemento asfáltico mezcla	Peso briqueta en seco inicial	Peso briqueta final	% desgaste	
				Cántabro húmedo	Promedio cántabro húmedo
	%	grs.	grs.	%	%
B4	3.50	995.30	444.30	55.36	56.22
B5		1000.34	410.30	58.98	
B6		1000.10	456.90	54.31	
B10	4.00	1005.40	592.30	41.09	41.21
B11		1003.50	587.40	41.46	
B12		1007.30	593.60	41.07	
B16	4.50	1019.76	684.30	32.90	35.67
B17		1014.35	649.80	35.94	
B18		1018.12	629.50	38.17	
B22	5.00	1020.60	749.60	26.55	27.66
B23		1030.40	713.50	30.76	
B24		1029.50	765.20	25.67	
B28	5.50	1009.50	769.90	23.73	23.00
B29		1018.00	778.40	23.54	
B30		1020.00	798.30	21.74	
B34	6.00	985.50	851.60	13.59	15.13
B35		1018.20	830.50	18.43	
B36		1020.90	884.30	13.38	
Especificaciones		Mínimo			-
		Máximo			40%

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.8 Desgaste cántabro húmedo

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.7 Análisis de los resultados obtenidos mediante el método de cántabro

A continuación, se presentará una tabla que muestra a los resultados obtenidos en los análisis y los requerimientos que imponen la normas.

Tabla 3.40 Resumen de resultados de laboratorio de mezclas porosas

Crterios del método cántabro	Resultados	Especificaciones	Comparación
Vacíos	21.59 %	20 % < Vacíos < 25 %	Cumple
Permeabilidad	8.18 s.	100 ml en 15 s.	Cumple
Desgaste cántabro seco	24.51 %	< 25 %	Cumple
Desgaste cántabro húmedo	35.67 %	< 40 %	Cumple
Contenido de asfalto	4.5 %	≥ 4.5 %	Cumple

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que los resultados obtenidos en laboratorio son satisfactorios ya que son los establecidos por norma, por lo que se considera que el diseño de la mezcla con un 4,5 % de asfalto proporcionara un porcentaje de vacíos óptimo, que se está buscando en el presente trabajo.

Tabla 3.41 Valores de estabilidad y fluencia para las briquetas con contenido óptimo de pavimento poroso

N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
		Base Mezcla	Base Agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad final	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad final	lectura dial del flujo	Fluencia final
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0.01 pulg
1	6.30	4.50	4.71	1018.3	1025.5	570	455.5	2.24	2.24	2.40	6.97	16.93	86.79	440	1166.61	1.013	1181.78	1181.78	15	15
2	6.40	4.50	4.71	1028.6	1037.7	582	455.7	2.26	2.26	2.40	6.07	16.12	86.00	450	1193.54	0.988	1178.62	1178.62	14	14
3	6.30	4.50	4.71	1020.5	1028.5	563	465.5	2.19	2.19	2.40	8.77	18.54	86.17	430	1139.68	1.013	1154.50	1154.50	15	15
4	6.35	4.50	4.71	1026.8	1034.5	562	472.5	2.17	2.17	2.40	9.56	19.25	88.71	445	1180.07	1.000	1180.07	1180.07	14	14
5	6.35	4.50	4.71	1022.3	1030.2	575	455.2	2.25	2.25	2.40	6.54	16.55	86.43	462	1225.85	1.000	1225.85	1225.85	16	16
6	6.40	4.50	4.71	1019.8	1027.6	568	459.6	2.22	2.22	2.40	7.66	17.55	87.35	438	1161.23	0.988	1146.71	1146.71	15	15

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO

4.1 ADICIÓN DE LA CAPA POROSA AL PAVIMENTO FLEXIBLE

Se procedió a la adición de la mezcla porosa a 32 briquetas de pavimento flexible previamente diseñadas; para esto se hizo un riego de liga 70/30 (70 % asfalto y 30 % gasolina) la altura de adición de la mezcla porosa es de 3.5 cm.

4.1.1 Porcentajes de agregados y porcentaje de cemento asfáltico a utilizar

Para la dosificación de la mezcla porosa se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente.

Se va a preparar 8 grupos de briquetas, cada grupo con diferentes contenidos de cemento asfáltico. Este contenido varía con el incremento de ± 0.5 % de un grupo a otro.

De esta forma varía los pesos de los agregados según varié la proporción de cemento asfáltico.

Tabla 4.1 Grupos de briquetas

Grupo de contenido de cemento asfáltico (%)	N° de muestras
3.00	4
3.50	4
4.00	4
4.50	4
5.00	4
5.50	4
6.00	4
6.50	4
Total	32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Pesos de los agregados y cemento asfáltico para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	3.00%	3.50%	4.00%	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%
Porcentaje de agregado (%)	97.00 %	96.50 %	96.00 %	95.50 %	95.00 %	94.50 %	94.00 %	93.50 %
Peso del cemento asfáltico (gr)	17.10	19.95	22.80	25.65	28.50	31.35	34.20	37.05
Peso Tamiz 1/2" (gr)	138.37	137.66	136.94	136.23	135.52	134.80	134.09	133.38
Peso Tamiz 3/8" (gr)	138.37	137.66	136.94	136.23	135.52	134.80	134.09	133.38
Peso Tamiz N° 4 (gr)	201.79	200.75	199.71	198.67	197.63	196.59	195.55	194.51
Peso Tamiz N° 10 (gr)	34.59	34.41	34.24	34.06	33.88	33.70	33.52	33.34
Peso Tamiz N° 40 (gr)	23.06	22.94	22.82	22.70	22.59	22.47	22.35	22.23
Peso Tamiz N° 200 (gr)	5.77	5.74	5.71	5.68	5.65	5.62	5.59	5.56
Peso Filler (gr)	10.95	10.90	10.84	10.78	10.73	10.73	10.62	10.56
Peso total de la briqueta (gr)	570.00	570.00	570.00	570.00	570.00	570.06	570.00	570.00

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Procedimiento de la adición de mezcla porosa

Antes de preparar la mezcla asfáltica, se debe hacer un riego de liga; este se prepara con 70 % de cemento asfáltico y 30 % de gasolina en una bandeja, para luego aplicar una delgada película con ayuda de una brocha sobre una de las caras de la briqueta de pavimento flexible, luego la briqueta de pavimento flexible se la introdujo dentro de los moldes que se usan para el recapamiento. A continuación, se procede a elaborar la mezcla porosa de la misma manera que en los subtítulos 3.5.3 para luego vaciar la mezcla con ayuda de una cuchara dentro de los moldes encima de la briqueta de pavimento flexible.

