

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Las mezclas drenantes constituyen un tipo particular de pavimento que fue inicialmente concebido para mejorar la circulación de las aguas de lluvia y evitar el problema de hidroplaneo. Los pavimentos asfálticos drenantes o porosos son un tipo de estructura de bajo impacto que disminuye las consecuencias ambientales al considerar las aguas de la escorrentía urbana como un recurso y no una molestia, generando sistemas que contribuyen al control hidrológico y ambiental de las aguas de lluvia. (Rivera, 2003)

Una estrategia del manejo de aguas de escorrentía son las mezclas asfálticas drenantes, desarrolladas inicialmente en U.S.A. en los años 50. Su aplicación y uso a nivel mundial fue posible por los adelantos obtenidos en las investigaciones realizadas en los años 70 y 80's debido a la incorporación de asfaltos modificados, obteniendo una mezcla asfáltica más duradera y resistente permitiendo mejorar la funcionalidad de las vías.

En la presente investigación se realiza un estudio de las mezclas asfálticas drenantes con asfalto modificado 85/100, aplicando el método Cántabro Seco y Húmedo, que para un diseño óptimo considera los parámetros de desgaste por cántabro en estados seco y húmedo y la permeabilidad de la mezcla.

Esta investigación proporciona datos y resultados para la aplicación en diferentes tramos viales, aunque es recomendable sólo para áreas de parqueo, también puede ser aplicado sobre carpetas densas impermeables que garanticen la evacuación de las aguas a través de un sistema de drenaje, mitigando el deterioro prematuro del paquete estructural y evitando las inundaciones en calles con poca pendiente, dando mejor transitabilidad vehicular y peatonal.

1.2 Antecedentes

Las mezclas drenantes iniciaron en los Estados Unidos en los años 50 del siglo pasado como tratamiento superficial, utilizando espesores aproximados de 2,5 cm. El objetivo principal era recuperar la textura de las capas de rodadura que se encontraban en estado liso. Con el tiempo se descubrió la capacidad de absorber el ruido generado por el paso de los vehículos y la capacidad de captar aguas de lluvia, eliminando de las capas de rodadura lo que produjo un incremento en su uso. (Bardesi A. 1999)

En Europa las mezclas asfálticas drenantes fueron desarrolladas en Francia en 1968, pero fue España el primer país en estudiar con profundidad este tipo de mezclas. Los estudios a realizar fueron enfocados al desarrollo de una metodología de diseño y control, estos estudios se realizaron en los años 80.

En Latinoamérica se observó el uso que se ha dado a estos estudios en las normativas propias de cada región que contemplan el diseño de mezclas asfálticas drenantes, mediante adaptaciones realizadas a las condiciones y materiales disponibles en cada región, como países de Chile y Colombia.

1.3 Justificación

La presente investigación se basa en tres justificaciones fundamentales, desde puntos de vista académico, técnico – práctico y social.

Aporte académico

Las mezclas drenantes son poco estudiadas en nuestro entorno académico, sin embargo, al ser un tema de amplia investigación, permite al estudiante explorar nuevas áreas o técnicas para mejorar la cohesión, aumentar su resistencia y vida útil, evitando el desprendimiento de agregados que con el tiempo generan daños grandes.

Aplicación técnica - práctica

Se han diseñado las mezclas asfálticas drenantes en función de su porosidad y resistencia al desgaste evaluada por el ensayo del Cántabro en condiciones húmedas y secas, lo cual permite medir la adherencia ligante-agregado y el comportamiento de la misma en presencia de agua. Este mismo ensayo se ha adoptado por los países que en la actualidad utilizan las mezclas asfálticas drenantes, además pueden definir el grado de permeabilidad que se desea aplicar.

También se evidenciaron que las mezclas drenantes fallan en su mayoría por disgregación, como consecuencia de la falta de cohesión de la mezcla para poder resistir adecuadamente a los esfuerzos de succión y tangenciales generados por el tráfico, en algunos casos, por la mala calidad del ligante asfáltico utilizado o por la porosidad del medio.

Importancia social

Esta investigación es una propuesta inteligente de drenaje y captación de aguas de lluvia, resulta un tema innovador, no imposible de aplicar en nuestra realidad urbana, la información que nos brinde la presente investigación facilitará a las empresas o instituciones cuyas actividades involucren las mezclas asfálticas ya sea en construcción, diseño o simplemente gestión y que se encuentre comprometidas con la seguridad de los usuarios.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Planteamiento del problema

1.4.1.1 Situación problemática

Las carreteras de pavimento flexible se diseñan con pendiente transversal para drenar el agua hacia la respectiva cuneta, sin embargo, durante las lluvias intensas o prolongadas, esta pendiente transversal o bombeo no llega a la superficie para drenar el agua hacia los lados produciendo una película de agua sobre el pavimento, que al filtrarse en este debilita su estructura.

Por lo tanto, las mezclas asfálticas drenantes proporcionan un mejor drenaje del agua, esto significa que debe diseñarse una granulometría que se ajuste a lo requerido por las mezclas drenantes de acuerdo a las características propias de los agregados disponibles en nuestro departamento.

Los pavimentos drenantes no se han implementado ampliamente en nuestro país, una de las posibles razones es que los resultados obtenidos de los diferentes estudios en nuestro medio no se han integrado el procedimiento del diseño que contemplan consideraciones estructurales, geotécnicas, hidráulicas y ambientales.

La necesidad de implementar nuevas tecnologías para evitar inundaciones o evacuar rápidamente las aguas de lluvia, lleva a la presente investigación a determinar el contenido óptimo de asfalto modificado para el diseño granulométrico de permeabilidad porosa.

1.4.1.2 Delimitación de tiempo

El presente trabajo de investigación se realizó en un tiempo de 30 semanas, lo cual se estudió la caracterización de los agregados y el asfalto modificado, para determinar el contenido óptimo de asfalto modificado en mezclas drenantes mediante los ensayos de Marshall y los ensayos de Cántabro seco y húmedo.

1.4.1.3 Delimitación especial

Se usó los laboratorios de hormigones y resistencia de materiales, laboratorio de asfaltos y los equipos disponibles de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.4.1.4 Problema

¿De qué manera se obtiene el contenido óptimo de asfalto modificado en mezclas drenantes?

1.4.2.1 Objetivo general

Analizar la determinación del contenido óptimo de asfalto modificado, con los métodos Marshall y Cántabro, para mezclas drenantes.

1.4.2.2 Objetivos específicos

- ❖ Analizar la información bibliográfica de mezclas drenantes.
- ❖ Caracterizar los agregados pétreos y el cemento asfáltico modificado.
- ❖ Realizar ensayos por el método Marshall de acuerdo a mezclas drenantes.
- ❖ Realizar ensayos del método Cántabro seco y húmedo.
- ❖ Determinar contenido de asfalto modificado más óptimo, en calidad y costo.
- ❖ Establecer las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados.

1.4.3 Hipótesis

El contenido óptimo de asfalto modificado en mezclas drenantes, garantizará el cumplimiento de especificaciones de la norma.

1.4.4 Definición de la variable independiente y dependiente

Las variables independiente y dependiente son:

1.4.4.1 Variable independiente

X = Contenido de asfalto modificado

Tabla 1.1. Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Contenido de asfalto modificado	Método Marshall	Diferentes contenidos de asfalto	1° porcentaje óptimo de asfalto (%)
	Método de Cántabro	Diferentes contenidos de asfalto	2° porcentaje óptimo de asfalto (%)

Fuente: elaboración propia.

1.4.4.2 Variables dependientes

Y = Vacíos, permeabilidad, desgaste por cántabro y estabilidad.

Tabla 1.2. Operacionalización de las variables dependientes

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Vacíos	Densidades real y máxima	Relación de vacíos	Porcentaje de vacíos (%)
Permeabilidad	Infiltración del agua	Tiempo	Permeabilidad (seg.)
Desgaste por cántabro	Desgaste en la máquina de Los Ángeles	Seco	Pérdida por desgaste seco (%)
		Húmedo	Pérdida por desgaste húmedo (%)
Estabilidad	Método Marshall	Resistencia mecánica	Estabilidad corregida (Lb)

Fuente: elaboración propia

1.5 Alcance de la investigación

El alcance de la investigación es tipo experimental con diseño cuasi-experimental descriptiva porque se pretende describir el comportamiento de una mezcla drenante con variaciones de porcentaje de asfalto modificado, y experimental porque se desconoce la mejora que se genera en este tipo de mezclas.

CAPÍTULO II

MEZCLAS ASFÁLTICAS, COMPONENTES

Y DOSIFICACIÓN PARA MEZCLAS

DRENANTES

CAPÍTULO II

MEZCLAS ASFÁLTICAS, COMPONENTES Y DOSIFICACIÓN PARA MEZCLAS DRENANTES

❖ Marco conceptual

2.1 Pavimentos flexibles

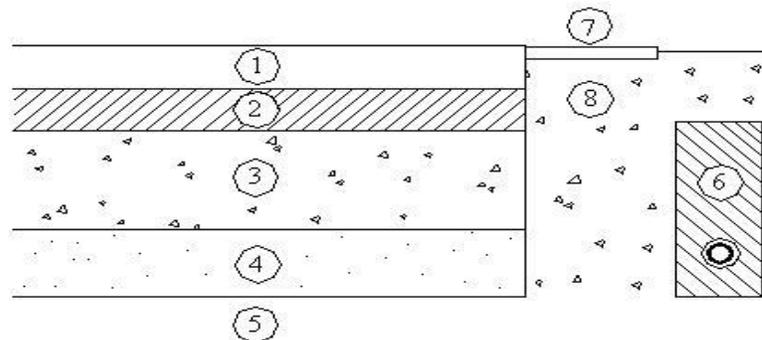
2.1.1 Definición

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

2.1.2 Componentes

En el siguiente esquema se muestra los componentes básicos de un pavimento asfáltico.

Figura 2.1. Componentes de un pavimento flexible



Fuente: Mezclas asfálticas

Donde:

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Capa de rodadura | 5. Subrasante |
| 2. Capa base | 6. Sub-drenaje longitudinal |
| 3. Capa sub-base | 7. Revestimiento de hombreras |
| 4. Suelo compactado | 8. Sub-base de hombreras |

2.2 Mezclas asfálticas

2.2.1 Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua a 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.

2.2.2 Clasificación

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

- ❖ Por fracciones de agregado pétreo empleado.
- ❖ Por la temperatura de puesta en obra.
- ❖ Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.
- ❖ Por el tamaño máximo del agregado pétreo.
- ❖ Por la estructura del agregado pétreo.
- ❖ Por la granulometría.

A continuación, en la tabla 2.1 se presenta un resumen de los tipos parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas:

Tabla 2.1. Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetros de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregados empleados	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semi cerradas ($6\% < h < 12\%$)
	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: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

2.2.3 Componentes

2.2.3.1 Asfalto

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico. El asfalto cambia cuando es calentado a temperatura muy elevada y/o es envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado.

Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

2.2.3.2 Agregado

Agregado, también conocido como roca, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

2.2.4 Características

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

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

2.2.4.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad

de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte 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 del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.2.4.2 Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional.

El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro.

Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

2.2.4.3 Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

Figura 2.2. Ilustración del VAM en una probeta de mezcla compactada

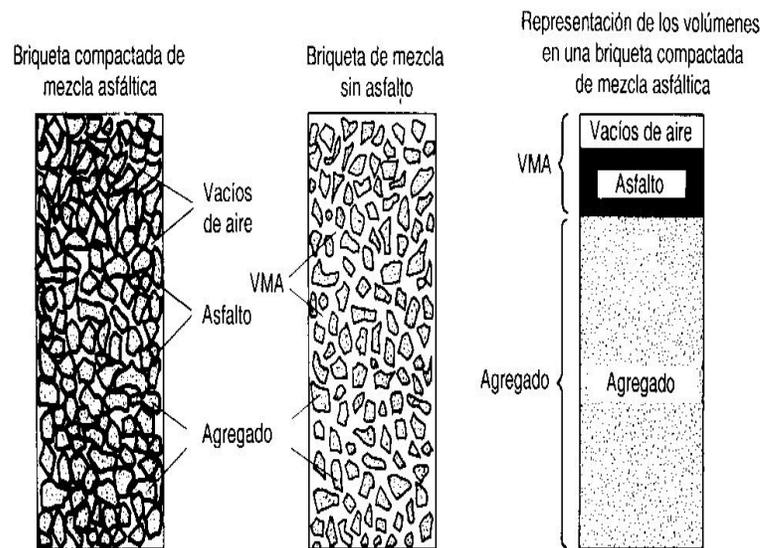


FIGURA 3.1 - Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada (Nota: para simplificar, el volumen de asfalto absorbido no es mostrado).

Fuente: Mezclas asfálticas

Tabla 2.2. Vacíos en el agregado mineral (requisitos de VAM)

Tamices Standard		Tamaño Nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm)	Alternativo	mm	Plg.	
1.18	N° 16	1.18	0.0469	23.5
2.36	N° 8	2.36	0.093	21.0
4.75	N° 4	4.75	0.187	18.0
9.50	3/8	9.50	0.375	16.0
12.50	½	12.50	0.5	15.0
19.00	¾	19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto.

2.2.4.4 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la

cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total. La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (N° 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla. La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

2.2.5 Propiedades

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.2.5.1 Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Cuando no hay agregados disponibles con

características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna. La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en los pavimentos.

Tabla 2.3. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.2.5.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos. Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad. La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan

rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos. Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada. La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 2.4. Causas y efectos de una poca durabilidad

Causa	Efecto
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.2.5.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad.

Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

Tabla 2.5. Causas y efectos de la permeabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto, causarán tempranamente un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.2.5.4 Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar

y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad. Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios. Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla. Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 2.6. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de maneja, poco durable

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.2.5.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

2.2.5.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que

contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Tabla 2.7. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.2.5.7 Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr). Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (38 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a 70 deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla 2.8. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: <http://www.biblioteca.udep.edu.pe>.

2.3 Mezclas drenantes

2.3.1.1 Introducción

En los pavimentos asfálticos diseñados a partir de mezclas cerradas, como se ha venido mencionando, se presentan inconvenientes para los usuarios durante el periodo de lluvias, debido a una serie de circunstancias producto de la acumulación de agua en la superficie de rodadura, las cuales, en muchos países, especialmente en el caso de aquellos con clima tropical, favorecen a la generación de accidentes vehiculares, es por eso que en muchos de estos países, se han desarrollado soluciones para contrarrestar estos problemas, una de ellas ha sido el uso de mezclas asfálticas drenantes, las cuales han sido diseñadas precisamente para el drenaje del agua que se acumula en la superficie a través de la misma.

En este capítulo se abordan las generalidades de este tipo de mezcla, las ventajas y limitantes de su uso, y diversas metodologías que son empleadas en el diseño.

2.3.1.2 Definición

Las mezclas asfálticas drenantes pueden definirse como aquellas cuyo contenido de vacíos es suficiente para permitir que en ella filtre el agua de lluvia con rapidez, y pueda ser evacuada hacia los hombros, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando su permanencia en la superficie de la capa de rodadura, incluso bajo precipitaciones intensas y prologadas.

Existen pequeñas diferencias en cuanto al contenido de vacíos aceptado para considerar una mezcla drenante en los países donde se ha estudiado este tipo de mezclas, en la siguiente tabla se muestran los contenidos de vacíos aceptado por algunos de ellos:

Tabla 2.9. Contenido de vacíos aceptado por algunos países

País	Porcentaje de vacíos (%)	
	Mayor del	Menor del
España	16	25
Chile	18	25
Colombia	20	25

Fuente: “Ingeniería de pavimentos para carreteras” Alfonso Montejo Fonseca (2002).

No se observa un límite inicial definido, realmente este puede parecer arbitrario, con valores inferiores aun al 16% de vacíos en la mezcla, esta puede tener una capacidad drenante apreciable, sin embargo, para que esta capacidad se mantenga durante un periodo de tiempo razonable, es necesario fijar un límite mínimo de partida. Este límite cambia según distintos criterios, pero ello no supone que las distintas normativas se conformen con este porcentaje, lo aconsejable es partir de una porosidad mayor.

Este elevado porcentaje de huecos, se logra mediante el uso de una granulometría especial: un alto porcentaje de agregados gruesos (alrededor del 85%), poco fino y aporte de filler (Ruiz y Muñoz Rojas, 2000). Las mezclas drenantes pueden construirse tanto en caliente como en frío, empleando como ligantes los asfaltos modificados. El uso de las mezclas drenantes o porosas, cambia radicalmente el concepto tradicional de una carpeta de “rodadura impermeable” traspasando la función de proteger de los efectos negativos del agua a la capa subyacente. Esta deberá ser impermeable y con un buen diseño geométrico que asegure el escurrimiento del agua a los drenes laterales y no se infiltre a capas inferiores del camino.

Figura 2.3. Esquema del funcionamiento de una capa drenante



Fuente: Presentación por Arkansas Asphalt Pavement Association, 2006.

2.3.1.3 Ventajas de las mezclas drenantes

Como es bien sabido, la presencia del agua sobre el pavimento dificulta el contacto del neumático con la superficie del pavimento, dando lugar a que se produzcan con mayor facilidad ocasiones para el deslizamiento y vuelco de los vehículos, el objetivo que se busca con este tipo de mezclas es mejorar las condiciones de circulación de vehículos en situaciones de lluvia.

Entre las ventajas:

a) Eliminación del hidropilano

Uno de los mayores riesgos cuando se conduce con lluvia es el hidropilano, esto es, la capa de agua que se forma entre el neumático y el pavimento que rompe el contacto entre ambos, el neumático “flota en el agua” de modo que el conductor pierde el control de su vehículo, la evacuación rápida del agua de la superficie del camino a través de la mezcla drenante impide que se produzca este fenómeno.

Figura 2.4. Hidroplaneo

Fuente: www.circulaseguro.com.

b) Resistencia al deslizamiento con pavimento mojado

Aun cuando no exista el hidroplaneo, la lluvia puede reducir considerablemente la resistencia al deslizamiento de la superficie del camino. Los asfaltos porosos pueden contrarrestar este efecto permitiendo, debido a la macro textura, que exista rozamiento entre el neumático y la superficie de rodadura, de modo que el vehículo realice los movimientos que desea el conductor logrando así una mayor (menor distancia de frenado).