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 50 golpes en una cara de la briqueta, con las dosificaciones indicadas en la Tabla 4.2.

Se elabora 4 briquetas para cada grupo de análisis.

Se extraen las muestras con la ayuda de un gato hidráulico.

Figura 4.1 Riego de liga**Figura 4.2 Adición de la mezcla porosa**

Figura 4.3 Briquetas con mezcla porosa



4.1.3 Determinación del contenido de vacíos y permeabilidad

El procedimiento y los cálculos para la encontrar el porcentaje de vacíos y permeabilidad de la mezcla están descritos en el subtítulo 3.5.3.2 y 3.5.3.3 respectivamente.

Tabla 4.3 Porcentaje de vacíos promedio y permeabilidad

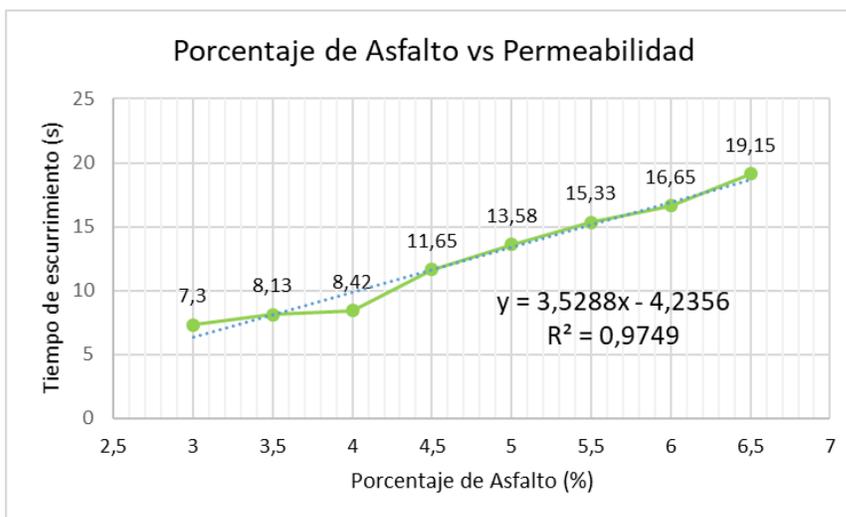
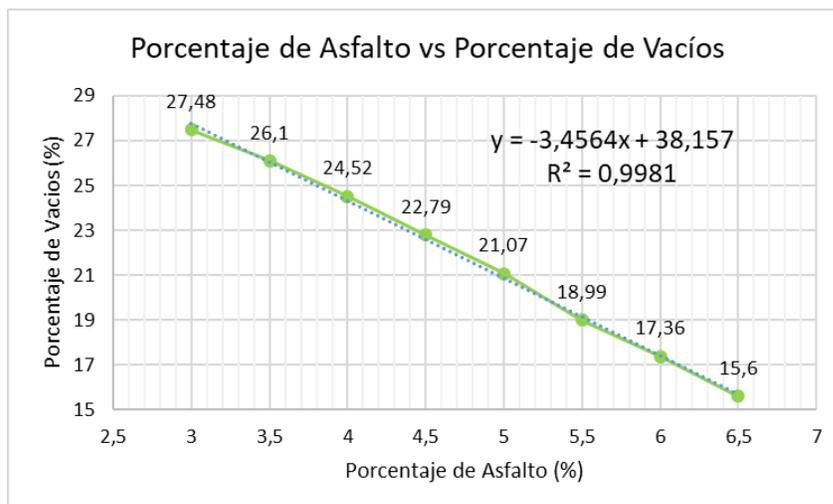
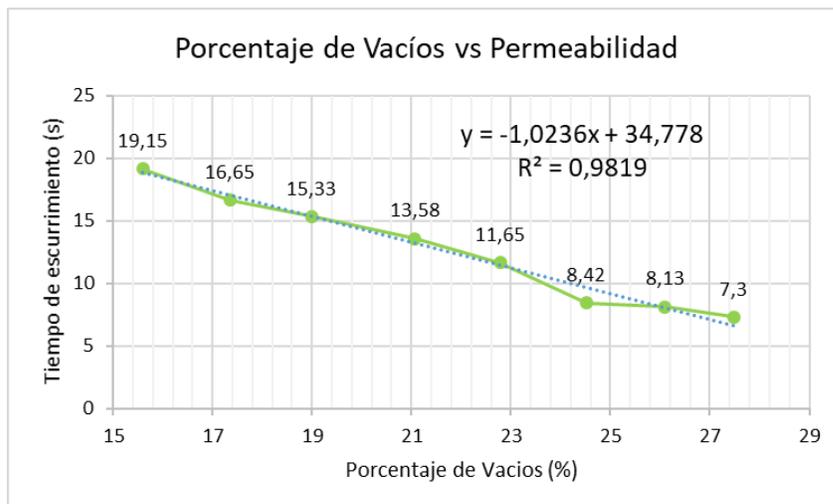
Porcentaje c.a. %	Promedio altura briqueta cm	Promedio diámetro briqueta cm	Volumen briqueta cm ³	Peso briqueta en seco inicial grs.	Densidad briqueta				% vacíos		permeabilidad	
					real	especifica	promedio	máxima teórica	mezcla	promedio mezcla	real	promedio
					grs/cm ³	-	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	seg.	seg.
3	3.48	10.46	299.04	555.30	1.86	1.86	1.86	2.56	27.25	27.48	6.90	7.30
3	3.52	10.43	300.75	557.10	1.85	1.86		2.56	27.43		7.00	
3	3.51	10.38	297.02	549.80	1.85	1.86		2.56	27.48		7.50	
3	3.47	10.40	294.77	543.60	1.84	1.85		2.56	27.75		7.80	
3.5	3.41	10.24	280.83	521.40	1.86	1.86	1.88	2.54	26.69	26.10	7.90	8.13
3.5	3.41	10.45	292.47	552.30	1.89	1.89		2.54	25.43		8.00	
3.5	3.39	10.26	280.27	523.00	1.87	1.87		2.54	26.31		8.50	
3.5	3.42	10.45	293.32	549.80	1.87	1.88		2.54	25.98		8.10	
4	3.52	10.10	282.02	536.60	1.90	1.91	1.90	2.52	24.28	24.52	8.50	8.42
4	3.40	10.43	290.49	554.40	1.91	1.91		2.52	24.05		8.90	
4	3.48	10.26	287.72	540.60	1.88	1.88		2.52	25.22		8.19	
4	3.36	10.32	281.05	532.90	1.90	1.90		2.52	24.54		8.10	
4.5	3.43	10.46	294.75	567.00	1.92	1.93	1.93	2.50	22.84	22.79	13.76	11.65
4.5	3.40	10.44	291.05	564.30	1.94	1.94		2.50	22.24		11.11	
4.5	3.39	10.16	274.84	527.60	1.92	1.93		2.50	23.01		10.61	
4.5	3.45	10.38	291.95	560.00	1.92	1.92		2.50	23.07		11.10	