Figura 2.5. Macrotextura de pavimento

Fuente: www.circulaseguro.com.

c) Reducción de las proyecciones de agua

Estas mezclas al permitir mantener la superficie del pavimento libre de agua cuando está lloviendo impiden que se produzca el levantamiento (“splash”) y pulverización (“spray”) del agua al paso de los vehículos mejorando notablemente la visibilidad del usuario.

Figura 2.6. Fenómeno “splash” producido en superficies no drenantes



Fuente: Presentación por Arkansas Asphalt Pavement Association, 2006.

d) Menor deslumbramiento por los faros de los vehículos

Los conductores que circulan en dirección contraria durante la noche, se ven enfrentados al deslumbramiento debido a la reflexión de la luz, en los pavimentos mojados tradicionales (superficie lisa), en cambio, los pavimentos de textura rugosa dispersan la luz y por lo tanto reducen el problema de deslumbramiento permitiendo al conductor ver mejor la señalización horizontal.

e) Reducción del ruido al paso de vehículo

Las mezclas drenantes tienen la capacidad de absorber los ruidos provocados principalmente por el contacto que se produce entre el neumático y el pavimento cuando el vehículo está en movimiento. Los huecos interconectados permiten el paso de aire, atenuando los efectos sonoros. Tanto el conductor, como el entorno, se ven favorecidos por esta reducción.

2.3.2 Asfalto modificado

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

2.3.2.1 Aplicaciones de los asfaltos modificados

Los asfaltos modificados se deben emplear en construcción de carreteras, en aquellos casos específicos en que las propiedades de los asfaltos tradicionales son insuficientes para cumplir con éxito la función que tiene encomendada, es decir en la fabricación de mezclas asfálticas especiales para pavimentos que están sometida a solicitudes excesivas, bien por efecto del tráfico o por otras causas, como temperaturas extremas, agentes atmosféricos, o tipología del pavimento, etc.

Los campos de aplicación más frecuentes de estos materiales son:

- ❖ Mezclas drenantes
- ❖ Mezclas en calientes en capas delgadas
- ❖ Mezclas asfálticas altamente resistentes para capa de rodadura
- ❖ Tratamientos superficiales mediante riego con gravilla

- ❖ Lechadas asfálticas
- ❖ Membrana absorbente de tensiones
- ❖ Mezclas de alto módulo

Solo se abordará las mezclas drenantes, objeto de estudio de esta investigación.

2.3.2.2 Mezclas drenantes

En este tipo de mezclas, se considera que la vida del material está condicionada al grado en que el asfalto se endurece y alcanza el estado en que empieza a presentarse desprendimientos de agregados. Una de las razones de la utilización de polímeros en estas mezclas es la de poder permitir un espesor mayor de la película del asfalto (sin que se produzcan escurrimientos) alargando así la vida del material.

Las mezclas asfálticas drenantes tienen un porcentaje muy elevado de vacíos en la mezcla y una proporción de agregado fino muy baja (inferior al 20% más o menos), por lo que el asfalto debe tener una buena cohesión para evitar la disgregación de la mezcla, además necesita una elevada viscosidad para proporcionar una película de asfalto gruesa envolviendo a los agregados y evitar los efectos perjudiciales del envejecimiento y de la acción del agua en este tipo de mezclas tan abiertas.

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 qué 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 drenantes 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 sollicitaciones a las que la mezcla estará sometida.

2.3.2.3 Las razones de utilizar asfaltos modificados

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y figuraciones dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo estos problemas son causados además por la selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Por ejemplo, con asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta. Además, con asfaltos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Una solución evidente fue mejorar las características de los asfaltos para mejorar su comportamiento en los pavimentos; ello dio origen a nuevos asfaltos que fueron denominados “Asfaltos modificados”.

❖ Marco normativo

2.4 Métodos empleados en el diseño de mezclas asfálticas drenantes

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 qué 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 drenantes 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 sollicitaciones 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 una probeta de mezcla empleando la máquina 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.

2.5 Caracterización de asfaltos mediante el ensayo de 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 drenantes.

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 de dar solución, otros problemas, fueron la falta

de métodos de ensayos que propiciaran 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 o densas, por ejemplo: normalmente, la propiedad más perseguida en mezclas tradicionales (densas) es 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 drenantes:

- ❖ Ensayo cántabro, para medir la pérdida por desgaste utilizando la máquina los Ángeles.
- ❖ Permeámetro de carga variable LCS, para poder verificar los porcentajes de vacíos de 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 obtienen menores pérdidas con la realización del ensayo, cuando se tienen una mayor calidad y un porcentaje acorde de los componentes que proporcionan la cohesión a la mezcla.

2.5.1. Metodología

En esta 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 realizará el análisis del comportamiento de la mezcla.

Se realizan los ensayos especificados (cántabro seco y cántabro húmedo) con el de determinar para qué 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.

2.5.2. 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 drenantes.

2.5.3. Descripción general

El ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se ha diseñado y objeto de estudio, una probeta 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 puede realizarse el ensayo son:

Cántabro seco

La norma NLT-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 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.

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 obtiene pérdidas altas o un índice de aumento de las pérdidas respecto al ensayo de cántabro seco también alto, estaríamos ante un indicativo de una falta de resistencia de la mezcla a la acción del agua. Aspecto no deseable en las mezclas drenantes.

2.5.4. Especificaciones de la metodología

Las recomendaciones más usuales para mezclas drenantes 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 hr, 60 °C) < 40 %
- ❖ Los porcentajes de asfalto con respecto al peso total de la mezcla oscilarán entre 3% y 5%, puesto se espera el contenido óptimo se encuentre en dicho rango.

En los países que poseen normativa referente a mezclas drenantes los rangos granulométricos varían, sin embargo, suele conservarse el TMN de ½”.

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.

2.5.5 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño

El diseño de la mezcla drenantes 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 T 269 – 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 hr, 60 °C) (Norma NLT 352/86)** $< 40 \%$.

La fórmula de trabajo establecida en el laboratorio se podrá ajustar con los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación. Igualmente, si durante la ejecución de las obras varía la procedencia de alguno de los componentes de la mezcla o se rebasan de manera frecuente las tolerancias granulométricas establecidas en la normativa de referencia utilizada, se requerirá el estudio de una nueva fórmula de trabajo.

2.6 Procedimiento de diseño de la mezcla drenante

La normativa con la cual será analizada la mezcla drenante para la presente investigación, será la proporcionada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia. La gradación de los agregados será la siguiente:

Tabla 2.10. Especificación granulométrica para mezcla drenante

Tamiz	Tamaño (mm)	Porcentaje mínimo	Porcentaje máximo
½"	19,0	10	20
3/8"	12,5	14	35
Nº4	9,5	33	50
Nº10	4,75	8	12
Nº40	2,0	5	8
Nº200	0,425	1	3
Pasa Nº 200	0,075	0	4

Fuente: Franja granulométrica para mezcla drenante, artículo 453-07, normativa INVIAS (*) Mezcla Drenante.

Realización del ensayo cántabro:

- ❖ Con la composición granulométrica obtenida en laboratorio basada en la especificación de la tabla 2.10, se preparan un mínimo de tres probetas para cada contenido de asfalto a ser ensayado.
- ❖ 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 conformaran la mezcla, la cantidad total de agregados para cada probeta a fabricar deberá ser de aproximadamente 1000 g, el resto del proceso sigue el mismo que 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 75 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 33 rpm), durante 300 vueltas, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15 y 30°C, con una tolerancia máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$.
- ❖ Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada.
- ❖ En el cántabro húmedo las probetas deberán introducirse en un baño maría por 24 horas a una temperatura de $\pm 60^\circ\text{C}$, 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 probetas.
- ❖ El ensayo cántabro debe realizarse tanto en estado seco como en 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 probeta 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 los agregados pétreos

Al ser una mezcla drenante, por norma, el tamaño máximo de agregado a ser utilizado será de $\frac{3}{4}$ " y el tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ".

Los ensayos que serán utilizados en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- ❖ Granulometría
- ❖ Contenido de humedad
- ❖ Peso específico de los agregados

- ❖ Caras fracturadas
- ❖ Equivalente de arena
- ❖ Desgaste de los Ángeles

2.7.1 Ensayo de granulometría

Se realizó la granulometría de los agregados, los cuales fueron provistos por el banco de San José de Charajas, ya que estos son los más utilizados en el departamento.

- ❖ Se utilizó un juego de tamices estandarizados por la norma ASTM E - 11/95.
- ❖ Se realizó un total de 4 ensayos de granulometrías (1 para la grava $\frac{3}{4}$ ", 1 para la grava $\frac{3}{8}$ ", 1 para el agregado fino arena y 1 para el filler).

2.7.2 Contenido de humedad del agregado grueso y fino

Es la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y se expresa en porcentaje. La muestra que se tomó para realizar el ensayo fue una muestra representativa.

- ❖ Se pesaron 4 bandejas con los agregados (1 con grava $\frac{3}{4}$ ", 1 con gravilla $\frac{3}{8}$ " y 1 con arena y 1 con filler).
- ❖ Se colocaron las muestras en un horno de secado a una temperatura de 120°C durante un periodo de 24 horas.
- ❖ Finalmente se sacaron las bandejas del horno y se pesaron nuevamente.

2.7.3 Peso específico de los agregados

El peso específico de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase.

2.7.4 Caras fracturadas

Algunas especificaciones contienen los requisitos relativos al porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos. Uno de los propósitos de tales requisitos es maximizar la resistencia al corte al aumentar la fricción entre las partículas en cualquier mezcla de agregado dependiente o independiente. Otro propósito es proporcionar una

estabilidad de los agregados en tratamiento de superficies y para proporcionar una mayor fricción y textura de los agregados utilizados en la superficie del pavimento. Especificaciones difieren en cuanto al número de caras fracturadas requerida sobre una partícula fracturada, y también difieren en cuanto a si el porcentaje de la masa o el porcentaje por el número de partículas que se utilizara. Si la especificación ni específica, utiliza el criterio de al menos una cara fracturada y calcular el porcentaje en masa.

Se considera una partícula fracturada a una partícula cuando un 25% o más del área de la superficie aparecen fracturada, y estas fracturas deben ser únicamente producidas mediante procesos mecánicos.

2.7.5 Desgaste del agregado grueso en la máquina de los ángeles

El ensayo de desgaste mediante la máquina de los Ángeles es una medida de desgaste de los agregados mineras de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número especificado de esferas de acero el cual depende de la graduación de la muestra de ensayo. Después del número prescrito de revoluciones, los contenidos son removidos y tomados como porcentaje de pérdida.

Las muestras utilizadas para realizar este ensayo se determinaron en base a la granulometría y corresponden al “tipo B” para la grava y “tipo D” para el agregado fino; obteniendo los siguientes datos para el procedimiento del ensayo:

- ❖ Grava que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ ” y es retenida por el tamiz $\frac{1}{2}$ ” = 2500 gr. “B”.
- ❖ Grava que pasa el tamiz $\frac{1}{2}$ ” y es retenida por el tamiz $\frac{3}{8}$ ” = 2500 gr. “B”.
- ❖ Arena triturada que pasa el tamiz No. 4 y es retenida por el tamiz No. 8. = 2500 gr. “D”.

2.7.6 Equivalente de arena

En este ensayo se pretende producir como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado.

Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante la producción o la colocación. Los resultados se muestran.

2.8 Ensayo de caracterización del cemento asfáltico 85/100

Los ensayos que le fueron realizados al asfalto a ser utilizado en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- ❖ Punto de llama por la copa abierta de Cleveland
- ❖ Penetración de materiales bituminosos
- ❖ Viscosidad cinemática
- ❖ Peso específico
- ❖ Punto de ablandamiento

2.8.1 Punto de llama por la copa abierta de Cleveland

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- ❖ Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y se apagó el ventilador para eliminar corrientes de aire.
- ❖ Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- ❖ Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.

- ❖ Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- ❖ La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- ❖ Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- ❖ Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- ❖ Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- ❖ Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- ❖ Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

2.8.2 Penetración de materiales bituminosos

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

- ❖ La muestra es derretida y enfriada en baño maría aproximadamente 45 min, ya que es asfalto modificado, bajo condiciones controladas a una temperatura de 25 °C. La penetración es medida con un penetrómetro por medio del cual una aguja estándar es aplicada a la muestra bajo condiciones específicas,

generalmente se realiza a 25 °C, con una carga de 100 g, y un tiempo de penetración de 5 segundos.

- ❖ Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- ❖ Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

2.8.3 Viscosidad cinemática Saybolt Furol

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

- ❖ Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140°C.
- ❖ Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). El calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.
- ❖ Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- ❖ Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.
- ❖ Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboco, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- ❖ Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo (± 0.05 °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.

- ❖ Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor.
- ❖ Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

2.8.4 Peso específico del asfalto

- ❖ Lograr que la muestra este a temperatura de ablandamiento.
- ❖ Llenar el picnómetro con agua a 25°C hasta la marca señalada registrar y verter el agua.
- ❖ Añadir el C.A. dentro del picnómetro, las $\frac{3}{4}$ partes del volumen total del picnómetro, a una altura moderada y flujo constante (evitar burbujas de aire), registrar.
- ❖ Dejar reposar la muestra por 1h. aprox. Hasta temperatura ambiente, luego someter a un baño maría a 25 °C por $\frac{1}{2}$ h. aprox.
- ❖ Luego del tiempo señalado, añadir agua a 25°C hasta completar el volumen deseado dentro del picnómetro, registrar y calcular.

2.8.5 Punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez. Este ensayo está basado en la norma AASHTO T 53-96 (2000) con norma equivalente en la norma ASTM D 36-95 o INV 712. Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento del asfalto en un rango de 30 a 157 °C (86 a 315 °F) utilizando el método del anillo y la esfera sumergidos en agua destilada (30 a 80 °C).

Dos discos horizontales de asfalto, vertidos en anillos de bronce, son calentados a una tasa de temperatura controlada en un baño líquido mientras cada disco soporta una esfera de acero con diámetros de 9.5 mm (3/8 pulg), teniendo una masa de 3.50 ± 0.05 g cada una. El punto de ablandamiento es reportado como la temperatura media a la

cual los dos discos se ablandan suficientemente hasta dejar caer cada esfera, envueltas en asfalto, hasta descender a una distancia de 25 mm (1.0 pulg.).

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 para la realización del ensayo 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 $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ ($140 \pm 1.8^{\circ} \text{F}$), deberá

tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2") sobre el fondo del tanque.

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

Tamices: 25 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 12.5 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N° 4), 2.36 mm (N° 8), 300 μ m (N° 50) y 75 μ m (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 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. 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 2.11. Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Transporte medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base					
Criterio de mezcla	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	3 5		5 0		7 5	
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 2.12. Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VAM		
		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 normativo

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 2.13. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T27 ASTM C136	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 T96 ASTM C131	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 T104 ASTM C88	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 T176 ASTM D2419	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	<p>AASHTO T84</p> <p>AASHTO T85</p> <p>ASTM C127</p> <p>ASTM C128</p>	<p>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.</p> <p>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.</p>
Peso unitario y vacío	<p>AASHTO T 19</p> <p>ASTM C 29M</p>	<p>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.</p> <p>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 próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.</p>

Fuente: Instituto de asfalto.

Tabla 2.14. 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 ensayado 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: 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 2.15. Especificaciones del material pétreo para carpetas asfálticas

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).

❖ Marco referencial

2.10 Determinación del porcentaje óptimo de ligante

En el presente trabajo se valoran las distintas metodologías de diseño usadas en mezclas drenantes. Para el desarrollo, se avalúan los agregados y ligantes, y se moldean en laboratorio probetas con porcentajes variables de ligante, conforme a la fórmula de trabajo para cada uno de las metodologías.

La determinación de la resistencia a la tracción indirecta, se realiza usando el equipo de Marshall y la prensa Lottman. Del análisis de los resultados, en esta primera evaluación, se observa que es posible obtener el porcentaje de ligante óptimo para una mezcla drenante, usando una metodología simple y rápida, como lo es la tracción indirecta, que no implica gran inversión ni modificación en equipos, además es adaptable a cualquier laboratorio de obras (O. Rebollo, R. González, G. Botasso).

2.11 Diseño de mezclas drenantes con asfalto modificado

Uno de los principales pavimentos utilizados en la construcción de carreteras es el pavimento asfáltico, más concretamente los de mezclas densas, debido a su buen comportamiento ante las solicitaciones de servicio cuando estas son bien diseñadas, sin

embargo existe problemas que presentan las carreteras construidas con este tipo de mezclas, entre las que podemos mencionar el “Hidroplaneo”; que es un problema típico sobre todo en época lluviosa, donde se ve reducido a la fricción entre la llanta del vehículo con la superficie del pavimento así a aumentar las probalidades de accidentes vehiculares.

Lo anterior ha contribuido a que en el extranjero se desarrollen alternativas en lo que respecta a este problema generado en la superficie del pavimento, dando lugar a la implementación de mezclas asfálticas drenantes las cuales presentan un adecuado comportamiento al tránsito bajo condiciones de diseño adecuado.

El presente trabajo de investigación denominado Diseño de mezclas drenantes con asfalto modificado disponibles en El Salvador, pretende establecer el diseño de una mezcla asfáltica drenante con materiales que se encuentren a disposición en el país, siguiendo, para su desarrollo, los estudios realizados en el extranjero, debido a que no se cuenta con mayor investigación localmente.

El trabajo comprende 6 capítulos, los que en términos generales describen la investigación y el trabajo experimental desarrollado, necesario para establecer la selección de materiales y obtener el diseño de la mezcla al establecer el adecuado proporcionamiento de cada uno de estos, garantizando el cumplimiento de las exigencias requeridas.

En el primer capítulo se establecen las generalidades de la investigación, donde se incluye un poco de la historia acerca del desarrollo que han tenido estas mezclas afuera; en este capítulo se plantea el enfoque de la investigación y la importancia de su desarrollo.

El segundo capítulo comprende el marco teórico sobre las mezclas drenantes, donde se abordan las características, ventajas, desventajas, metodologías de diseño, además de que se toca de manera general, sobre los agentes utilizados para la modificación del asfalto, punto importante para justificar su uso en el desarrollo del trabajo.

El tercer capítulo, se presentan los requerimientos exigidos por la especificación utilizados de los materiales para el diseño, específicamente, los agregados y asfalto, y posteriormente las características de los materiales utilizados.

El cuarto capítulo corresponde al diseño de la mezcla en laboratorio, utilizando la metodología de diseño seleccionado, y los materiales definidos en el capítulo anterior, donde se presenta el análisis realizado a los resultados obtenidos de las pruebas para establecer diseño.

En el quinto capítulo aborda los aspectos más relevantes en comparación con las mezclas tradicionales, en lo que respecta a la fabricación y colocación en campo.

Finalmente se presentan las conclusiones resultantes de la investigación, más concretamente, del trabajo de laboratorio llevado a cabo en el diseño y las recomendaciones del trabajo. (Ayala M. Juarez I. 2010)

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES

DE UNA MEZCLA DRENANTE

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE UNA MEZCLA DRENANTE

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Componentes

❖ **Unidad**

Pavimento flexible.

❖ **Población**

Todo tipo de mezclas asfálticas.

❖ **Muestra**

Mezclas drenantes, con ligante modificado.

❖ **Muestreo**

Este estudio se iniciará con la obtención de los materiales a usar.

El estudio se iniciará con la obtención de los materiales a usar, el cemento asfáltico se lo adquirirá de las instituciones como SEDECA que es parte de la gobernación del departamento y/o de la alcaldía municipal de Cercado, se obtendrá una cantidad de 3 litros aproximadamente. Los agregados grava, gravilla y arena, es proporcionado por SEDECA, de la planta chancadora de San José de Charaja, de donde se extrajo aproximadamente 60 kilos de cada tipo de agregado grueso y 30 kilos de agregado fino; posteriormente se procederá a realizarse una caracterización de los materiales (cemento asfáltico y los agregados) para observar si dichos materiales obtenidos cumplen con las especificaciones establecidas; finalmente, se procederá a la elaboración de muestras para la ejecución de ensayos en laboratorio. Se plantea la realización de 18 briquetas para cada método (Marshall, Cántabro Seco, Cántabro Húmedo), haciendo un total de 54 briquetas.

❖ Tamaño de la muestra de ensayos

El tamaño de muestra de ensayos se calcula a partir de un muestreo aleatorio para una población infinita, aplicando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sum Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Donde:

Z = variable estandarizada para un nivel de confianza del 95% es 1,96.

σ^2 = varianza (0,10 para investigaciones que requieran de 4 a 6 meses de tiempo).

e = margen de error para un NC de 95% es 5% o 0,05.

Tabla 3.1. Tamaño de la muestra

Tipos	Etapas	Ensayos	Ni	G ²	Ni*G ²	Fi	ni
Grava	Caracterización	Granulometría	3	0,1	0,3	0,012	1
		Peso específico	6	0,1	0,6	0,023	3
		Peso unitario	6	0,1	0,6	0,023	3
		Partículas largas y achatadas	3	0,1	0,3	0,012	1
		Caras fracturadas	3	0,1	0,3	0,012	1
		Desgaste de los Ángeles	6	0,1	0,6	0,023	1
Gravilla	Caracterización	Granulometría	3	0,1	0,3	0,012	1
		Peso específico	6	0,1	0,6	0,023	3
		Peso unitario	6	0,1	0,6	0,023	3
		Partículas largas y achatadas	3	0,1	0,3	0,012	1
		Caras fracturadas	3	0,1	0,3	0,012	1
		Desgaste de los Ángeles	6	0,1	0,6	0,023	1
Arena	Caracterización	Granulometría	3	0,1	0,3	0,012	1
		Peso específico	6	0,1	0,6	0,023	3
		Peso unitario	6	0,1	0,6	0,023	3
		Equivalente de arena	6	0,1	0,6	0,023	3
Filler	Caracterización	Granulometría	3	0,1	0,3	0,012	1
		Peso específico	6	0,1	0,6	0,023	3
Asfalto modificado	Caracterización	Penetración	6	0,1	0,6	0,023	3
		Peso específico	6	0,1	0,6	0,023	3
		Punto de inflamación	6	0,1	0,6	0,023	3
		Pérdida de masa	6	0,1	0,6	0,023	3
		Punto de ablandamiento	6	0,1	0,6	0,023	3
		Ductilidad	6	0,1	0,6	0,023	3
Mezcla asfáltica	Para determinar el % óptimo de asfalto	Marshall	30	0,1	3	0,115	18
		Cántabro Seco	30	0,1	3	0,115	18
		Cántabro Húmedo	30	0,1	3	0,115	18
Mezcla asfáltica	Con el % óptimo de asfalto	Cántabro Seco	25	0,1	2,5	0,096	15
		Cántabro Húmedo	25	0,1	2,5	0,096	15
TOTAL			260	-	26	1	136

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla se determina que el siguiente número de muestra:

$$n = \frac{\sum Z^2 * \sigma^2}{e^2} = 136 \text{ ensayos}$$

3.1.2 Métodos y técnicas empleadas

3.1.2.1 Métodos

El método que se usará para esta investigación será el método inductivo, el método inductivo es un proceso utilizado para sacar conclusiones generales, partiendo de hechos particulares; este método se basa en la observación, el estudio y la experimentación de diversos sucesos reales, para poder llegar a la conclusión que involucre a todos esos casos.

Al usar este método, se pretende realizar un estudio sobre ligantes modificados en mezclas drenantes, en distintos porcentajes; para lo cual se realizaran distintos ensayos para un determinado análisis de un contenido óptimo en base a resultados obtenidos de los ensayos, y posteriormente establecer conclusiones basados en resultados de laboratorios.

3.1.2.2 Técnicas

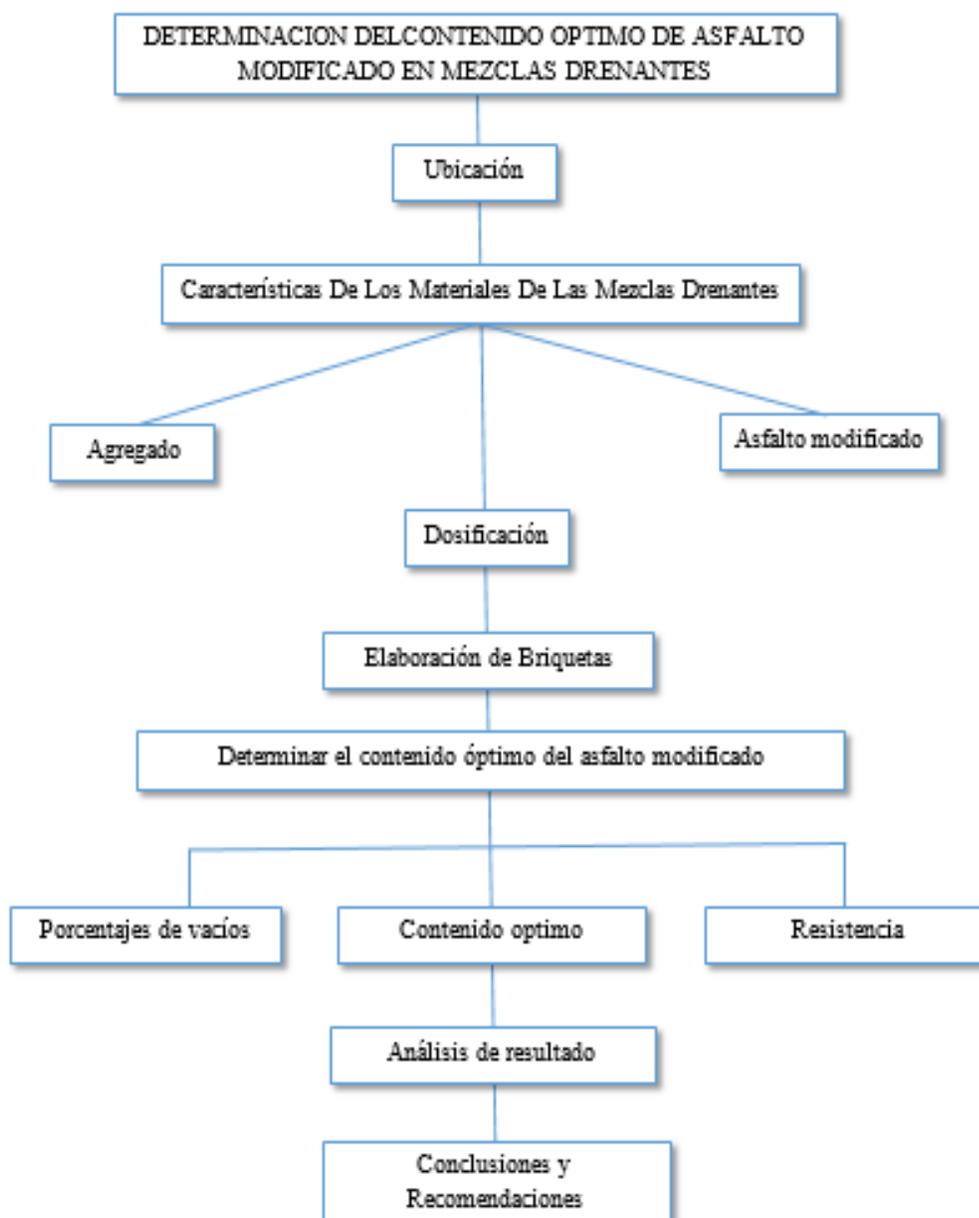
Las técnicas para esta investigación son de carácter experimental a través de varios ensayos. Se realizará ensayos para la caracterización de los materiales de agregado grueso y fino, como también para los asfaltos modificados.

Se desglosará los ensayos para dicha investigación.

3.1.3 Procedimiento de aplicación

A continuación, se describirá el procedimiento del flujograma del estudio de los ligantes modificados en mezclas drenantes.

Gráfico 3.1. Flujograma de aplicación



Fuente: Elaboración propia.

Se ubican los materiales con los que voy a trabajar, luego realizare las características de los materiales que voy a utilizar en las mezclas asfálticas drenantes, donde describiré el banco de materiales, posteriormente hare el muestreo de los materiales, donde explicare como obtuve los agregados como los agregados grueso y fino, como también los ligantes modificados.

Posteriormente se caracterizar los materiales, implica para los agregados, voy a realizar ensayos de granulometría, equivalente de arena, peso unitario del agregado fino y grueso, desgaste por medio de la máquina de los ángeles, peso específico, absorción del agregado fino y grueso.

Luego se caracteriza el asfalto modificado, para ello voy a hacer los ensayos de penetración, peso específico, punto inflamación, punto de ablandamiento, ductilidad y pérdida de masa.

Después se realizan los cálculos para la dosificación de las mezclas drenantes con ligantes modificados, donde determinaré las proporciones de agregados para que cumplan con las especificaciones del Manual de la Administración Boliviana de Carreteras, donde adoptare el contenido óptimo de ligantes modificados para conocer, el contenido óptimo, porcentaje de vacíos y resistencia.

De esta forma se tendrán los resultados de contenidos de agregados y asfalto modificado para 3 briquetas de cada porcentaje de cemento asfáltico, los porcentajes de asfalto modificado son 4%, 4,5% 5%, 5,5%, 6% y 6,5%, haciendo un total de 18 probetas para determinar el contenido óptimo de asfalto modificado en mezclas drenantes para cada método: Marshall, Cántabro Seco y Cántabro Húmedo, haciendo un total de 54 briquetas.

Finalmente se determinan las propiedades como: el porcentaje de vacío, resistencia de las mezclas, fluencia y densidad, utilizando la ecuación de calibración del equipo de Marshall para determinar dichas propiedades; de esta forma poder analizar los resultados de la mezcla, para finalmente establecer las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

3.2 Ubicación de los materiales para la investigación

Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en el departamento de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes, además de tener su disponibilidad.

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las normas ASTM y AASHTO.

3.2.1 Agregados

El banco escogido fue el que dispone SEDECA perteneciente a la Gobernación Departamental de Tarija, ubicada en la comunidad de San José de Charajas, esta planta cuenta con chancadora de agregados pétreos para la realización de pavimento flexible para las vías departamentales.

Se escogieron los siguientes materiales: agregado grueso de 3/4", agregado intermedio de 3/8" y agregado fino pasa tamiz N° 4, para poder obtener una granulometría.

Figura 3.1. Planta separadora San José de Charajas



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Asfalto modificado

El betún como ligante asfáltico C.A. 85-100 de procedencia brasilera, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos analizados en laboratorio de suelos, hormigones y asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Figura 3.2. Asfalto modificado C.A. 85-100



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Caracterización de los agregados

La normativa colombiana “INVIAS”, en el apartado de mezclas drenantes, 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 mostrarán a continuación.

Al ser una mezcla drenante, por norma, el tamaño máximo de agregado a ser utilizado será de 1/2”.

Los ensayos que serán utilizados en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- ❖ Granulometría
- ❖ Peso específico de los agregados
- ❖ Pesos unitarios de los agregados
- ❖ Desgaste de los Ángeles
- ❖ Equivalente de arena

3.3.1 Ensayo de granulometría

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 3.3. Juego de tamices

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

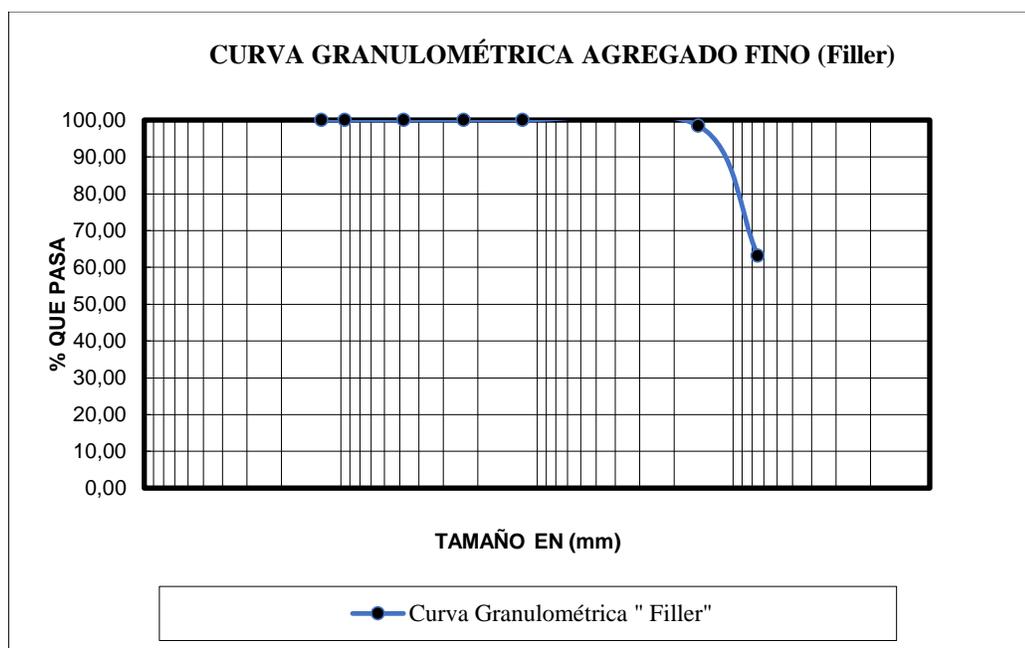
Granulometría del agregado fino “filler”

Tabla 3.2. Resultado de granulometría agregado fino “filler”

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
½	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº16	1,18	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº100	0,15	8,10	8,10	1,62	98,38
Nº200	0,075	176,60	184,70	36,94	63,06
BASE	-	315,30	500,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.2. Curva granulométrica agregado fino “filler”



Fuente: Elaboración propia.

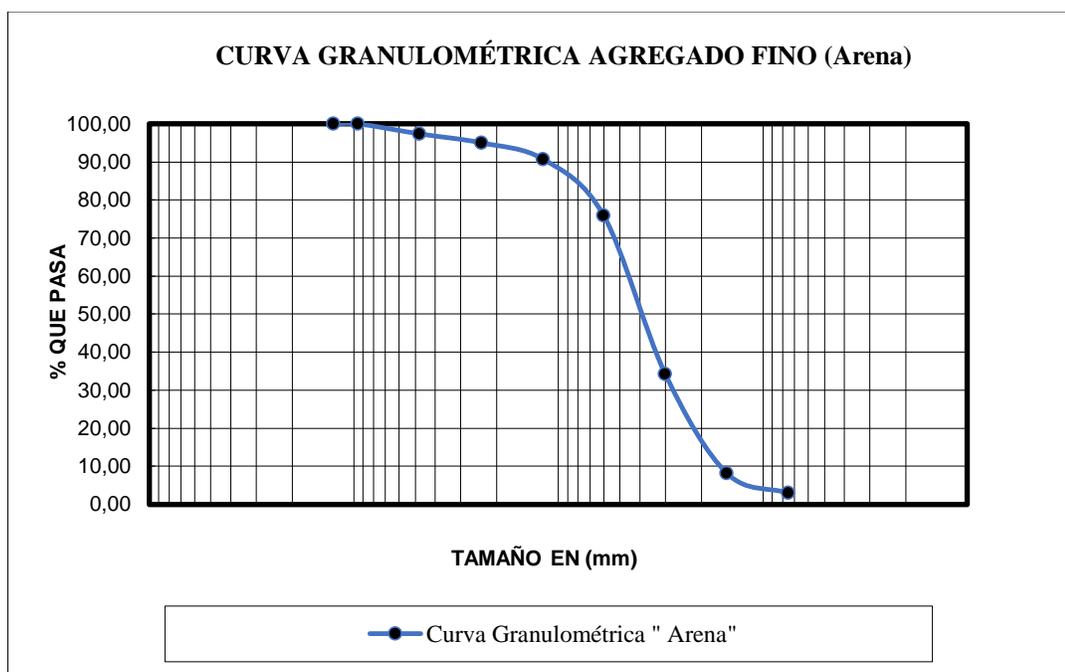
Granulometría del agregado grueso “arena”

Tabla 3.3. Resultado de granulometría agregado fino “arena”

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
½	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	52,80	52,80	2,64	97,36
Nº8	2,36	47,40	100,20	5,01	94,99
Nº16	1,18	86,60	186,80	9,34	90,66
Nº30	0,60	295,70	482,50	24,13	75,88
Nº50	0,30	833,80	1316,30	65,82	34,19
Nº100	0,15	521,50	1837,80	91,89	8,11
Nº200	0,075	103,90	1941,70	97,09	2,92
BASE	-	58,30	2000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3. Curva granulométrica agregado fino “arena”



Fuente: Elaboración propia.