Fuente: Elaboración Propia

Porcentaje c.a. %	Promedio altura briqueta cm	Promedio diámetro briqueta cm	Volumen briqueta cm ³	Peso briqueta en seco inicial grs.	Densidad briqueta				% vacíos		Permeabilidad	
					real	especifica	promedio	máxima teórica	mezcla	promedio mezcla	real	promedio
					grs/cm ³	-	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	seg.	seg.
5	3.42	10.16	277.27	543.20	1.96	1.96	1.96	2.48	20.82	21.07	12.50	13.58
5	3.39	10.18	275.92	539.40	1.95	1.96		2.48	20.99		13.00	
5	3.43	10.15	277.53	540.20	1.95	1.95		2.48	21.33		14.50	
5	3.40	10.26	281.10	548.30	1.95	1.96		2.48	21.16		14.33	
5.5	3.30	10.34	277.11	553.40	2.00	2.00	1.99	2.46	18.66	18.99	15.00	15.33
5.5	3.25	10.35	273.43	538.60	1.97	1.98		2.46	19.78		14.90	
5.5	3.27	10.38	276.71	545.00	1.97	1.98		2.46	19.79		15.50	
5.5	3.20	10.31	267.15	539.60	2.02	2.03		2.46	17.74		15.90	
6	3.22	10.47	277.23	564.50	2.04	2.04	2.02	2.44	16.44	17.36	14.90	16.65
6	3.19	10.46	274.12	553.00	2.02	2.02		2.44	17.21		16.30	
6	3.23	10.50	279.69	563.40	2.01	2.02		2.44	17.33		17.60	
6	3.26	10.47	280.67	557.80	1.99	1.99		2.44	18.44		17.80	
6.5	3.25	10.13	261.93	536.70	2.05	2.06	2.05	2.43	15.28	15.60	19.20	19.15
6.5	3.20	10.20	261.48	530.50	2.03	2.03		2.43	16.11		18.80	
6.5	3.18	10.15	257.31	523.50	2.03	2.04		2.43	15.88		20.20	
6.5	3.26	10.17	264.82	543.60	2.05	2.06		2.43	15.13		18.40	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.1 Graficas de resultados



Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Ensayo de compresión inconfiada de las mezclas con adición de mezcla porosa

Procedimiento

Para el ensayo de resistencia o capacidad de soporte se usó el ensayo de compresión inconfinado.

Se colocó la muestra en la base del equipo de C.B.R. junto con dos placas metálicas circulares para que se generen cargas distribuidas en las caras de las briquetas, hasta su valor máximo de capacidad de soporte de la mezcla asfáltica, y llegue a su ruptura, este valor marcado en el dial en unidades de (mm), sea el que se registre para su posterior cálculo de resistencia o capacidad de soporte en unidades de (Kg/cm²).

Figura 4.4 Ensayo de compresión inconfiada de las briquetas





Cálculos y resultados:

Briquetas de control A, B, C Y D sin adición:

Carga puntual:

$$\text{carga puntual} = 13.569 * \text{Lec. dial (mm)} + 0.9293$$

$$\text{carga puntual} = 13.569 * 110 \text{ (mm)} + 0.9293$$

$$\text{carga puntual} = 1493.52 \text{ kg}$$

Resistencia:

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Carga puntual}}{86.88} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\text{Resistencia} = \frac{1493.52 \text{ Kg}}{86.88}$$

$$\text{Resistencia} = 17.22 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

Promedio:

$$\text{Resist. prom.} = \frac{\text{Resistencia}_A + \text{Resistencia}_B + \text{Resistencia}_C + \text{Resistencia}_D}{4}$$

$$\text{Resist. prom.} = \frac{17.22 + 18.47 + 19.87 + 18.78}{4} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