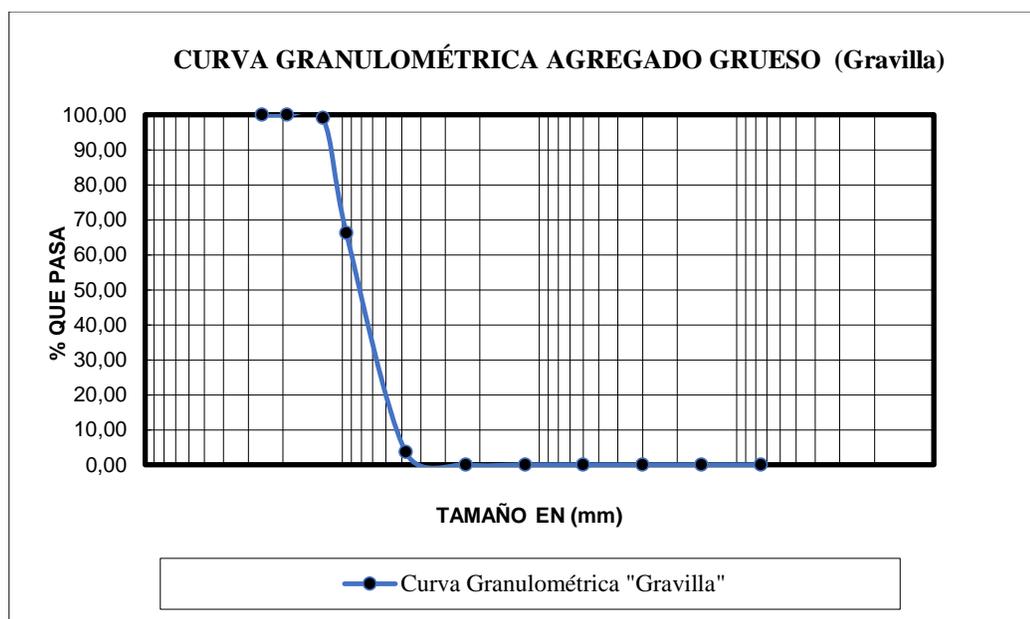
Granulometría del agregado grueso “gravilla”

Tabla 3.4. Resultado de granulometría agregado grueso “gravilla”

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	47,80	47,80	0,96	99,04
3/8"	9,50	1646,30	1694,10	33,88	66,12
Nº4	4,75	3125,50	4819,60	96,39	3,61
Nº8	2,36	180,40	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
BASE	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4. Curva granulométrica agregado grueso “gravilla”



Fuente: Elaboración propia.

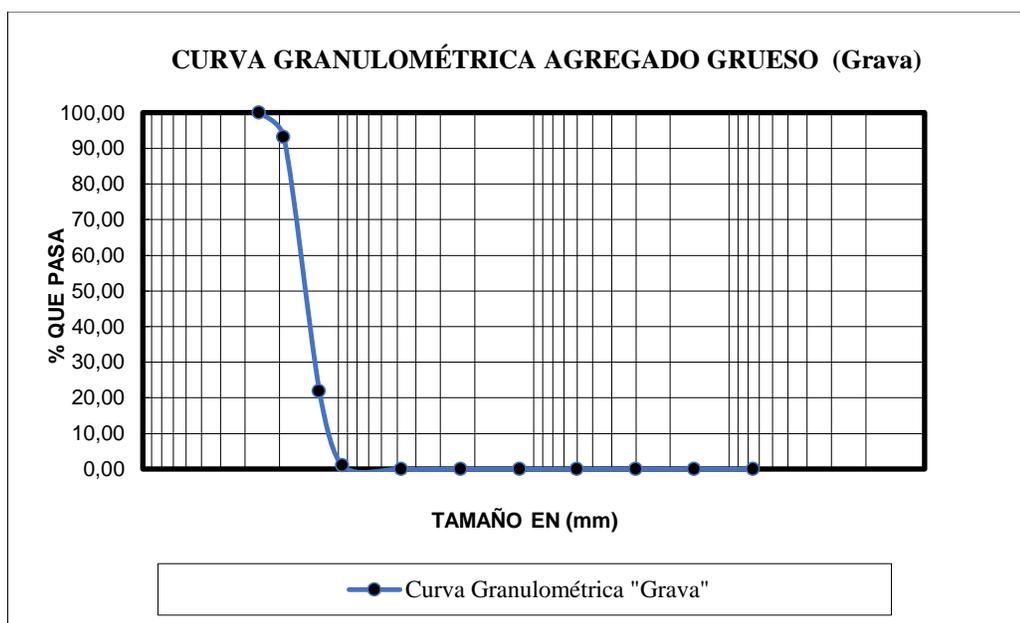
Granulometría del agregado grueso “grava”

Tabla 3.5. Resultado de granulometría agregado grueso “grava”

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	346,30	346,30	6,93	93,07
1/2"	12,5	3559,20	3905,50	78,11	21,89
3/8"	9,50	1046,90	4952,40	99,05	0,95
Nº4	4,75	47,60	5000,00	100,00	0,00
Nº8	2,36	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
BASE	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5. Curva granulométrica agregado grueso “grava”



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Determinación de la densidad de agregados finos

Las normas ASTM E 128 y AASHTO T84-00, tiene como objetivo la determinación de la densidad o peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Figura 3.4. Densidad en áridos finos



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Peso específico - agregado fino “filler”

Tabla 3.6. Resultados peso específico del agregado fino “filler”

P. E. A granel (gr/cm³)	P. E. Saturado con Sup. Seca (gr/cm³)	P. E. Aparente (gr/cm³)	% De absorción
2,20	2,44	2,89	9,74
2,40	2,56	2,86	6,40
2,22	2,44	2,84	8,90
2,27	2,48	2,87	8,35

Fuente: Elaboración propia.

Peso específico - agregado fino “arena”

Tabla 3.7. Resultados peso específico del agregado fino “arena”

P. E. A granel (gr/cm³)	P. E. Saturado con Sup. Seca (gr/cm³)	P. E. Aparente (gr/cm³)	% De absorción
2,47	2,52	2,59	1,92
2,47	2,51	2,58	1,62
2,49	2,53	2,60	1,64
2,48	2,52	2,59	1,73

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Determinación de la densidad real, la densidad de agregados gruesos

En la norma ASTM E 127 y AASHTO T85-91, se tiene por objeto la determinación la densidad real la densidad neta y la filtración de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

Figura 3.5. Realizando la práctica de la densidad del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Peso específico - agregado grueso “gravilla”

Tabla 3.8. Resultados densidad real del agregado grueso “gravilla”

Peso específico A granel (gr/cm ³)	Peso específico Saturado con Sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico Aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2,49	2,56	2,67	2,63
2,53	2,58	2,67	2,08
2,51	2,57	2,67	2,47
2,51	2,57	2,67	2,39

Fuente: Elaboración propia.

Peso específico - agregado grueso “Grava”

Tabla 3.9. Resultados densidad real del agregado grueso “grava”

Peso específico A granel (gr/cm ³)	Peso específico Saturado con Sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico Aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2,57	2,60	2,65	1,14
2,58	2,61	2,66	1,06
2,58	2,61	2,65	1,08
2,58	2,61	2,65	1,09

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Desgaste mediante la máquina de los Ángeles

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 (ASTM E 131; AASHTO T96-99).

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 3.6. Máquina de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 3.10. Según el tamaño de material que se tenga

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		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia.

Datos de laboratorio		
Gradación C		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8"	1/4"	2500
1/4"	Nº 4	2500

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

Tabla 3.11. Resultados del método para determinación del desgaste

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000	3813,5	23,73	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5 Método para determinar el equivalente de arena

El equivalente de arena (ASTM D2419) 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 (Nº 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.

Solución base:

a) Componentes. Emplear los siguientes materiales en las cantidades que se indican:

- 240 g de cloruro de calcio anhidro, grado técnico.
- 1.085 g de glicerina farmacéutica.
- 25 g de formaldehído (solución 40% de volumen / volumen).

b) Preparación. Disolver el cloruro de calcio en 1 l de agua destilada y filtre. Agregar la glicerina y el formaldehído a la solución, mezclar bien y diluir en 2 litros con agua destilada.

Solución para ensayo:

Medir 22,5 ml de la solución base y diluir en 1 litro con agua destilada.

Figura 3.7. Determinación del equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 3.12. Resultados de equivalente de arena (%)

Equivalente de Arena (%)	Norma
93,81	> 50%

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Caracterización del cemento asfáltico

3.4.1 Ensayo de penetración

El ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97) determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

Resumen del método de ensayo

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

Figura 3.8. Muestras de asfalto sometidas a una temperatura de 25 °C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 3.13. Resultados de ensayo de penetración

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100gr, 5 seg.							
Lectura N°1	0,1 mm.	92	90	93	92	85	100
Lectura N°2	0,1 mm.	98	89	99			
Lectura N°3	0,1 mm.	88	85	97			
Penetración promedio	0,1 mm.	93	88	96			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Puntos de inflamación y combustión mediante la copa de Cleveland

El punto de inflamación (ASTM D1310-01; AASHTO T79.96) 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 3.10. Ensayo punto de inflamación por la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Tabla 3.14. Resultados de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	303	288	295	295	232	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Ductilidad de materiales bituminosos

La ductilidad (AASHTO T 51-93; ASTM: D 11379) 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 3.11. Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15. Resultados ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	-	117	106	112	100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Determinación de la densidad específica

La densidad específica de un cemento asfáltico (ASTM D71-94; AASHTO T 229-97) no se indica normalmente en las especificaciones de la obra, pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son:

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.

Figura 3.12. Ensayo de densidad específica con el uso de picnómetro

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16. Resultados de densidad específica

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Densidad específica a 25°C:							
Peso picnómetro	gr.	36,8	35,2	33,6	1,026	1	1,05
Peso picnómetro + Agua (25°C)	gr.	88,4	84,8	85,1			
Peso picnómetro + Muestra	gr.	63,9	64,3	62,5			
Peso picnómetro + Agua + Muestra	gr.	88,9	85,5	86,3			
Densidad específica promedio	gr./cm ³	1,016	1,022	1,040			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento (ASTM D 36; AASHTO T53-96) 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 3.13. Ensayo punto de ablandamiento

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17. Resultados punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	45,0	46,0	43,0	45	41	53

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Diseño de mezclas drenantes

3.5.1 Introducción

Lo anteriormente visto en este proyecto ha sido el estudio de los conceptos sobre las mezclas drenantes 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 de asfalto modificado.

Tabla 3.18. Resumen de la caracterización de asfalto a utilizarse

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración promedio	0,1 mm.	93	88	96	92	85	100
Peso específico promedio	gr./cm ³	1,016	1,022	1,040	1,03	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	303	288	295	295	232	-
Pérdida en masa	gr	0,23	0,17	0,55	0,32	0	1
Punto de ablandamiento	°C	45,0	46,0	43,0	45	41	53
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	-	117	106	112	100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Dosificación de los agregados

La elaboración de una mezcla drenantes 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 gravilla 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 solicitaciones, mantenidas en el tiempo.

En las mezclas drenantes 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 drenantes, de donde se retomará la tabla. Se observan los límites de la especificación granulométrica de dicha normativa a estas mezclas.

Tabla 3.19. Franja granulométrica para las mezclas drenantes

Tamiz	Tamaño (mm)	Porcentaje Mínimo	Porcentaje máximo
½"	19,0	10	20
3/8"	12,5	14	35
Nº4	9,5	33	50
Nº10	4,75	8	12
Nº40	2,0	5	8
Nº200	0,425	1	3
Pasa Nº 200	0,075	0	4

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

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 se obtiene después de una serie de ensayos que permitan cumplir especificaciones de vacíos mayor al 20% y la permeabilidad mayor a 15 min. para realizar la dosificación se trabajó con valores promedios de la franja recomendada por la norma INVIAS, al no cumplir con las especificaciones se jugó con porcentajes próximos al promedio recomendado. Se tomó con tamaño máximo de partícula al material que pasa el tamiz 1/2".

3.5.3 Planilla de la granulometría proyectada

En la siguiente planilla podremos ver detalladamente la granulometría de los agregados a utilizar para dosificación optima de mezclas drenantes.

La dosificación será la siguiente:

Tabla 3.20. Diseño granulométrico final

Granulometría porosa	Porcentajes por tamiz	Porcentaje por tipo de agregado
Tamiz 1/2"	15,79%	15,79% (Grava)
Tamiz 3/8"	23,68%	64,74% (Gravilla)
Tamiz N°4	41,05%	
Tamiz N°10	9,47%	17,48% (Arena gruesa)
Tamiz N°40	6,32%	
Tamiz N°200	1,68%	
Pasa tamiz N°200	2,00%	2,00% (Filler)
Total agregados	100,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

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 granulométricas y cumpla las especificaciones de una mezcla drenante.

3.5.4 Dosificaciones finales

Tabla 3.21. Dosificación para diferentes porcentajes de asfalto

Porcentajes 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)	159,16	158,33	157,51	156,68	155,85	155,02
Peso tamiz 3/8" (gr)	238,71	237,47	236,23	234,98	233,74	232,50
Peso tamiz N°4 (gr)	413,81	411,66	409,50	407,35	405,19	403,04
Peso tamiz N°10 (gr)	95,47	94,97	94,47	93,98	93,48	92,98
Peso tamiz N°40 (gr)	63,75	63,41	63,08	62,75	62,42	62,09
Peso tamiz N°200 (gr)	16,93	16,85	16,76	16,67	16,58	16,49
Peso tamiz pasa N°200 (gr)	20,16	20,06	19,95	19,85	19,74	19,64
Peso total de la briqueta (gr)	1050,00	1050,00	1050,00	1050,00	1050,00	1050,00

Fuente: Elaboración propia.

Con estas dosificaciones, se proceden a realizar briquetas para la determinación del contenido óptimo de asfalto modificado por dos métodos: Marshall, Cántabro seco y Cántabro húmedo.

3.5.5 Número de briquetas para determinar los contenidos óptimos de asfalto

Los porcentajes de cemento asfáltico modificado que se aplicaron al presente estudio son 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6% y 6,5%, haciendo un total de 6 porcentajes de cemento asfáltico modificado y de cada porcentaje se procederá a realizar 3 briquetas haciendo un total de 18 briquetas por cada porcentaje de asfalto modificado.

Por lo tanto, la cantidad final de briquetas es la siguiente:

Tabla 3.22. Total, número de briquetas elaboradas para óptimos

Porcentaje de asfalto modificado	Contenido óptimo N° 1	Contenido óptimo N° 2	
	Método Marshall	Cántabro seco	Cántabro húmedo
4,50 %	3	3	3
5,00 %	3	3	3
5,50 %	3	3	3
6,00 %	3	3	3
6,50 %	3	3	3
Total briquetas por método	18	18	18
	18	36	
Total briquetas	54		

Fuente: Elaboración propia.

3.5.6 Elaboración de briquetas

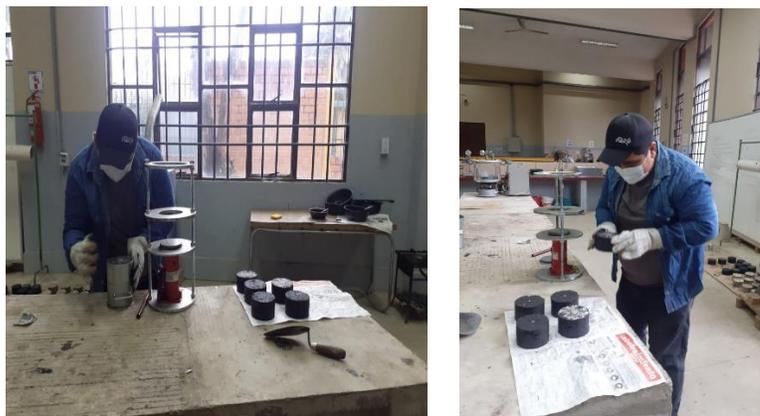
Antes de comenzar con la evaluación de criterios, será necesario hablar sobre la elaboración de briquetas, las cuales se hicieron bajo el procedimiento planteado en la norma AASTHO T-245 con la diferencia que la masa de agregados por biqueta debe ser de 1050 g para mezclas porosas a diferencia de los 1.200 g para mezclas densas.

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.

Se procedió en primer lugar a preparar los materiales con la dosificación de diseño. En un recipiente se fueron pesando sucesivamente las cantidades de las fracciones de tal modo que la cantidad total de árido varía respecto al contenido de cemento asfáltico modificado. Se colocó a continuación el recipiente al horno para calentar la dosificación de agregados a una temperatura de 160 °C.

Se colocó la cantidad de asfalto necesaria para la fabricación de las briquetas en un recipiente y se llevó a una temperatura de 160 °C, de acuerdo a las propiedades del asfalto utilizado cuya temperatura de mezclado y compactación a utilizar es de 170 °C y 160 °C respectivamente.

Figura 3.14. Briquetas tipo Marshall de mezcla drenantes



Fuente: Elaboración propia.

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 3.15. Proceso de mezclado de la mezcla drenante



Fuente: Elaboración propia.

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 pérdida por desgaste” de la normativa INVIAS. Establece que el número de golpes deberá de ser de 75 por cara.

Figura 3.16. Proceso de compactación con el martillo Marshall



Fuente: Elaboración propia.

3.6. Determinación de óptimos de mezclas drenantes por el método Marshall

A partir de la dosificación inicial de la tabla 3.20, se proceden a elaborar las briquetas de la siguiente manera:

Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo la muestra se debe pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergida en agua, antes de su ruptura debe ser sumergidas en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1,8^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Figura 3.17. Briqueta sumergida en agua

Fuente: Elaboración propia.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C (70 a 100°F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero. Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8mm 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 (150°F) se anota como valor de estabilidad Marshall. Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Proceso de cálculo de propiedades mecánicas Marshall de las mezclas asfálticas

Solo se realizará un cálculo demostrativo para la briqueta con el porcentaje de cemento asfáltico modificado igual a 4,00%.

Altura de las briquetas

Se miden las alturas dividiendo a la briketa en cuatro para poder determinar cuatro alturas y sacar un promedio que represente el valor significativo de las alturas, después de haber procedido a la compactación con el martillo de las cuales para el porcentaje de asfalto de 4,00% sus alturas correspondientes son las siguientes:

Tabla 3.23. Alturas medidas de cada briketa

Identificación	Alturas (cm)	Promedio (cm)
1	6,67	6,65
	6,65	
	5,64	
	6,64	
2	6,46	6,44
	6,43	
	6,45	
	6,42	
3	6,48	6,49
	6,49	
	6,48	
	6,51	

Fuente: Elaboración propia.

Base de mezcla y agregado

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briketas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4,0%. Mientras que para la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo.

$$\text{Base de agregado} = \frac{\text{Base de mezcla} * 100}{100 - \text{Base de la mezcla}}$$

$$\text{Base de agregado} = \frac{4,00 * 100}{100 - 4,00}$$

$$\text{Base de agregado} = 4,17$$

Peso de la briqueta en el aire

El peso de la briqueta en el aire consiste en medir su peso una vez desmoldada la misma y limpiada en su superficie.

Tabla 3.24. Peso al aire de las briquetas

Identificación	Peso briqueta en el aire (gr)
1	1161,3
2	1189,5
3	1192,8

Fuente: Elaboración propia.

Peso de la briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.)

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 30 minutos a 25°C.

Tabla 3.25. Peso briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S)

Identificación	Peso briqueta saturada con superficie seca (S.S.S.) (gr)
1	1164,7
2	1190,9
3	1194,9

Fuente: Elaboración propia.

Peso de la briqueta sumergida en el agua

El peso de la briqueta sumergida en agua consiste en medir su peso una vez transcurrido 30 minutos sumergida en agua a 25°C.

Tabla 3.26. Peso briqueta sumergida en agua

Identificación	Peso briqueta sumergida en agua (gr)
1	564
2	582
3	588

Fuente: Elaboración propia.

Volumen de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

$$\text{Vol. de briqueta} = \text{Peso briqueta en el aire S.S.S} - \text{Peso de briqueta sumergida}$$

$$\text{Vol. de briqueta} = 1164,7 - 564$$

$$\text{Vol. de briqueta} = 600,7 \text{ [gr]}$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm^3 se considera:

$$\text{Vol. de briqueta} = 600,7 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Densidad de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

Densidad real de la briqueta

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

$$\text{Densidad real} = \frac{1161,3 \text{ gr}}{600,7 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 1,95 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado}}}$$

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{4,00}{1,026} + \frac{100 - 4,00}{2,70}}$$

$$\text{Densidad máx.} = 2,52 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Porcentaje de vacíos

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$V_v = \frac{\text{Densidad máx} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad máx}} * 100\%$$

$$V_v = \frac{2,52 - 1,95}{2,52} * 100\%$$

$$V_v = 22,71 \%$$

Porcentaje de vacíos de los agregados minerales (V.A.M)

$$V.A.M = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad real promedio}}{\text{Peso específico de asfalto}} + \% \text{ de vacíos (Vv)}$$

$$V.A.M = \frac{4,00 * 1,95}{1,026} + 22,71$$

$$V.A.M = 30,32\%$$

Porcentaje de relación betún vacíos (R.B.V)

$$R.B.V = \frac{V.A.M. - \% \text{ de vacíos (Vv)}}{V.A.M.} * 100$$

$$R.B.V. = \frac{30,32 - 22,71}{30,32} * 100$$

$$R.B.V. = 25,09\%$$

Estabilidad y fluencia

La estabilidad y la fluencia son propiedades medidas a partir de realizar el ensayo en la prensa Marshall.

– **Estabilidad**

A partir del dato de la lectura del dial, se procede a calcular la estabilidad con la siguiente ecuación del anillo de la prensa Marshall:

$$y = -97,477x^2 + 971,07x - 1604,3$$

Tabla 3.27. Datos del ensayo de estabilidad

Identificación	Lectura dial (mm)	Estabilidad (lb)
1	699	847,29
2	523	631,87
3	619	749,37

Fuente: Elaboración propia.

Introduciendo los datos de lectura de dial en milímetros, en la ecuación del anillo, se obtienen los resultados de carga de la estabilidad en lb.

$$\text{Estabilidad} = (0,012 * \text{lectura dial} - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Estabilidad} = (0,012 * 699 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Estabilidad} = 847,29 \text{ lb}$$

Después del cálculo de estabilidad real se procede a corregir por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor corrección de altura}$$

Donde:

Factor de correc. de altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall.

Tabla 3.28. Alturas promedio y factor de corrección por altura

Identificación	Promedio de alturas (cm)	Factor de corrección por altura*
1	6,65	0,93
2	6,44	0,98
3	6,49	0,97

(*) Manual de la ABC vol. 4A tabla A0608_1. Factores de corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASHTO).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.29. Estabilidad corregida

Identificación	Estabilidad (lb)	Factor de corrección por altura	Estabilidad corregida (lb)	Estabilidad promedio corregida (lb)
1	847,29	0,93	791,20	710,67
2	631,87	0,98	671,65	
3	749,37	0,97	723,15	

Fuente: Elaboración propia.

– Fluencia

Las lecturas de fluencia son lecturas directas por lo que sólo se saca un promedio de las tres briquetas estudiadas con el mismo porcentaje.

Tabla 3.30. Resultados de fluencia

Identificación	Fluencia (0,01 pulg)	
	Lectura del dial	Promedio
1	11	11,33
2	12	
3	11	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1 Resultados de propiedades Marshall de las mezclas asfálticas

Después de terminar con el proceso de cálculo para cada tipo de mezcla con su respectivo diseño granulométrico, se obtienen las siguientes tablas:

Resultados de la mezcla asfáltica por el método Marshall

Los resultados de la mezcla son:

Tabla 3.31. Resultados de propiedades Marshall

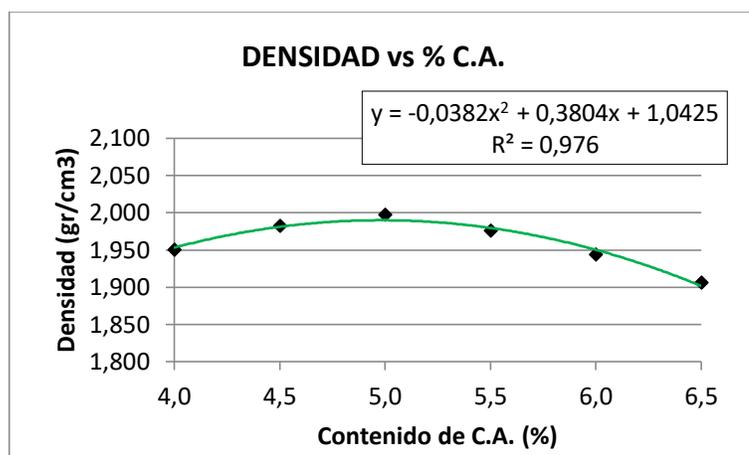
Porcentajes de asfalto modificado	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
4,0	1,951	22,71	30,32	25,09	710,67	11,33
4,5	1,982	20,81	29,50	29,47	789,47	11,00
5,0	1,997	19,55	29,29	33,23	860,50	14,33
5,5	1,976	19,74	30,33	34,92	758,61	16,33
6,0	1,944	19,71	32,03	38,45	689,52	18,67
6,5	1,906	20,62	33,62	38,68	607,48	25,33

Fuente: Elaboración propia.

Obtenido todos estos valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

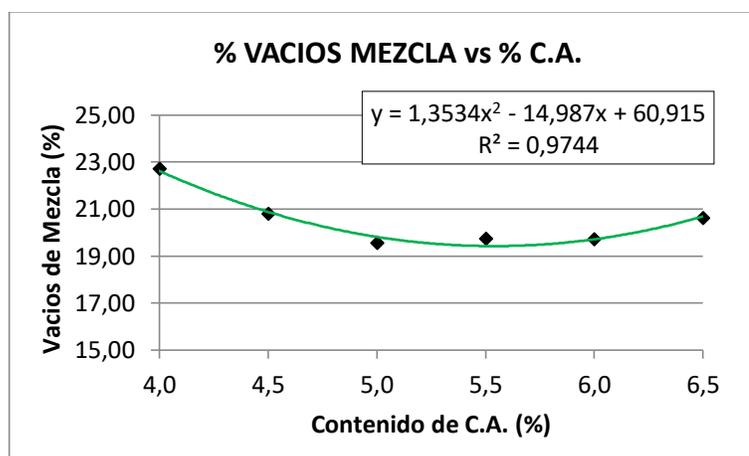
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. densidad de la briqueta.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. vacíos de agregado mineral (V.A.M.)
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. relación betún vacíos (R.B.V.)
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. fluencia (flujo).

Gráfico 3.6. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla

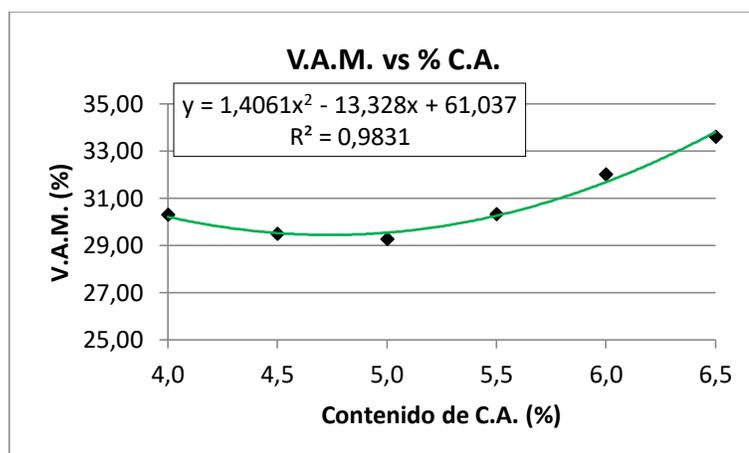


Fuente: Elaboración propia.

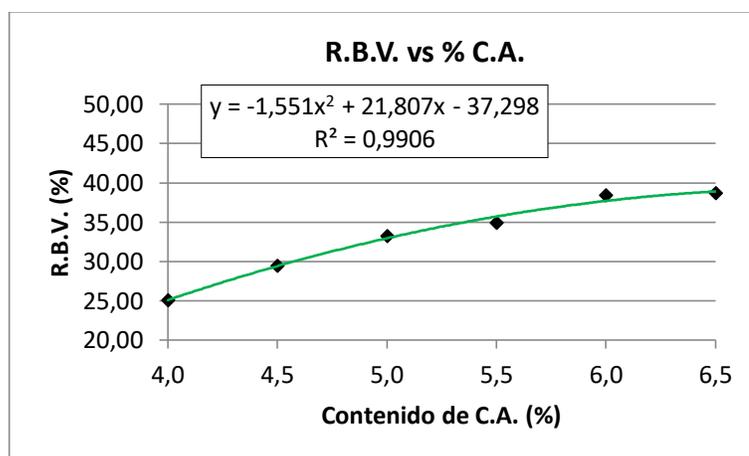
Gráfico 3.7. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla.



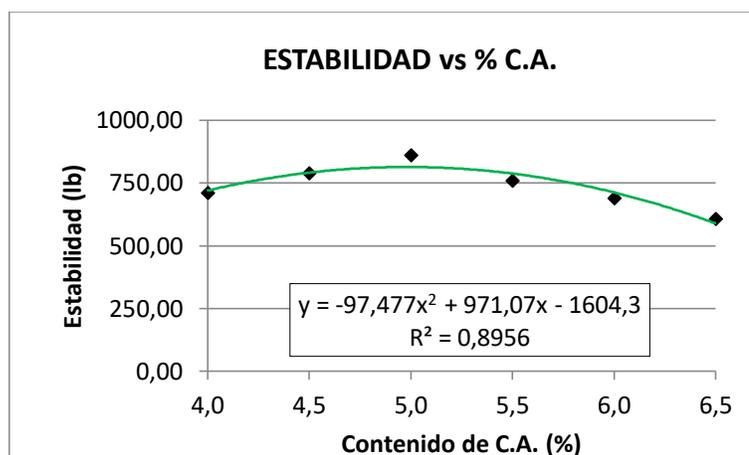
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.8. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla

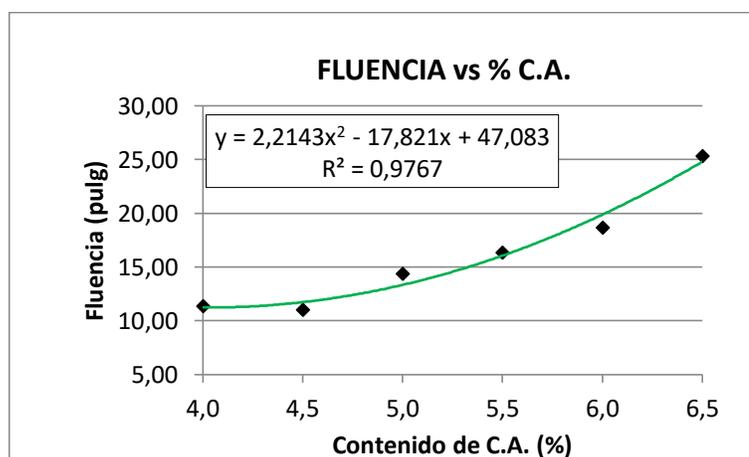
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.10. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.11. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de asfáltico modificado, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 22,5% (promedio de 20% a 25%).

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de asfáltico modificado es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3.32. Resultado de óptimos de C.A. por el método Marshall

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,99	4,98
Estabilidad máxima (Lb)	814,16	4,98
Vacíos de la mezcla (%)	22,50	4,01
% Porcentaje óptimo de C.A. =		4,66

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de asfalto modificado por el método Marshall es 4,66%.

3.7 Determinación de óptimos de C.A. por el método cántabro

En lo que respecta al diseño de mezclas drenantes, las normativas INVIAS, en su aparato sobre mezclas drenantes, 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. La dosificación inicial está dada en la tabla 3.20.

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 ser mínimo de veinte por ciento (20 %), y máximo 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 pérdida 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
- ❖ Cántabro en la máquina de los Ángeles (estado seco)
- ❖ Cántabro en la máquina de los Ángeles (estado húmedo)
- ❖ Permeabilidad

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 20 % o más, que es el caso.

Densidad real

Se determinó la densidad real de 6 briquetas, para cada contenido de asfalto, haciendo un total de 36 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 briqueta geoméricamente, usando la altura y diámetros promedios.

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

Una vez encontrado el volumen para todas las briquetas es posible calcular la densidad de la briqueta para una vez así poder obtener un promedio de densidades.

A continuación, se mostrarán los pasos a seguir para obtener la densidad real, para contenido de asfalto y para efectos de demostración se desarrollará el cálculo para una briqueta.

Por ejemplo:

Datos

Contenido de asfalto = 4.00 %

Peso seco o masa = 1022,5 gr

D promedio = 10,16 cm

H promedio = 6,65 cm

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

$$V_{cilindro} = \frac{\pi * 10,16^2 * 6,65}{4}$$

$$V_{cilindro} = 541.57 \text{ cm}^3$$

Para la densidad:

$$Densidad = \frac{1022,5}{541,57} = 1,89 \text{ gr/cm}^3$$

De la misma manera se determinan las demás densidades:

$$Densidad_1 = 1,89 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_2 = 1,94 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_3 = 1,92 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_4 = 1,92 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_5 = 1,92 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_6 = 1,92 \text{ gr/cm}^3$$

$$Densidad_{PROMEDIO} = 1,92 \text{ gr/cm}^3$$

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.

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:

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

$$Dmt \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = 2,52 \text{ gr/cm}^3$$

Donde:

Dmt = Densidad máxima teórica

%C.A = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico de cemento asfáltico

Gagreg = 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 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 %).

Cálculo de vacíos

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

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

$$Vacíos = \frac{2,52 - 1,92}{2,52} * 100$$

$$Vacíos = 24,06 \%$$

Donde:

Dmt = Densidad máxima específica teórica.

Geb = Gravedad real (promediado).

Resultados del cálculo de densidad y vacíos de las mezclas drenantes:

Tabla 3.33. Resultados de contenido de vacíos de las mezclas drenantes

Briqueta	Porcentaje asfalto en la mezcla	Porcentaje asfalto teórico	Altura promedio de briqueta	Diámetro promedio de briqueta	Volumen de briqueta	Peso seco inicial de briqueta	Densidad Real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de Vacíos
Nº	%	%	cm	cm	cm ³	Gr	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%
1	4,00	4,17	6,68	10,16	541,57	1022,5	1,89	1,92	2,52	24,06
2			6,42	10,16	520,49	1007,9	1,94			
3			6,51	10,15	526,75	1011,7	1,92			
4			6,60	10,15	534,03	1024,6	1,92			
5			6,48	10,16	525,35	1008,3	1,92			
6			6,56	10,15	530,79	1017,2	1,92			
7	4,50	4,71	6,43	10,15	520,27	1022,7	1,97	1,95	2,50	21,98
8			6,67	10,14	538,63	1020,6	1,89			
9			6,38	10,15	516,23	1017,4	1,97			
10			6,29	10,14	507,94	1012,5	1,99			
11			6,33	10,16	513,19	1032,0	2,01			
12			6,65	10,16	539,14	1014,6	1,88			
13	5,00	5,26	6,24	10,16	505,90	1011,1	2,00	1,97	2,48	20,71
14			6,37	10,16	516,44	1009,5	1,95			
15			6,36	10,16	515,63	1005,3	1,95			
16			6,19	10,15	500,86	1001,9	2,00			
17			6,35	10,15	513,80	992,4	1,93			
18			6,17	10,15	499,24	986,2	1,98			
19	5,50	5,82	6,12	10,15	495,19	1018,7	2,06	2,01	2,46	18,45
20			6,21	10,16	503,46	1015,1	2,02			
21			6,38	10,15	516,23	1021,8	1,98			
22			6,57	10,15	531,60	1006,5	1,89			
23			6,16	10,14	497,45	1014,2	2,04			
24			6,09	10,16	493,74	1017,7	2,06			
25	6,00	6,38	6,06	10,16	491,30	1023,1	2,08	2,01	2,44	17,58
26			6,38	10,15	516,23	979,0	1,90			
27			6,21	10,16	503,46	986,8	1,96			
28			6,10	10,15	493,57	1014,3	2,06			
29			6,13	10,16	496,98	1011,6	2,04			
30			6,08	10,15	491,96	1005,5	2,04			
31	6,50	6,95	6,12	10,16	496,17	1013,2	2,04	2,04	2,42	15,91
32			6,04	10,14	487,76	1001,9	2,05			
33			6,23	10,14	503,10	1003,8	2,00			
34			6,11	10,16	495,36	998,4	2,02			
35			6,05	10,16	490,49	1020,3	2,08			
36			6,19	10,15	500,86	1016,2	2,03			
ESPECIFICACIONES				Mínimo						20
				Máximo						25

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Cántabro seco (máquina 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 3.18. Máquina de desgaste de los Ángeles para el método del cántabro



Fuente: Elaboración propia.