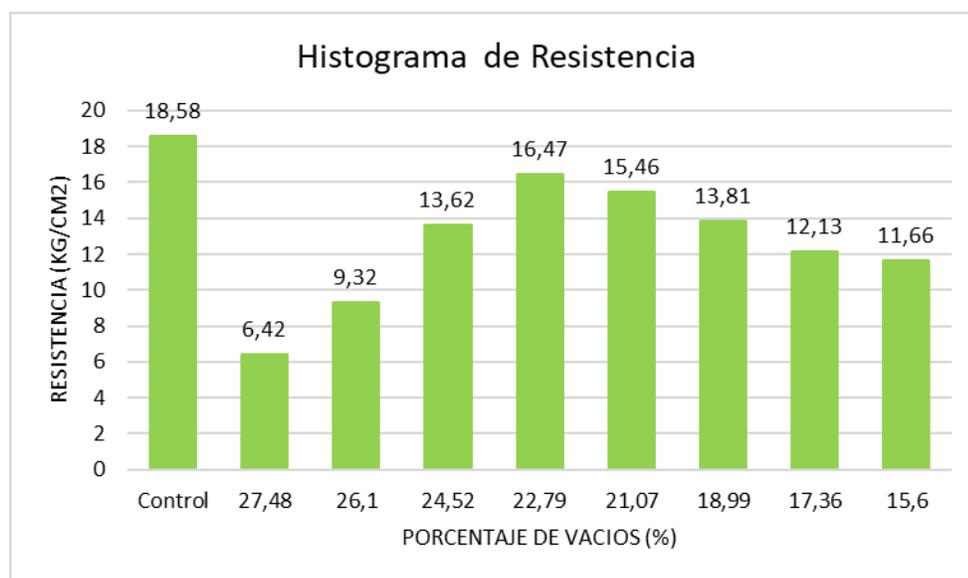
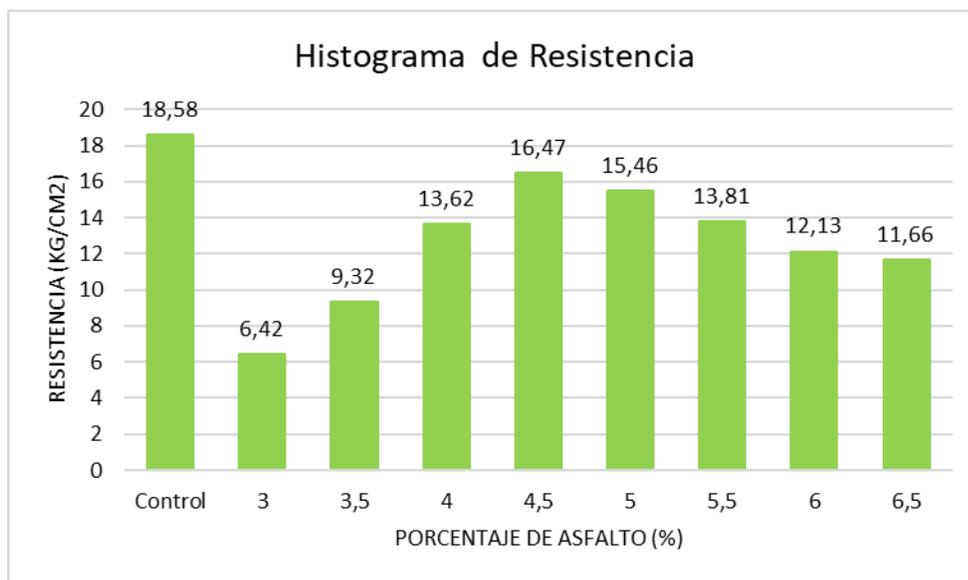
$$\text{Resist. prom.} = 18.58 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

Tabla 4.4 Resistencia de las briquetas con adición de la mezcla porosa

Contenido de C.A. (%)	N° de briqueta	Lectura extensómetro (mm)	Carga puntual (Kg)	Carga puntual promedio(Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia promedio (Kg/cm ²)
CONTROL	A	110	1493.52	1612.25	17.22	18.58
	B	118	1602.07		18.47	
	C	127	1724.19		19.87	
	D	120	1629.21		18.78	
3	1	42	570.83	557.26	6.58	6.42
	2	39	530.12		6.11	
	3	43	584.40		6.74	
	4	40	543.69		6.27	
3.5	5	65	882.91	808.28	10.18	9.32
	6	58	787.93		9.08	
	7	61	828.64		9.55	
	8	54	733.66		8.46	
4	9	91	1235.71	1181.43	14.24	13.62
	10	87	1181.43		13.62	
	11	84	1140.73		13.15	
	12	86	1167.86		13.46	
4.5	13	95	1289.98	1429.07	14.87	16.47
	14	115	1561.36		18.00	
	15	108	1466.38		16.90	
	16	103	1398.54		16.12	
5	17	110	1493.52	1340.87	17.22	15.46
	18	92	1249.28		14.40	
	19	88	1195.00		13.77	
	20	105	1425.67		16.43	
5.5	21	89	1208.57	1198.39	13.93	13.81
	22	99	1344.26		15.49	
	23	86	1167.86		13.46	
	24	79	1072.88		12.37	
6	25	64	869.35	1052.53	10.02	12.13
	26	82	1113.59		12.84	
	27	86	1167.86		13.46	
	28	78	1059.31		12.21	
6.5	29	77	1045.74	1011.82	12.05	11.66
	30	75	1018.60		11.74	
	31	72	977.90		11.27	
	32	74	1005.04		11.58	