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.

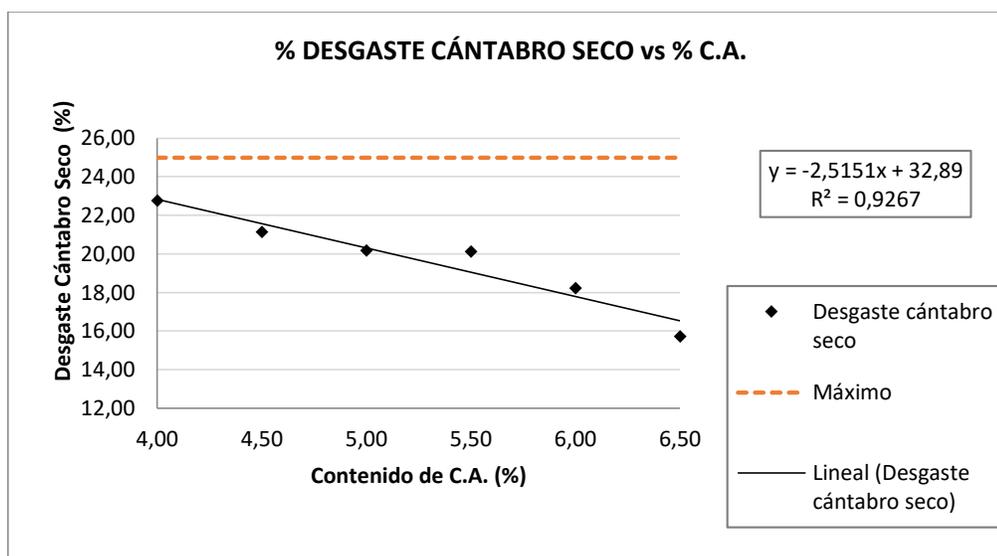
W2 = Masa final de la briqueta, en gramos.

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

Tabla 3.34. Resultados de laboratorio para ensayo cántabro seco

Briqueta	Porcentaje asfalto en la mezcla	Porcentaje asfalto teórico	Desgaste cántabro seco		
			Peso final de briqueta	Cántabro seco	Promedio Cántabro seco
Nº	%	%	gr	%	%
1	4,00	4,17	785,40	23,19	22,77
2			804,70	20,16	
3			759,30	24,95	
7	4,50	4,71	795,00	22,26	21,13
8			812,10	20,43	
9			806,80	20,70	
13	5,00	5,26	785,30	22,33	20,17
14			813,90	19,38	
15			816,40	18,79	
19	5,50	5,82	809,50	20,54	20,11
20			811,20	20,09	
21			820,50	19,70	
25	6,00	6,38	825,40	19,32	18,23
26			802,90	17,99	
27			815,40	17,37	
31	6,50	6,95	844,10	16,69	15,72
32			857,90	14,37	
33			842,30	16,09	
ESPECIFICACIONES			Mínimo	-	
			Máximo	25	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 3.12. Desgaste Cántabro Seco

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Cántabro húmedo (máquina 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:

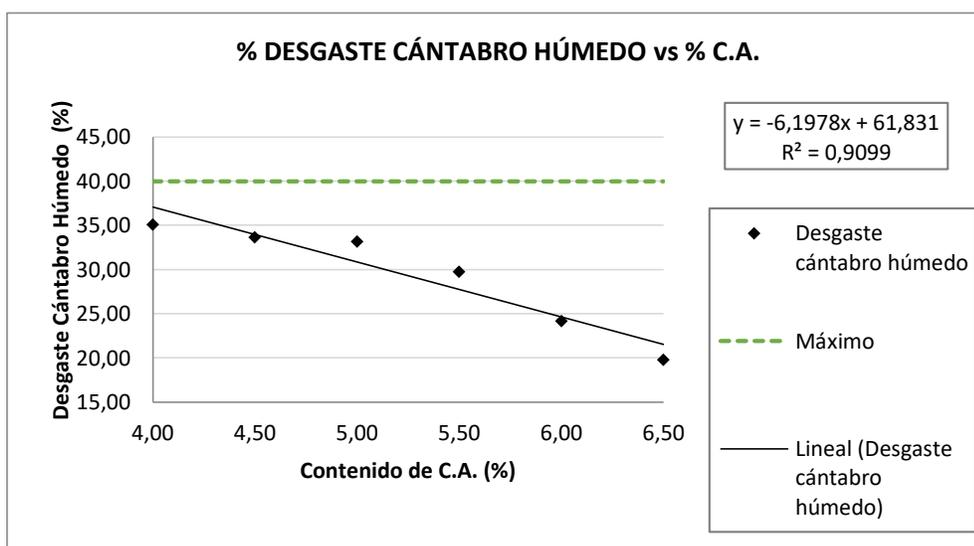
Tabla 3.35. Resultados de laboratorio para ensayo cántabro húmedo

Briqueta	Porcentaje asfalto en la mezcla	Porcentaje asfalto teórico	Desgaste cántabro húmedo		
			Peso final de briqueta	Cántabro húmedo	Promedio Cántabro húmedo
Nº	%	%	gr	%	%
4	4,00	4,17	648,30	36,73	35,11
5			649,50	35,58	
6			681,40	33,01	
10	4,50	4,71	645,80	36,22	33,69
11			688,50	33,28	
12			694,20	31,58	
16	5,00	5,26	672,60	32,87	33,21
17			645,10	35,00	
18			673,00	31,76	

22	5,50	5,82	684,50	31,99	29,76
23			692,40	31,73	
24			757,70	25,55	
28	6,00	6,38	791,00	22,02	24,17
29			802,60	20,66	
30			705,40	29,85	
34	6,50	6,95	815,30	18,34	19,82
35			795,40	22,04	
36			822,40	19,07	
ESPECIFICACIONES			Máximo		-
			Mínimo		40

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.13. Desgaste cántabro húmedo



Fuente: Elaboración propia.

3.10 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 15 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 segundos.

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, 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 3.19. Ensayo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

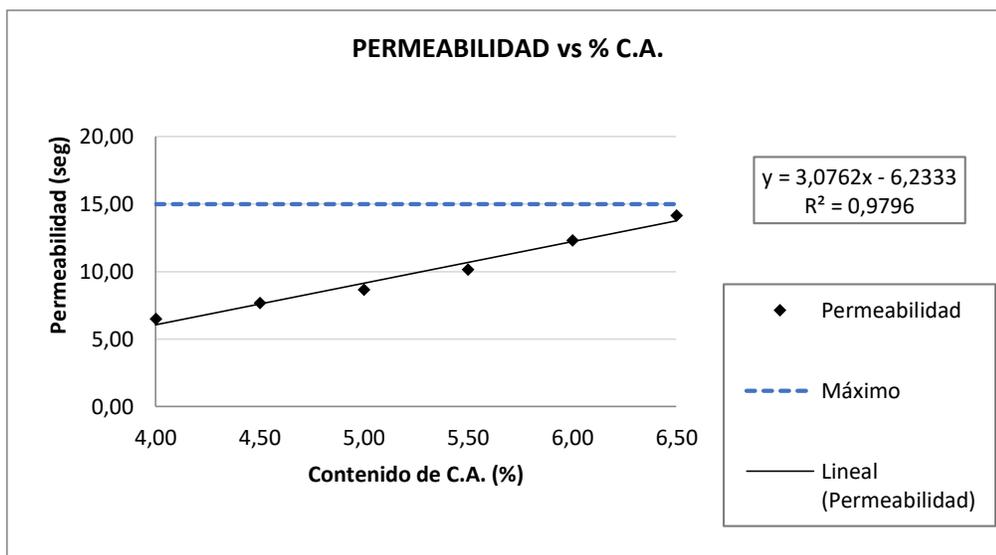
Tabla 3.36. Planilla de resultados de vacíos y permeabilidad

Briqueta	Porcentaje asfalto en la mezcla	Porcentaje asfalto teórico	Permeabilidad	
			Real	Promedio
Nº	%	%	seg	seg
1	4,00	4,17	6	6,50
2			7	
3			7	
4			6	
5			7	
6			6	
7	4,50	4,71	7	7,67
8			8	
9			8	
10			7	
11			8	
12			8	
13	5,00	5,26	8	8,67
14			9	
15			9	
16			9	
17			8	
18			9	

19	5,50	5,82	11	10,17
20			10	
21			9	
22			11	
23			10	
24			10	
25	6,00	6,38	13	12,33
26			12	
27			12	
28			13	
29			12	
30			12	
31	6,50	6,95	15	14,17
32			14	
33			14	
34			15	
35			13	
36			14	
ESPECIFICACIONES			Mínimo	-
			Máximo	15

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.14. Planilla de resultados de vacíos y permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

3.11 Determinación del contenido óptimo de asfalto por el método de cántabro

Una mezcla drenante se caracteriza o clasifica según el porcentaje de vacíos de la mezcla. Por ello a partir de las especificaciones, se obtiene que las mezclas drenantes o porosas

deben tener un porcentaje de vacíos entre 20% al 25% como se observa en la siguiente tabla:

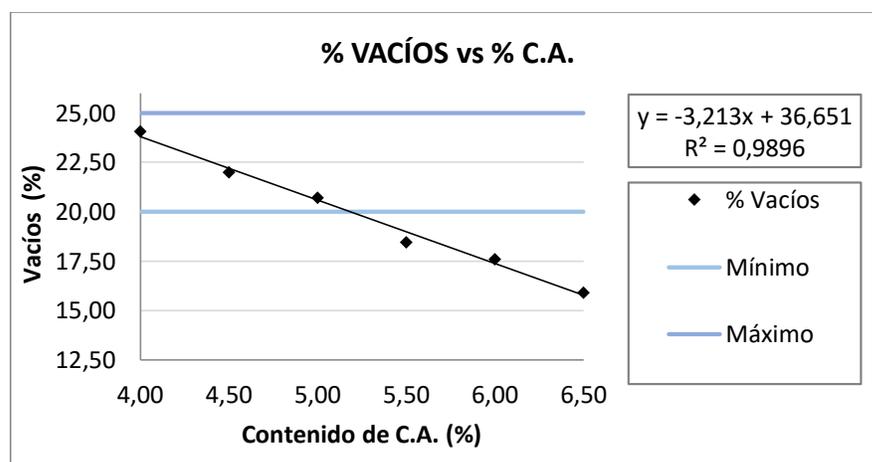
Tabla 3.37. Porcentaje de vacíos para cada porcentaje de asfalto

Porcentajes de asfalto modificado	% vacíos
4,00	24,06
4,50	21,98
5,00	20,71
5,50	18,45
6,00	17,58
6,50	15,91

Fuente: Elaboración propia.

Graficando estos puntos y las especificaciones de la norma, obtenemos el siguiente gráfico:

Gráfico 3.15. Porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto



Fuente: Elaboración propia.

Para conocer los resultados exactos, se aplica una línea de tendencia con un mejor ajuste a la ecuación polinómica de segundo grado como se muestra en la gráfica. El porcentaje de vacíos, como la norma lo indica, varían de 20% a 25%, siendo en algunos casos menor que 20% pero nunca mayor que 25%, contamos con estos dos valores como referencia; de

tal manera que tenemos $y_1 = 20\%$ y $y_2 = 25\%$, valores que podemos sustituir en la ecuación encontrada para poder así obtener valores de porcentaje de asfalto para dichos porcentajes. Sustituyendo obtenemos:

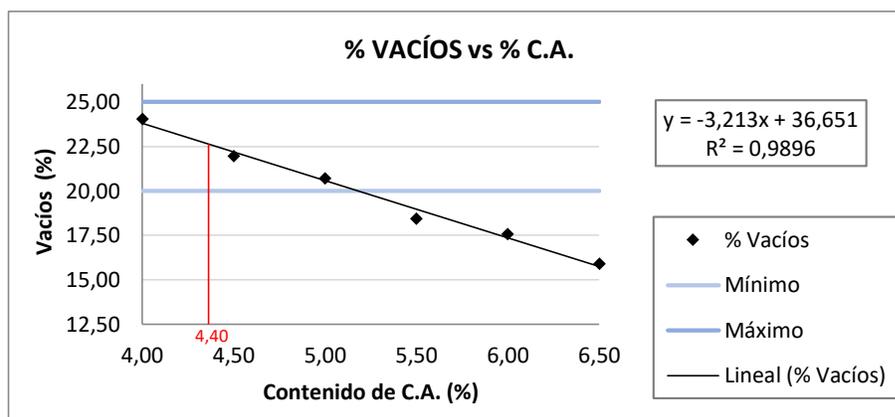
$$\text{Para: } y_1 = 20\% \longrightarrow X_1 = 5.18 \%$$

$$\text{Para: } y_2 = 25\% \longrightarrow X_2 = 3.62 \%$$

Después con el fin de garantizar vacíos del 22.5% (promedio entre 20% y 25%), se promedian los valores de X y se obtiene $X_{\text{prom}} = 4.40 \%$. Por lo tanto, el contenido óptimo de asfalto modificado por el método del cántabro es:

Contenido óptimo $C_{\text{ántabro}} = 4.40 \%$ de asfalto modificado

Gráfico 3.16. Vacíos y su contenido óptimo de C.A. (4.40%)



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se observa el contenido de asfalto modificado óptimo igual a 4,40 %, que es proporcional al promedio de los vacíos establecidos por norma.

3.12 Análisis de los resultados

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio es necesario realizar un análisis de los mismos para poder entender de qué manera puede servir en primera instancia la calidad de los resultados obtenidos.

En el caso de los vacíos es lógico pensar que entre más asfalto tenga la mezcla, pues menor será el contenido de vacíos, o en el ensayo cántabro donde el desgaste se ve condicionado el contenido de asfalto que la mezcla puede contener, ya que es el asfalto el que proporciona estabilidad a la mezcla, y al igual que los vacíos se puede esperar que entre más asfalto contenga la mezcla menos desgaste presenta, y por último la permeabilidad, que de igual forma se debe de esperar que entre mayor sea el contenido de asfalto menor será la permeabilidad.

La tabla siguiente muestra un resumen de manera puntual, de los valores necesarios para obtención del contenido óptimo de asfalto.

Tabla 3.38. Resumen de ensayos

Porcentajes de cemento asfáltico	% vacíos	Cántabro Seco (%)	Cántabro húmedo (%)	Permeabilidad (seg)
4,00	24,06	22,77	35,11	6,50
4,50	21,98	21,13	33,69	7,67
5,00	20,71	20,17	33,21	8,67
5,50	18,45	20,11	29,76	10,17
6,00	17,58	18,23	24,17	12,33
6,50	15,91	15,72	19,82	14,17

Fuente: Elaboración propia.

Al observar los resultados obtenidos efectivamente se observa el comportamiento del porcentaje de vacíos que disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto. También si observamos los resultados de desgaste por cántabro seco y húmedo, se observa que igualmente reducen sus valores a medida que aumenta el contenido de asfalto. Sin embargo, los resultados de permeabilidad, presentan un comportamiento diferente, ya que la permeabilidad aumenta a medida que sube el contenido de asfalto.

Lo siguiente a realizar será encontrar el contenido óptimo de asfalto para que la mezcla presente sus mejores características mecánicas.

Para determinar el contenido óptimo del asfalto se realizaron dos análisis en base a los resultados obtenidos.

3.13. Análisis de cada parámetro del método cántabro

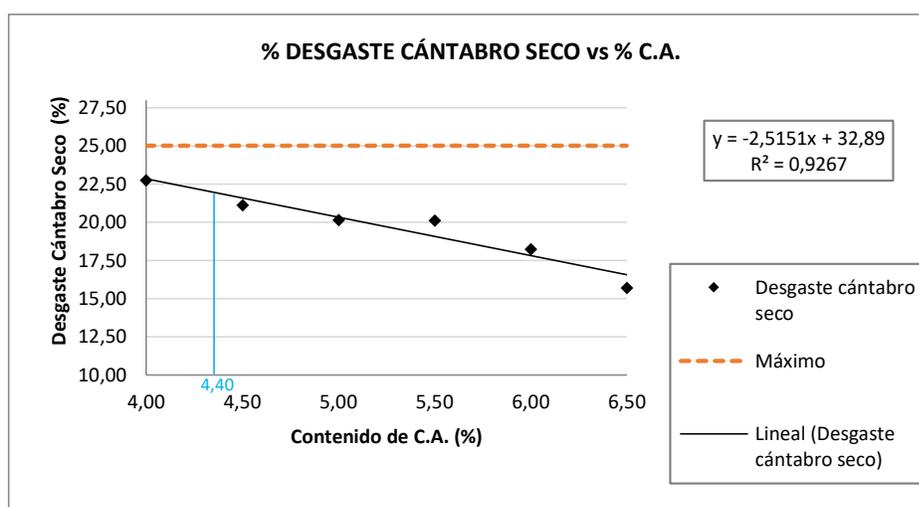
Desgaste por cántabro seco

Se observa que el desgaste por cántabro, está íntimamente relacionado con el porcentaje de asfalto, por ello se puede establecer cuál es el contenido de asfalto necesario para cumplir con el desgaste máximo de 25% en el cántabro seco y luego se puede corroborar el porcentaje óptimo de vacíos a partir de este análisis.

Con un 4,40% de asfalto obtenemos un 22,50 % de vacíos y por lo tanto es un resultado satisfactorio, ya que si incrementamos el porcentaje de asfalto no se cumplirá con el porcentaje de vacíos establecidos por norma para este tipo de mezclas.

El porcentaje de desgaste obtenido es de 21,81%, que está por debajo de 25% permitido para el ensayo de cántabro seco, como muestra en el gráfico.

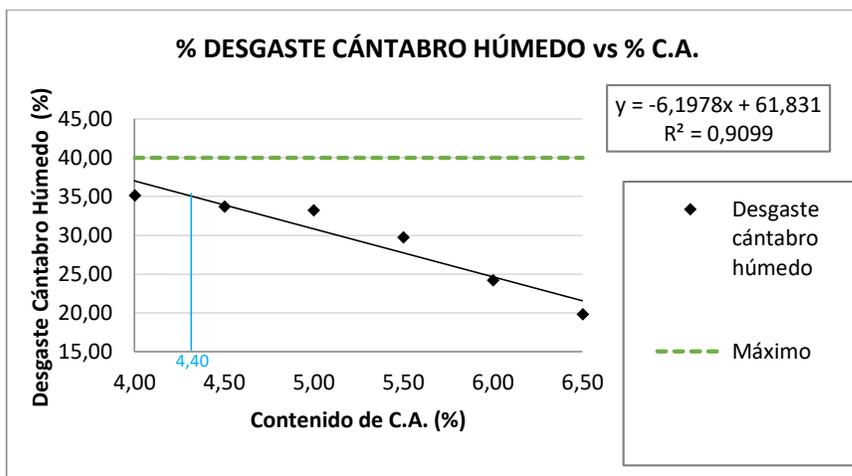
Gráfico 3.17. Ensayo de desgaste cántabro seco (4.40%)



Fuente: Elaboración propia.