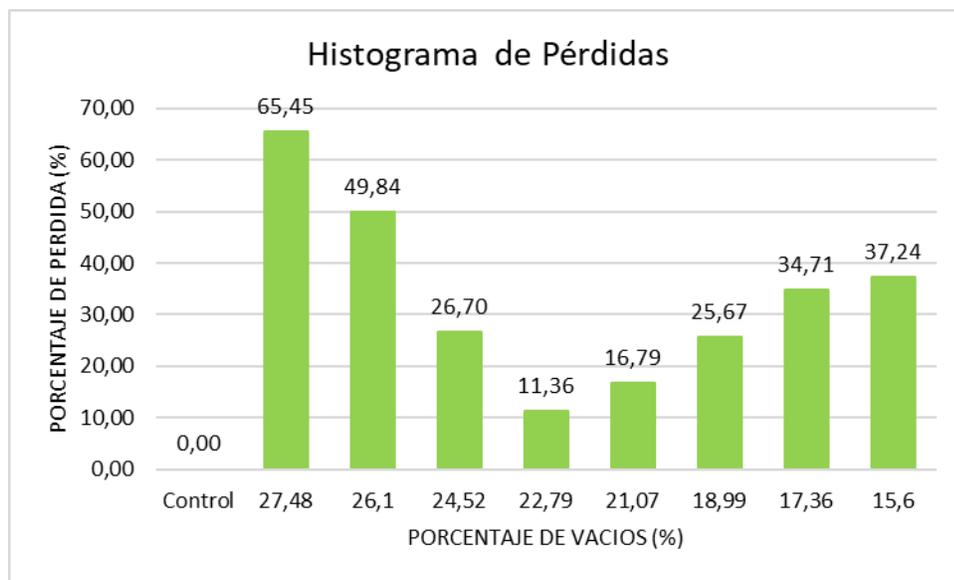
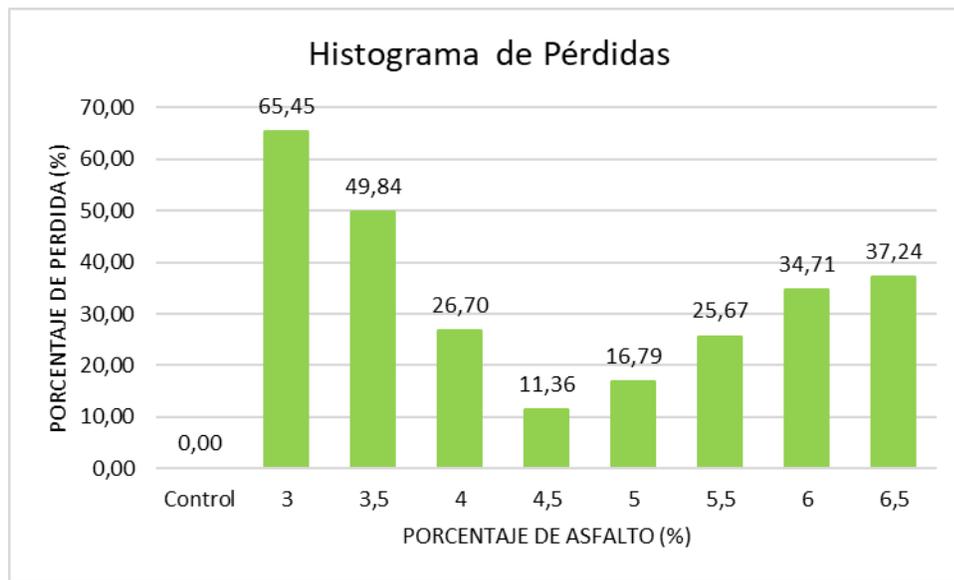
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.2 Histograma de valores de resistencia



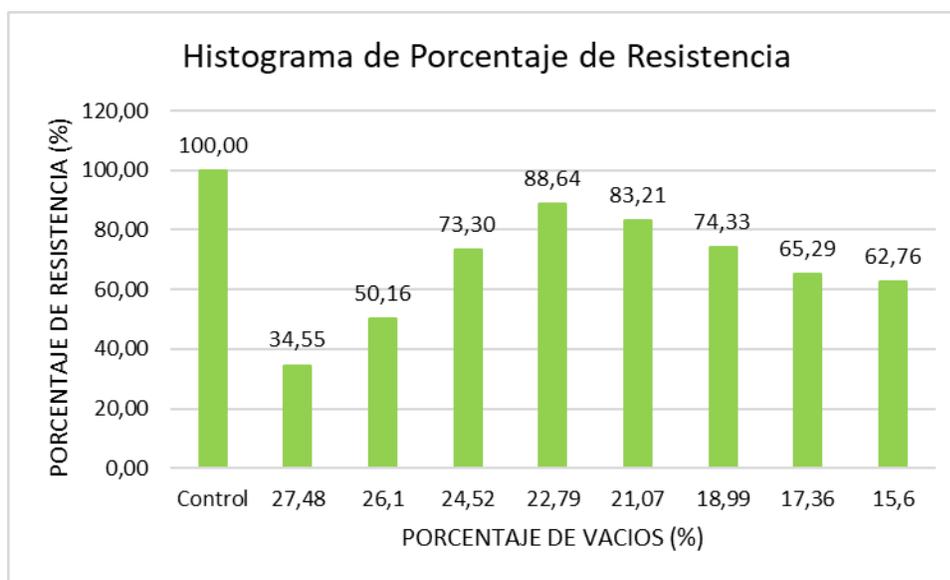
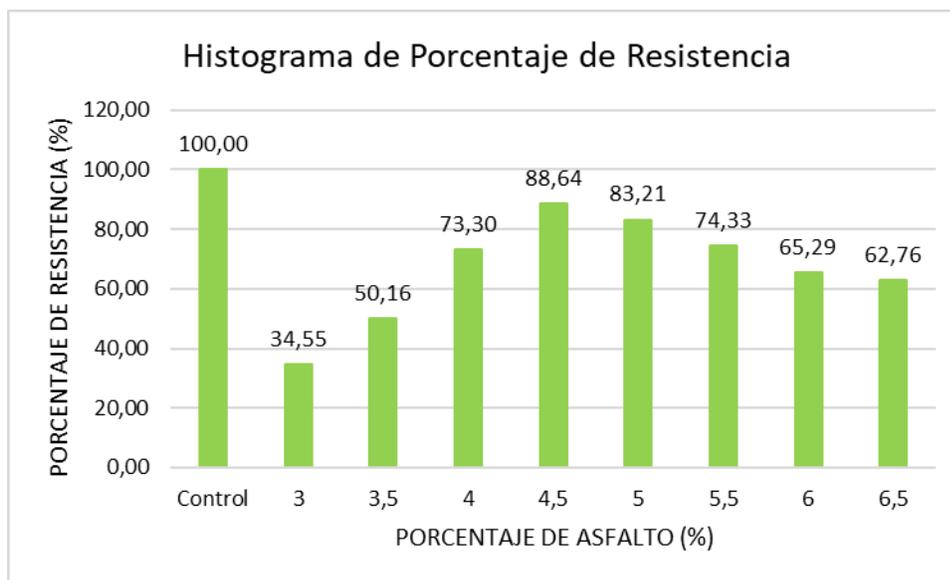
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.3 Histograma de pérdidas



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.4 Histograma de porcentaje de resistencia



Fuente: Elaboración Propia

4.1.1 Ensayo de estabilidad Marshall para las briquetas combinadas

Se procedió a la elaboración de 6 briquetas de mezcla convencional con adición de mezcla asfáltica porosa con los contenidos óptimos de cemento asfáltico en ambas, la altura de la mezcla porosa es de 3.5 cm y la altura de la mezcla convencional es de 3 cm. para esto se hizo un riego de liga 70/30 (70 % asfalto y 30 % gasolina).

Porcentajes de agregados y porcentaje de cemento asfáltico a utilizar

La dosificación de los agregados es la siguiente:

Tabla 4.5 Dosificación mezcla flexible con porcentaje óptimo de C.A.

Porcentaje del Cemento Asfáltico (%)	5.91 %
Porcentaje de agregado (%)	94.09 %
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	33.69
Peso de Grava (gr)	160.90
Peso de Gravilla (gr)	134.08
Peso de Arena (gr)	241.34
Peso total de la briqueta (gr)	570.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.6 Dosificación mezcla porosa con porcentaje óptimo de C.A.

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	4.50 %
Porcentaje de agregado (%)	95.50 %
Peso del cemento asfáltico (gr)	25.65
Peso Tamiz 1/2" (gr)	136.23
Peso Tamiz 3/8" (gr)	136.23
Peso Tamiz N° 4 (gr)	198.67
Peso Tamiz N° 10 (gr)	34.06
Peso Tamiz N° 40 (gr)	22.70
Peso Tamiz N° 200 (gr)	5.68
Peso Filler (gr)	10.78
Peso total de la briqueta (gr)	570.00

Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento

A continuación, se procede a elaborar las briquetas de la misma manera que en los subtítulos 3.4.3 y 4.1.2.

Figura 4.5 Ensayo de estabilidad Marshall de las briquetas combinadas



Tabla 4.7 Valores de estabilidad y fluencia para las briquetas combinadas con contenido óptimo de pavimento flexible y poroso

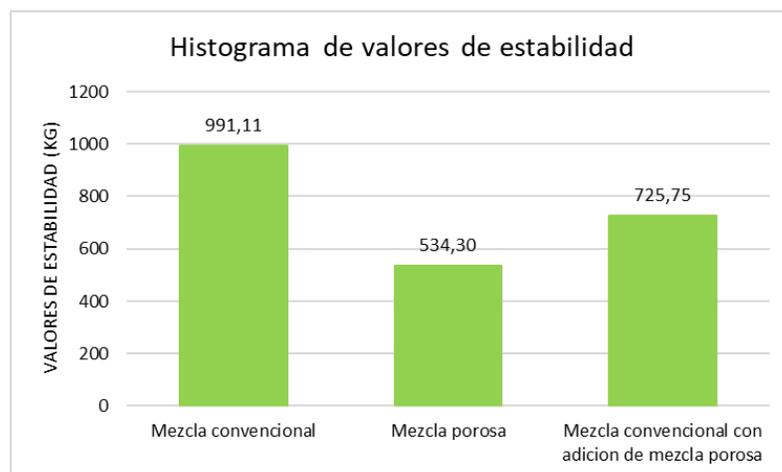
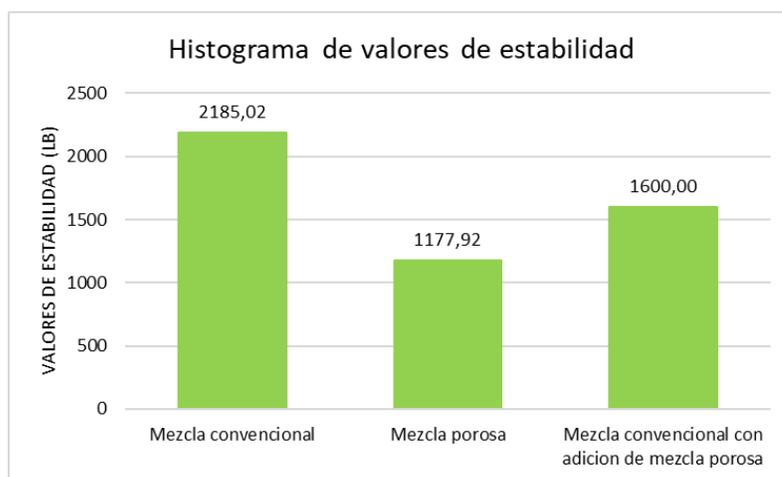
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta	Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia		
		Flexible	Poroso	Seco	Probeta	Densidad real	Densidad final	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad final	lectura dial del flujo	Fluencia final
		%	%			grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras
1	6.67	5.91	4.50	1110.7	549.8	2.09	2.09	2.43	14.20	26.40	92.10	605	1610.92	0.930	1498.158	1498.16	15	15
2	6.66	5.91	4.50	1094.2	547.3	2.11	2.11	2.43	13.37	25.69	91.81	594	1581.30	0.932	1473.615	1473.62	16	16
3	6.63	5.91	4.50	1117.3	546.0	2.10	2.10	2.43	13.58	25.87	91.88	625	1664.78	0.938	1560.897	1560.90	15	15
4	6.67	5.91	4.50	1115.3	543.0	2.10	2.10	2.43	13.79	26.04	91.96	684	1823.65	0.930	1695.998	1696.00	16	16
5	6.63	5.91	4.50	1107.4	549.1	2.10	2.10	2.43	13.79	26.04	91.96	662	1764.41	0.938	1654.313	1654.31	16	16
6	6.63	5.91	4.50	1104.2	549.7	2.10	2.10	2.43	13.79	26.04	91.96	691	1842.50	0.932	1717.029	1717.03	15	15