Desgaste por cántabro húmedo

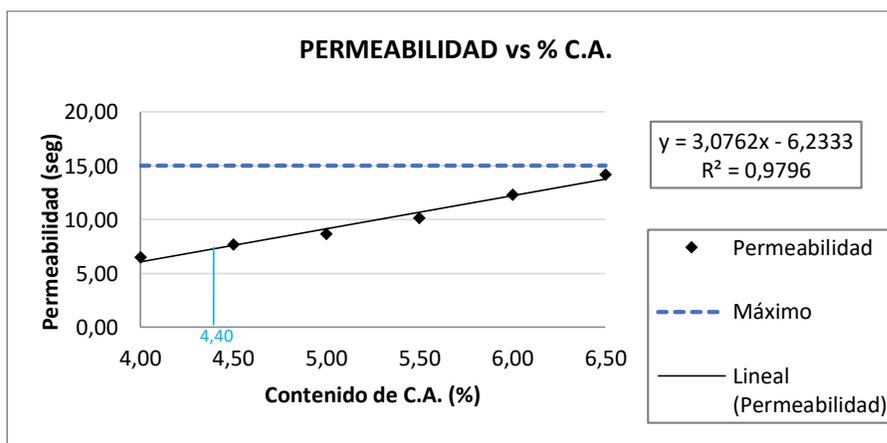
El desgaste para el cántabro húmedo también es aceptable ya con el 34,53% está por debajo de lo permitido por la norma de 40%, lo que indica que la adhesión de los materiales es buena, tal como se muestra en la figura.

Gráfico 3.18. Ensayo de desgaste cántabro húmedo (4.40%)

Fuente: Elaboración propia.

Permeabilidad

Para un contenido de asfalto de 4.40% se obtiene una permeabilidad o tiempo de evacuación de las aguas de 7,32 seg., cumpliendo la norma por ser menor a 15 seg.

Gráfico 3.19. Permeabilidad vs porcentaje de asfalto

Fuente: Elaboración propia.

3.14 Análisis de resultados finales

A continuación, presentamos la tabla de resultados finales obtenidos por los dos métodos estudiados, Marshall y Cántabro, relacionados con las especificaciones de las normas.

Para el método Marshall, se procede a reemplazar el contenido óptimo de asfalto igual a 4,66%, en las ecuaciones de los gráficos: 3.6 (densidades), 3.7 (vacíos de la mezcla) y 3.10 (estabilidades), y se verifican los siguientes resultados:

Tabla 3.39. Resultados finales método Marshall

Ensayo	Especificaciones	Resultado	% de Asfalto modificado	Observaciones
Densidad máxima (gr/cm ³)	Mín. 1,95	1,985	4,66	Cumple
Estabilidad máxima (Lb)	Mín. 600	804,11	4,66	Cumple
Vacíos de la mezcla (%)	20% - 25%	20,47	4,66	Cumple
% óptimo de Asfalto modificado =			4,66	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Por el método Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto modificado se consideraron tres propiedades, densidad máxima, estabilidad máxima y vacíos de la mezcla, cuyos resultados son verificados con las especificaciones de la norma, y todos los resultados obtenidos cumplen las especificaciones, con un contenido óptimo de asfalto modificado de 4,66%.

Para el método Cántabro se procede a reemplazar el contenido óptimo de asfalto igual a 4,40%, en las ecuaciones de los gráficos: 3.16 (vacíos), 3.17 (cántabro seco), 3.18 (cántabro húmedo) y 3.19 (permeabilidad), y se verifican los siguientes resultados:

Tabla 3.40. Resultados finales método cántabro

Ensayo	Especificaciones	Resultado	% de Asfalto modificado	Observaciones
Vacíos de la mezcla (%)	20 mín. - 25 máx.	22,51	4,40	Cumple
Desgaste cántabro seco (%)	25 máx.	21,82	4,40	Cumple
Desgaste cántabro húmedo (%)	40 máx.	34,56	4,40	Cumple
Permeabilidad (seg)	25 máx.	7,30	4,40	Cumple
% Óptimo de Asfalto modificado =			4,40	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Por el método de Cántabro, se verifican los resultados de las propiedades: vacíos de la mezcla, desgaste de cántabro seco, desgaste cántabro húmedo y permeabilidad, dando cumplimiento a especificaciones de la norma, con un contenido óptimo de asfalto modificado de 4,40%.

3.15 Análisis de costos

Para conocer determinar un porcentaje óptimo de asfalto modificado, además de conocer la mejora de sus propiedades físico mecánicas, es necesario saber el costo que proporciona su aplicación en obra. En este caso se analizarán los dos porcentajes obtenidos, tanto por el método Marshall (4,66%) como del método de Cántabro (4,40%).

3.15.1 Cálculo de rendimientos con el 4,66 % de asfalto modificado

Descripción de datos:

Tipo de ligante asfáltico = Asfalto Modificado 85/100

Procedencia del agregado = Charaja

Densidad de la mezcla al 4,66 % = 1.959 (kg/m³)

Volumen de producción por m²:

Unidad = m²

Largo = 1 m

Ancho = 1 m

Espesor = 0,075 m

Volumen compactado = 0,075 m³

Esponjamiento = 35 %

Volumen suelto = 0,101 m³

Dosificación:

Tabla 3.41. Cantidad total de mezcla por m² al 4,66 %

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Asfalto modificado	4,66	9,24
Agregado	95,34	189,11
Total	100,00	198,35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42. Cantidad de agregado por m² al 4,66 %

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	15,79	15,05	29,86	2.653	0,011
Gravilla	64,74	61,72	122,42	2.669	0,046
Arena gruesa	17,48	16,66	33,05	2.589	0,013
Filler	2,00	1,91	3,78	2.590	0,001
Total	100	95,34	189,11	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtienen los rendimientos por m², para cada componente de la mezcla asfáltica:

Tabla 3.43. Rendimiento final por m² de carpeta asfáltica al 4,66 %

Componente	Rendimiento	Unidad
Asfalto modificado	9,24	Kg
Grava	0,011	m ³
Gravilla	0,046	m ³
Arena gruesa	0,013	m ³
Filler	0,001	m ³

Fuente: Elaboración propia.

3.15.2 Cálculo de rendimientos con el 4,40 % de asfalto modificado

Descripción de datos:

Tipo de ligante asfáltico = Asfalto Modificado 85/100

Procedencia del agregado = San José de Charajas

Densidad de la mezcla al 4,40 % = 1.982 (kg/m³)

Volumen de producción por m²:

Unidad = m²

Largo = 1 m

Ancho = 1 m

Espesor = 0,075 m

Volumen compactado = 0,075 m³

Esponjamiento = 35 %

Volumen suelto = 0,101 m³

Dosificación:

Tabla 3.44. Cantidad total de mezcla por m² al 4,40 %

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Asfalto modificado	4,40	8,83
Agregado	95,60	191,85
Total	100,00	200,68

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45. Cantidad de agregado por m² al 4,40 %

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	15,79	15,10	30,29	2.653	0,011
Gravilla	64,74	61,89	124,19	2.669	0,047
Arena gruesa	17,48	16,71	33,53	2.589	0,013
Filler	2,00	1,91	3,84	2.589	0,001
Total	100	95,60	191,85	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtienen los rendimientos por m², para cada componente de la mezcla asfáltica:

Tabla 3.46. Rendimiento final por m² de carpeta asfáltica al 4,40 %

Componente	Rendimiento	Unidad
Asfalto modificado	8,83	Kg
Grava	0,011	m ³
Gravilla	0,047	m ³
Arena gruesa	0,013	m ³
Filler	0,001	m ³

Fuente: Elaboración propia.

Con los rendimientos obtenidos, se procede a realizar el cálculo de los precios unitarios para ambos casos se obtienen la siguiente planilla de precios unitarios de producción de mezcla asfáltica drenante compactada, para 1 m², con un espesor de 7,5 cm (0,075 m).

Tabla 3.47. Precios unitarios de mezcla drenante con 4,66% asfalto modificado

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Asfalto modificado 85/100	Kg	9,24	41,76	385,99
-	Grava triturada clasificada 1/2"	m ³	0,011	120,00	1,35
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,046	130,00	5,96
-	Arena gruesa	m ³	0,013	110,00	1,40
-	Filler	m ³	0,001	130,00	0,19
-	Gasolina	Lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL MATERIALES			(A)	398,08
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	0,84
G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O)=	6,43
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,32
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	30,99
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	435,50
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS	15,50%		(J)	67,50
M	PARCIAL			(J+L)	503,00
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	50,30
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(M+N)	553,30
	PRECIO FINAL				553,30

Fuente: Elaboración propia. (Anexo VI).

Tabla 3.48. Precios unitarios de mezcla drenante con 4,40% asfalto modificado

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Asfalto modificado 85/100	Kg	8,83	41,76	368,73
-	Grava triturada clasificada 1/2"	m ³	0,011	120,00	1,37
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,047	130,00	6,05
-	Arena gruesa	m ³	0,013	110,00	1,42
-	Filler	m ³	0,001	130,00	0,19
-	Gasolina	Lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL MATERIALES		(A)		380,95
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA		(B)		3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	0,84
G	TOTAL MANO DE OBRA		(E+F+O)=		6,43
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,32
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS		(C+H)		30,99
J	SUB TOTAL		(D+G+I)		418,37
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15,50%	(J)	64,85
M	PARCIAL		(J+L)		483,22
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	48,32
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO		(M+N)		531,54
	PRECIO FINAL (Bs.)				531,54

Fuente: Elaboración propia. (Anexo VI).

Con estos resultados podemos analizar el siguiente resultado de costos:

Tabla 3.49. Resultado final de costos

Descripción	Volumen de mezcla compactada para 1 m ² (m ³)	Precio Unitario para 1 m ² (Bs.)	Volumen de mezcla compactada para 1 m ³ (m ³)	Precio Total para 1 m ³ (Bs.)
Carpeta asfáltica drenante al 4,66% de asfalto modificado, espesor 7,5 cm.	0,075	553,30	1,00	7.377,31
Carpeta asfáltica drenante al 4,40% de asfalto modificado, espesor 7,5 cm.	0,075	531,54	1,00	7.087,16

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4.12, se puede evidenciar que para 1 m³ de producción de mezcla asfáltica drenante con el 4,40% de asfalto modificado cuesta 7.087,16 Bs y con el 4,66% cuesta 7.377,31 Bs, lo que implica que la mezcla con el 4,66% es más cara en un 290,14 Bs es decir aumenta un 4,09% en el presupuesto.

Por lo tanto, el porcentaje óptimo de asfalto modificado resulta ser el más económico y que cumple todas las especificaciones de calidad es el 4,40%.

3.16 Validación de resultados con el contenido óptimo asfáltico modificado

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto modificado igual al 4,40%, se procede a aplicarlo en un nuevo diseño de mezcla asfáltica para corroborar si estos valores cumplen con las especificaciones de desgaste por cántabro seco y húmedo, para ello se procede a realizar 30 briquetas con esos parámetros de diseño.

A continuación, los porcentajes finales de agregado en la mezcla son:

Tabla 3.50. Ponderación granulométrica final

Granulometría porosa	Porcentajes por tamiz	Porcentaje por tipo de agregado	Tipo de agregado
Tamiz 1/2"	15,79%	15,79%	Grava
Tamiz 3/8"	23,68%	64,74%	Gravilla
Tamiz N°4	41,05%		
Tamiz N°10	9,47%	17,48%	Arena gruesa
Tamiz N°40	6,32%		
Tamiz N°200	1,68%		
Pasa tamiz N°200	2,00%	2,00%	Filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.51. Dosificación final

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	4,40%
Porcentaje de Agregado (%)	95,60%
Peso del Asfalto modificado (gr)	46,20
Peso tamiz 1/2" (gr)	158,50
Peso tamiz 3/8" (gr)	237,72
Peso tamiz N°4 (gr)	412,09
Peso tamiz N°10 (gr)	95,07
Peso tamiz N°40 (gr)	63,48
Peso tamiz N°200 (gr)	16,86
Peso tamiz pasa N°200 (gr)	20,08
Peso total de la briqueta (gr)	1050,00

Fuente: Elaboración propia.

Los pesos obtenidos tanto de los agregados, como del filler y del asfalto modificado, son en base a los porcentajes de participación dentro de la mezcla asfáltica final.

Tabla 3.52. Resultados finales con los óptimo de asfalto modificado 4,40%

N° de Briqueta	Densidad real	% de vacíos mezcla total	Desgaste por cántabro seco	Desgaste por cántabro húmedo	Permeabilidad
	gr/cm ³	23,45	%	%	seg.
1	1,92	23,40	23,38	-	12,60
2	1,92	21,56	-	35,20	9,50
3	1,97	21,89	24,57	-	10,70
4	1,96	23,85	-	34,03	13,50
5	1,91	23,71	23,30	-	11,20
6	1,91	21,52	-	35,46	14,60
7	1,97	21,30	25,31	-	12,90
8	1,97	21,95	-	32,82	10,00
9	1,96	22,94	24,92	-	9,00
10	1,93	19,72	-	31,71	11,00
11	2,01	21,27	24,71	-	12,00
12	1,97	21,60	-	32,57	13,00
13	1,97	22,73	23,20	-	9,00
14	1,94	22,29	-	34,39	11,00
15	1,95	21,53	22,99	-	13,00
16	1,97	22,10	-	33,54	12,00
17	1,95	23,20	23,39	-	10,00
18	1,93	23,62	-	33,91	10,00
19	1,91	23,90	22,74	-	11,00
20	1,91	22,11	-	32,24	9,00
21	1,95	22,96	23,16	-	12,00
22	1,93	23,21	-	31,57	8,00
23	1,93	23,74	24,80	-	10,00
24	1,91	21,92	-	32,29	9,00
25	1,96	24,62	24,95	-	12,00
26	1,89	23,39	-	32,44	13,00
27	1,92	22,78	22,96	-	12,00
28	1,94	20,89	-	31,70	11,00
29	1,98	20,50	23,09	-	10,00
30	1,99	23,45	-	31,97	11,00
Promedio	1,944	22,46	23,83	33,06	11,10

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos de la estadística descriptiva se realiza la prueba de validación de datos, para cada una de las propiedades de desgaste por cántabro.

Tabla 3.53. Tabla de validación de resultados finales

Propiedades Marshall	Unidad	Valor promedio obtenido	Especificaciones de norma	Validación
Densidad	gr/cm ³	1,944	Mín. 1,85	Cumple
Vacíos de la mezcla	%	22,46	20 - 25	Cumple
Cántabro seco	%	23,83	Máx. 25	Cumple
Cántabro húmedo	%	33,06	Máx. 40	Cumple
Permeabilidad	seg	11,10	Máx. 15	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.53, se observa claramente que los resultados de todas las propiedades Marshall, cumplen todas las especificaciones de la norma, por lo tanto, se validan los resultados obtenidos de la investigación.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Organización de datos estadísticos

Para realizar el análisis estadístico se realizaron 30 briquetas con el óptimo de asfalto modificado igual a 4,40%.

Luego por su mayor importancia, los resultados de Permeabilidad de las 30 briquetas, serán los datos que se considera en el tratamiento estadístico descriptivo e inferencial, como se observa en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos de permeabilidad con el % óptimo de asfalto 4,40%

Nº de Briqueta	Permeabilidad (seg.)	Nº de Briqueta	Permeabilidad (seg.)
1	12,60	16	12,00
2	9,50	17	10,00
3	10,70	18	10,00
4	13,50	19	11,00
5	11,20	20	9,00
6	14,60	21	12,00
7	12,90	22	8,00
8	10,00	23	10,00
9	9,00	24	9,00
10	11,00	25	12,00
11	12,00	26	13,00
12	13,00	27	12,00
13	9,00	28	11,00
14	11,00	29	10,00
15	13,00	30	11,00

Fuente: Elaboración propia.

Luego a partir de la tabla 4.1, se procede a ordenar los datos de menor a mayor, para una mejor observación del comportamiento de los datos.

Tabla 4.2. Datos de Permeabilidad ordenados de menor a mayor

N° de Briqueta	Permeabilidad (seg.)
1 (menor)	8,00
2	9,00
3	9,00
4	9,00
5	9,00
6	9,50
7	10,00
8	10,00
9	10,00
10	10,00
11	10,00
12	10,70
13	11,00
14	11,00
15	11,00
16	11,00
17	11,00
18	11,20
19	12,00
20	12,00
21	12,00
22	12,00
23	12,00
24	12,60
25	12,90
26	13,00
27	13,00
28	13,00
29	13,50
30 (mayor)	14,60

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva proporciona valores que permiten describir el estado de los datos a través de medidas de tendencia central.