Fuente: Elaboración Propia

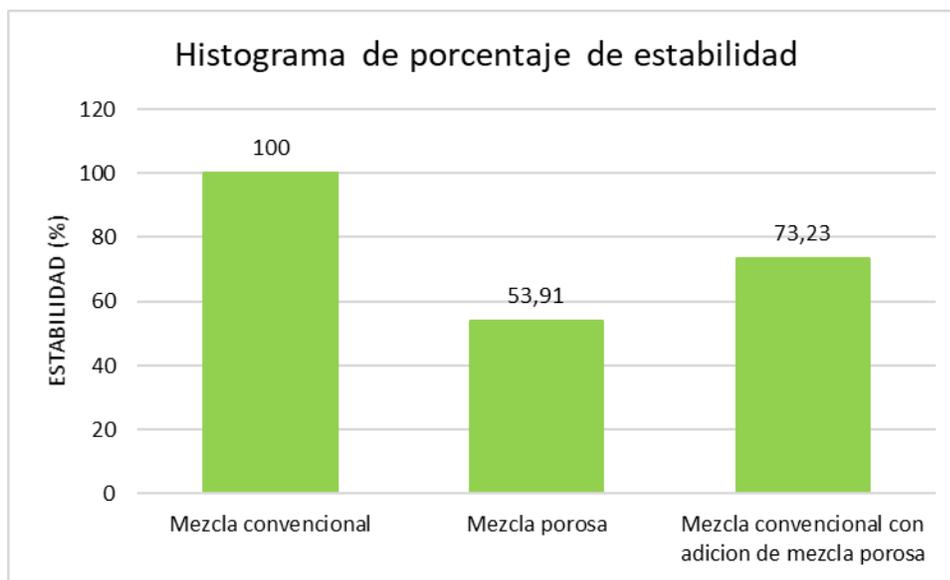
Tabla 4.8 Resultados de los ensayos de estabilidad Marshall

Ensayo de estabilidad Marshall	Valores (lb)	Valores (kg)	Estabilidad Máxima (%)	Pérdidas (%)
Mezcla convencional	2185.02	991.11	100	0
Mezcla Porosa	1177.92	534.30	53.91	46.09
Mezcla convencional con adición mezcla porosa	1600.00	725.75	73.23	26.77

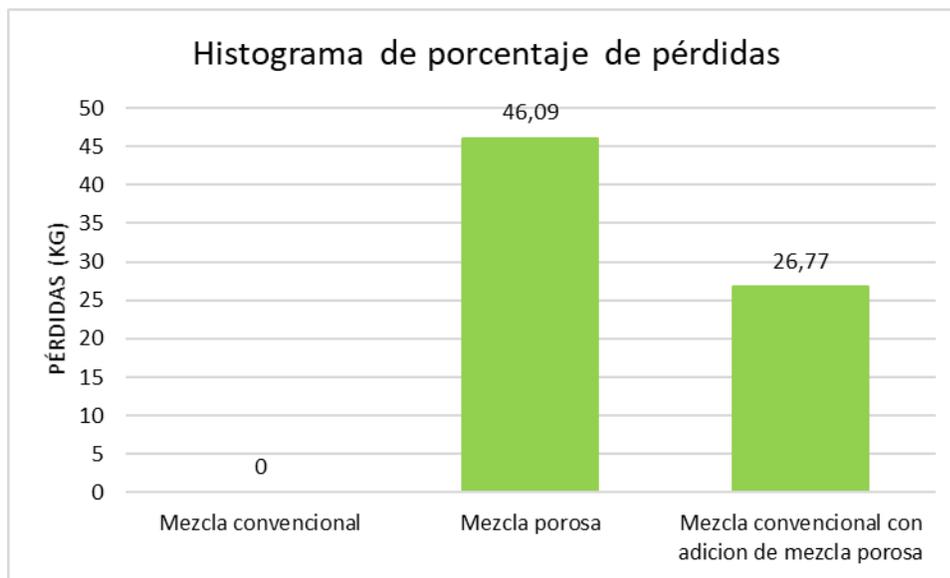
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.5 Histograma de valores de estabilidad

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.6 Histograma de porcentaje de estabilidad

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.7 Histograma de porcentaje de pérdidas

Fuente: Elaboración Propia

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Análisis 1

Como se observa en la Gráfica 4.2 se puede apreciar que la resistencia máxima obtenida sin la adición de la capa porosa es de 18.58 kg/cm² y siendo que el que más se acerca a la resistencia inicial es la del contenido de asfalto de 4.5 % que es el óptimo, en contra parte se puede apreciar que solo se obtiene una resistencia de 16.47 kg/cm² que nos indica una pérdida de resistencia.

En la Gráfica 4.2 se puede observar que el valor más cercano a la resistencia máxima es cuando se trabaja con el contenido de asfalto óptimo para mezcla porosa que es de 4.5 % obteniéndose porcentajes de vacíos de 22.79 % y el más desfavorable es cuando se trabaja con 3 % de contenido de asfalto obteniéndose un porcentaje de vacíos de 27.48 %

Como se observa en la Gráfica 4.3 la pérdida es del 11.36 % a comparación de la resistencia sin adición cuando se trabaja con el contenido óptimo de asfalto, también se puede contemplar que la resistencia más baja es la de contenido de asfalto de 3 % obteniendo una resistencia de 6.42 kg/cm² teniendo una pérdida de resistencia de 65.45 %.

Análisis 2

Al adicionar una capa de mezcla porosa se puede apreciar mediante la gráfica 4.4 que con el valor óptimo se puede llegar a trabajar hasta con el 88.64 % de la resistencia máxima, por otra parte, si utilizamos el contenido de asfalto más bajo solo se llega a trabajar con el 34.55 % del valor de la resistencia máxima alcanzada con la mezcla sin adición de capa porosa. Los rangos varían de 88.64 % a 34.55 %.

Análisis 3

Cuando se trabaja con valores de contenido de asfalto menores al óptimo se evalúa un fuerte descenso de resistencia, en cambio cuando se aumenta la cantidad de cemento asfáltico los valores de la resistencia no tienden a disminuir en gran proporción, con valores de contenido de asfalto menores al óptimo varía en un rango de 88.64 %-34.55 % una diferencia del 54.09 %, ahora cuando se trabaja con valores de contenido de asfalto mayores al óptimo varía en un rango de 88.64 %-62.76 % una diferencia de 25.88 %.

Análisis 4

Mediante la Gráfica 4.1 se pudo valorar que la permeabilidad tiene una tendencia lineal con porcentaje de vacíos, esto quiere decir que mientras más porosa sea la mezcla, menos tiempo tardará en escurrir el agua o sea será más permeable.

Análisis 5

Como se observa en la Tabla 4.7 se puede apreciar que la estabilidad máxima obtenida en la mezcla convencional es de 2185.02 lb (991.11 kg), en la mezcla porosa 1177.92 lb (534.30 kg) y en la mezcla convencional con adición de mezcla porosa es de 1600.00 lb (725.75 kg) que nos indica una pérdida de resistencia.

En la Gráfica 4.6 y 4.7 se puede observar que la mezcla convencional con adición de mezcla porosa solo trabaja al 73.23 % obteniéndose una pérdida del 26.77 %.

4.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Como evaluación de los resultados se puede observar que no existe ningún aporte estructural de la mezcla porosa, como se aprecia en los resultados ninguna de las diferentes mezclas pudo sobrepasar ni igualar los valores de resistencia y estabilidad de la mezcla asfáltica sin adición de la capa porosa siendo que el valor más cercano de la mezcla con un porcentaje de vacíos de 22.8 %.

Los porcentajes de vacíos y la permeabilidad están directamente relacionados, pero no así con su resistencia.

Para obtener las menores pérdidas de resistencia y estabilidad posibles es necesario determinar el contenido óptimo de la mezcla porosa.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En el presente proyecto se logró realizar a partir de un estudio de investigación, la evaluación del aporte estructural de mezclas asfálticas porosas en pavimentos flexibles, de tal manera se pudo verificar el comportamiento de la resistencia de la mezcla flexible con y sin adición de la capa porosa, permitiendo determinar el aporte estructural. Como evaluación de los resultados se puede observar que no existe ningún aporte estructural de la mezcla porosa.
- Se realizó la caracterización de los agregados y cemento asfáltico dando como conclusión que el agregado y el cemento asfáltico cumplen con las especificaciones técnicas.

Ensayo	Norma	Exigencia	Resultados de Laboratorio
Resistencia al desgaste de los Ángeles	ASTM C-131	25 % Max.	23.37 %
Caras fracturadas	ASTM D 5821-13	70 % Min.	77.26 %
Equivalente de arena	ASTM D2419	50 % Min.	95.19 %

Ensayo	Norma	Especificación	Resultados de Laboratorio
Ensayo de penetración	ASTM D5	85-100	93
Punto de inflamación y combustión	ASTM D1310-01	> 230 °C	298 °C
Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos	ASTM D2419	Min 100	129
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	42 °C - 53 °C	46 °C

- Se realizó la dosificación y compactación de las briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico cuyo valor es 5.91 %, para una mezcla convencional.
- Se realizó la dosificación y compactación de las briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico cuyo valor es 4.5 %, para una mezcla asfáltica porosa.

- Se realizó el ensayo de cántabro para poder el contenido óptimo de la mezcla porosa o porosa se obtuvo los siguientes valores:

Criterios del método cántabro	Resultados	Especificaciones	Comparación
Vacíos	21.59 %	20 % < Vacíos < 25 %	Cumple
Permeabilidad	8.18 s.	100 ml en 15 s.	Cumple
Desgaste cántabro seco	24.51 %	< 25 %	Cumple
Vacíos	35.67 %	< 40 %	Cumple
Contenido de asfalto	4.5 %	≥ 4,5 %	Cumple

- Se realizó una prueba de permeabilidad para medir la capacidad de drenaje, se determinó que el tiempo que tarda 100 ml el agua en atravesar la muestra fue de 8.18 segundos.
- Se logró obtener la cantidad de vacíos necesarios dentro de las especificaciones de las mezclas porosas que fue de 21.59 %.
- En el ensayo de Marshall se obtuvo un valor máximo de 2185.02 lb (991.11 Kg) de estabilidad, para la mezcla convencional.
- En el ensayo de Marshall se obtuvo un valor máximo de 1177.92 lb (534.30 Kg) de estabilidad, para la mezcla asfáltica porosa.
- En el ensayo de Marshall se obtuvo un valor máximo de 1600.00 lb (725.75 Kg) de estabilidad, para la mezcla convencional con adición de mezcla asfáltica porosa.
- En el ensayo de resistencia o compresión inconfiada para la mezcla convencional con adición de mezcla asfáltica porosa utilizando sus contenidos óptimos de asfalto en ambas alcanza una resistencia máxima de 16.47 Kg/cm².
- De acuerdo a la hipótesis se concluye que, si incorporamos a la mezcla convencional una capa de mezcla asfáltica porosa, se podrá evaluar su aporte estructural obteniéndose una estabilidad máxima de 1600.00 lb (725.75 Kg) y alcanzando una resistencia máxima de 16.47 Kg/cm².
- Se concluyó que la capa porosa no tiene aporte estructural en pavimentos flexibles siendo que a mayor cantidad de porcentaje de vacíos menor resistencia estructural de la capa estructural, además que la mayor resistencia obtenida tiene un porcentaje de vacíos de 22.8 % y teniendo una pérdida de resistencia en comparación de la muestra sin adición de capa porosa del 11.36 %.

- Para los ensayos de estabilidad Marshall también se tiene una pérdida del 26.77 % comparando la estabilidad de la mezcla convencional con la mezcla convencional con adición de capa porosa.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable conocer y averiguar todas las especificaciones que se deben de tener en cuenta en la construcción de una carpeta asfáltica nueva, el riego de liga a utilizarse, así como también sobre los ensayos de caracterización de los materiales.
- Se recomienda que al realizar las briquetas asfálticas el martillo Marshall esta perfecta posición vertical, en caso contrario puede causar unas pequeñas variaciones en el acabado de las mismas y esto puede afectar en los resultados de resistencia, también tener cuidado con los golpes ya que al no hacerse a la misma intensidad pueden variar en los resultados.
- Se recomienda trabajar con el extremo inferior de la banda granulométrica de las especificaciones de las mezclas porosas, ya que de esta manera se tendrán más porcentaje de agregado grueso y se cumplirá con los porcentajes de vacíos de los rangos de 20 a 25 %.
- 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.
- Se recomienda utilizar cemento portland como filler en las mezclas asfálticas porosas para aumentar su resistencia.