Con los datos ordenados se calcula los valores de la estadística descriptiva, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Valores de estadística descriptiva

Media	11,10
Error típico	0,293
Mediana	11,00
Moda	10,00
Desviación estándar	1,602
Varianza de la muestra	2,57
Rango	6,60
Mínimo	8,00
Máximo	14,60
Número de datos	30,00
Número de clases	6,00
Amplitud de intervalos	1,10

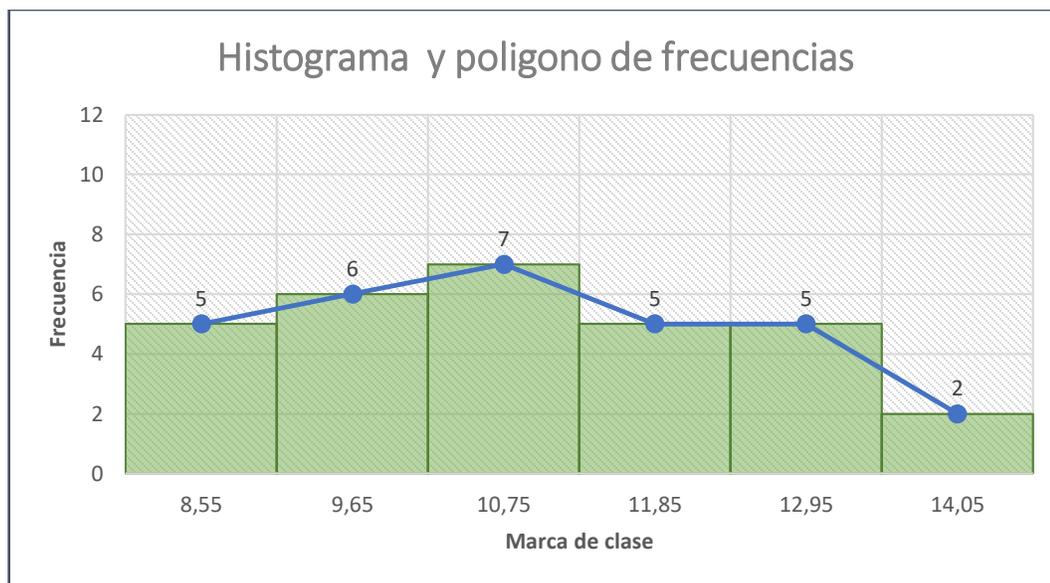
Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado el rango, los valores máximo y mínimo, el número de clases y la amplitud de intervalos, se procede a calcular las frecuencias con sus respectivos histogramas.

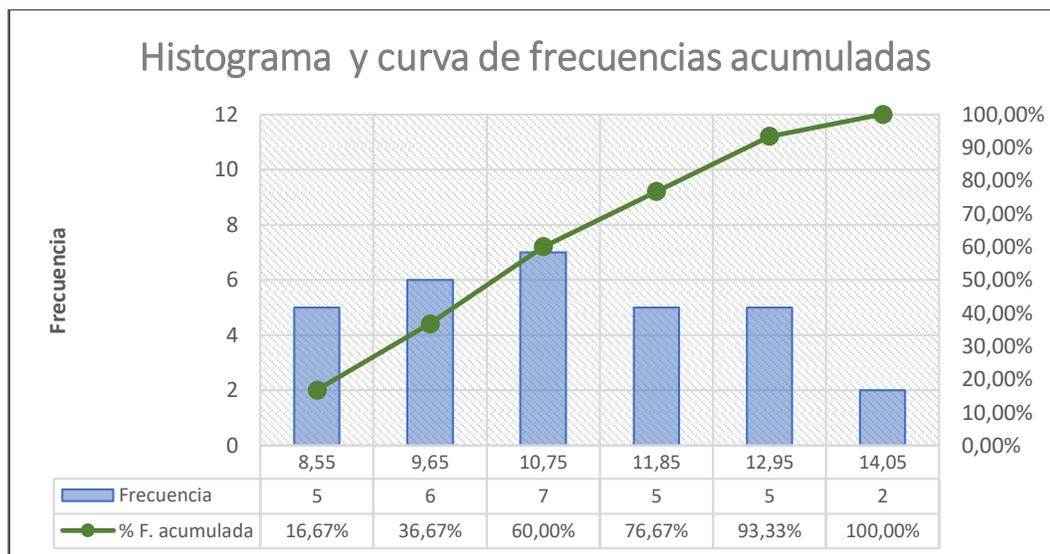
Tabla 4.4. Marca de clase y frecuencias de datos

N° de clase	Intervalos de clase		Marca	Frecuencia observada	F Acumulada	% de F	% F Acumulado
	Límite inferior	Límite superior					
1	8,00	9,10	8,55	5	5	16,67%	16,67%
2	9,10	10,20	9,65	6	11	20,00%	36,67%
3	10,20	11,30	10,75	7	18	23,33%	60,00%
4	11,30	12,40	11,85	5	23	16,67%	76,67%
5	12,40	13,50	12,95	5	28	16,67%	93,33%
6	13,50	14,60	14,05	2	30	6,67%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1. Histograma y polígono de frecuencias

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2. Histograma y curva de frecuencias acumuladas

Fuente: Elaboración propia.

En el histograma se observa la marca de clase con mayor cantidad de datos es la marca igual a 10,75 con 7 datos.

4.1.2. Estadística inferencial

También llamada estadística inductiva, inferencia estadística o teoría de muestras. Abarca un conjunto de procedimientos estadísticos que se utilizan para hacer generalizaciones sobre una población a partir de los datos obtenidos de las 30 muestras analizadas.

Para ello primero se realiza el cálculo de los errores medido de la media:

Tabla 4.5. Cálculo de error

Número de muestras	n = 30
Desviación estándar	S = 1,602
Rango	r = 6,600
Nivel de confianza	NC = 95
	Z = 1,96
Error típico	Ex = 0,293
Error medido de la media	Ex = 0,62
Error probable	Ep = 1,22

Fuente: Elaboración propia.

Después se calculan los intervalos de confianza:

$$Va = X \pm Ep$$

Donde

Va = Intervalo de confianza

X = Media aritmética = 11,1 seg.

Ep = Error probable = 1,22 seg.

$$Va = 11,1 + 1,22 = 12,32 \rightarrow \text{máximo}$$

$$Va = 11,1 - 1,22 = 9,88 \rightarrow \text{mínimo}$$

El intervalo para un nivel de confianza igual al 95 % es de 9,88 seg. a 12,32 seg. de permeabilidad.

Medias poblacionales

La media poblacional se determina a partir de las especificaciones de la norma, donde:

Permeabilidad < 15 seg.

4.2 Prueba de hipótesis

Hipótesis: Con el contenido óptimo de asfalto modificado en mezclas drenantes, se garantiza el cumplimiento de las especificaciones de la norma.

Para dar cumplimiento a la hipótesis donde se desea verificar si los resultados de permeabilidad (propiedad más relevante de la mezcla drenante), cumple con el requerimiento de la norma INVIAS, que especifica que la permeabilidad para una mezcla drenante debe ser menor a 15 segundos. Por lo tanto; las hipótesis son:

Hipótesis aplicando “t de student”:

Hipótesis nula: $\bar{x} \geq \mu_{\min}$

Hipótesis alterna: $\bar{x} < \mu_{\min}$

Para determinar si la hipótesis es alterna o nula se procede a realizar la prueba de hipótesis con el método de Distribución Log. Normal, aplicando la siguiente fórmula:

$$Z_{\text{cálculo1}} = \frac{\bar{x} - \mu_{\min}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{x} = Permeabilidad promedio obtenido de la estadística descriptiva = 11,1 seg.

μ_{\min} = Permeabilidad máxima que establece la norma = 15 seg.

σ = Desviación estándar = 1,602%

n = Número de muestra = 30

$$Z_{\text{cálculo1}} = \frac{11,1 - 15}{\frac{1,602}{\sqrt{30}}}$$

$$Z_{\text{cálculo1}} = -13,33$$

Luego con el nivel de significancia (α) adoptado y los grados de libertad ($GL=n-1$), se obtiene el Z_{tabla} , que debe ser menor al $Z_{\text{cálculo}}$.

Donde:

α = Nivel de significancia para el 95% de probabilidad = 0,05

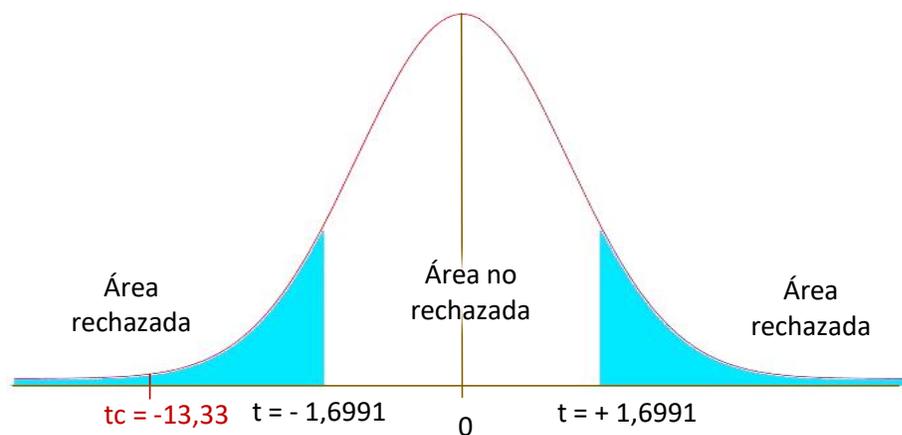
$$GL = n - 1 = 30 - 1 = 29$$

Con estos datos, de tabla se obtiene:

$$Z_{\text{tabla1}} = \pm 1,6991$$

Graficando los resultados obtenemos:

Gráfico 4.3. Distribución de la prueba de hipótesis



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se observa claramente que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Por lo tanto, se cumple la siguiente ecuación:

$$\bar{x} < \mu_{\min}$$

$$11,1 \text{ seg.} < 15 \text{ seg.}$$

¡Cumple!

Prueba de bondad de ajuste

Después realizamos la prueba de bondad de ajuste por el método de Smirnov Kolmogorov, para ello necesitamos los siguientes datos:

Tabla 4.6. Datos para el método Smirnov Kolmogorov

Probabilidad	P =	95%
Nivel de significación	NS =	0,05
Número de datos	n =	30
Error probable	Ep =	1,22 %

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ajuste máximo:

$$\Delta = \frac{1,36}{\sqrt{n}}$$

Donde

Δ = Ajuste máximo propuesto por Smirnov Kolmogorov

n = Número de muestras

$$\Delta = \frac{1,36}{\sqrt{30}} = 0,248$$

Después verificamos la prueba de bondad de ajuste, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Prueba bondad de ajuste por el método Smirnov Kolmogorov

Tipo de medida	Valor	Ajuste máximo (Δ)	¿ $\Delta > \text{Error}$?	Sí = cumple No = no cumple bondad de ajuste
Error probable	0,21	0,248	Sí	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la anterior tabla, los datos obtenidos sí cumplen con la prueba de bondad de ajuste, por lo tanto, nuestros datos son confiables al 95 % de probabilidad de ocurrencia de datos.

4.3 Especificaciones técnicas

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

- ❖ Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos de acuerdo al procedimiento establecido ASTM T-269, deberán ser mínimo de veinte por ciento (20 %), y máximo de veinticinco por ciento (25 %).
- ❖ 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).
- ❖ 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 %).
- ❖ 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.
- ❖ 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 %).

4.3.1 Especificaciones técnicas de los agregados de mezclas drenantes

En la normativa colombiana “INVIAS”, en el apartado de mezclas drenantes, 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 mostrarán 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 puedan darse en la zona de empleo. Tampoco deben dar origen, con el agua, a disoluciones que causen daños a estructuras u otras capas del paquete estructural o contaminar corrientes de agua.

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 presentarán los requisitos que este agregado debe cumplir para ser usado en mezclas drenantes, según las normas publicadas en Argentina, Chile y Colombia.

Tabla 4.8. 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 Drenante del Instituto nacional de Vías de Colombia (Mezcla Drenante).

Agregado fino

El agregado fino es aquel que pasa por 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 5.0×10^6 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.

Relleno mineral (filler)

Se denomina como filler aquella fracción que pasa por la malla N.º 200 según la norma ASTM E-11. Debe proceder de los agregados pétreos o 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 aportación 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 4.9. Franja granulométrica para mezcla drenante

Tamiz ASTM	Tamiz (mm)	MD-1*	
		Especificación inferior	Especificación superior
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	70	100
3/8"	9,5	50	75
Nº 4	4,75	15	32
Nº 10	2	9	20
Nº 30	0,63	5	12
Nº 200	0,075	3	7

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

Lo que se busca es que la curva granulométrica encaje en estos límites, de manera que se pueda obtener un alto contenido de vacíos, además, para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la especificación; el material a ser producido deberá dar lugar a una curva granulométrica sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

4.3.2 Ensayos realizados en los agregados

Al ser una mezcla drenante, por norma, el tamaño máximo de agregado a ser utilizado será de $\frac{3}{4}$ ".

Los ensayos que serán utilizados en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- ❖ Granulometría.
- ❖ Peso específico de los agregados.
- ❖ Peso unitario
- ❖ Equivalente de arena
- ❖ Desgaste de los Ángeles.

Ensayo de granulometría

Se realizó la granulometría de los agregados, los cuales fueron provistos por el banco San José de Charajas, ya que estos son los más utilizados en el departamento.

- ❖ Se utilizó un juego de tamices estandarizados por la norma ASTM E - 11/95.
- ❖ Se realizó un total de 9 ensayos de granulometrías (3 para la grava $\frac{3}{4}$ ", 3 para la grava $\frac{3}{8}$ " y 3 para el agregado fino) para poder tener una granulometría representativa.
- ❖ Los resultados de la misma se encuentran en el Anexo I.

Peso específico de los agregados

- ❖ El peso específico de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase.
- ❖ Los resultados del ensayo en laboratorio se muestran en el Anexo I.

Resistencia al desgaste del agregado grueso en la máquina de los Ángeles

El ensayo de desgaste mediante la máquina de los Ángeles es una medida de desgaste de los agregados mineras de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número especificado de esferas de acero el cual depende de la graduación de la muestra de ensayo. Después del número prescrito de revoluciones, los contenidos son removidos y tomados como porcentaje de pérdida.

Las muestras utilizadas para realizar este ensayo se determinaron en base a la granulometría y corresponden al “tipo B” para la grava y “tipo C” para el agregado gravilla; obteniendo los siguientes datos para el procedimiento del ensayo:

- ❖ Grava que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ ” y es retenida por el tamiz $\frac{1}{2}$ ” = 2500 gr. “B”.
- ❖ Grava que pasa el tamiz $\frac{1}{2}$ ” y es retenida por el tamiz $\frac{3}{8}$ ” = 2500 gr. “B”.
- ❖ Gravilla que pasa el tamiz No. 3/8” y es retenida por el tamiz No. 1/4 = 2500 gr. “C”.
- ❖ Gravilla que pasa el tamiz No. 1/8” y es retenida por el tamiz No. 4 = 2500 gr. “C”.
- ❖ Los resultados se muestran en el Anexo I.

Equivalente de arena

En este ensayo se pretende producir como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado.

Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante la producción o la colocación. Los resultados se muestran en el Anexo I.

4.3.3 Especificaciones técnicas para el asfalto modificado 85/100

Las disposiciones exigidas para el asfalto a ser utilizado es las mezclas asfálticas drenantes por la normativa INVIAS, establecen el uso de asfaltos modificados.

El asfalto que será utilizado en el presente trabajo fue provisto por “SEDECA” y se trata del asfalto BETUNEP CAP 85/100.

Descripción

Se caracteriza por su adherencia, flexibilidad, durabilidad, además de su alta resistencia de los ácidos, sales y álcalis.

Su densidad varía según la temperatura entre los 150°C y 15°C.

El CA disminuye gradualmente su viscosidad a medida que aumenta la temperatura, hasta tener un comportamiento similar de un líquido.

Aplicaciones

El CA 85/100 Modificado actúa como ligante en las mezclas asfálticas en caliente, utilizadas habitualmente en la construcción de pavimentos de alta estándar que deben cumplir con un exigente nivel de servicio y una larga durabilidad. Por su alta penetración, este producto es ideal para utilizar en zonas con climas fríos.

4.3.4 Ensayos realizados para el asfalto modificado 85/100

Los ensayos que le fueron realizados al asfalto a ser utilizado en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- ❖ Método Penetración
- ❖ Método Peso específico
- ❖ Punto de inflamación
- ❖ Pérdida de masa
- ❖ Punto de ablandamiento
- ❖ Ductilidad

Penetración de materiales bituminosos

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

- ❖ La muestra es derretida y enfriada en baño maría aproximadamente 45 min, ya que es asfalto modificado, bajo condiciones controladas a una temperatura de 25 °C. La penetración es medida con un penetrómetro por medio del cual una aguja estándar es aplicada a la muestra bajo condiciones específicas, generalmente se realiza a 25 C, con una carga de 100 g, y un tiempo de penetración de 5 segundos.
- ❖ Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronómetro para medir un tiempo de 5 segundos.
- ❖ Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.
- ❖ Los resultados se muestran en el Anexo II.

Peso específico del asfalto

- ❖ Lograr que la muestra este a temperatura de ablandamiento.
- ❖ Llenar el picnómetro con agua a 25°C hasta la marca señalada registrar y verter el agua.
- ❖ Añadir el C.A. dentro del picnómetro, las $\frac{3}{4}$ partes del volumen total del picnómetro, a una altura moderada y flujo constante (evitar burbujas de aire), registrar.
- ❖ Dejar reposar la muestra por 1h. aprox. hasta temperatura ambiente, luego someter a un baño maría a 25 °C por $\frac{1}{2}$ h. aprox.
- ❖ Luego del tiempo señalado, añadir agua a 25°C hasta completar el volumen deseado dentro del picnómetro, registrar y calcular.
- ❖ Los resultados se muestran en el Anexo II.

Punto de llama por la copa abierta de Cleveland

- ❖ Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:
- ❖ Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas, para eliminar corrientes de aire.

- ❖ Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- ❖ Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- ❖ Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- ❖ La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- ❖ Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- ❖ Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- ❖ Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- ❖ Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- ❖ Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.
- ❖ Los resultados se muestran en el Anexo II.

Pérdida de masa por película delgada

Es un procedimiento que expone una película final a la condición de calor y aire similares a las ocurridas durante el proceso de fabricar en una central de mezcla asfálticas en caliente, con el objeto de evaluar así su envejecimiento inicial.

En el recipiente adecuado se coloca suficiente material para el ensayo y se calienta hasta su condición de fluido.

Se evita la incorporación de burbujas en la muestra.

Se vierten 50 ml. de la muestra sobre cada recipiente.

Se enfría la muestra a temperatura ambiente y se vuelven a pesar la muestra.

Se nivela el horno garantizando que la plataforma gire en un plano horizontal, con el horno al 163 °C se coloca el recipiente con las muestras, se cierra el horno y se hace rotar, se mantiene la temperatura durante 5 horas con 15 minutos.

Al terminar el periodo de calentamiento se sacan las muestras, se enfrían a temperatura ambiente, se calcula la pérdida de peso en base al asfalto modificado contenido en cada recipiente.

Los resultados se encuentran en el anexo II.

Punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez. Este ensayo está basado en la norma AASHTO. Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento del asfalto en un rango de 30 a 157 °C (86 a 315 °F) utilizando el método del anillo y la esfera sumergidos en agua destilada (30 a 80 °C).

Dos discos horizontales de asfalto, vertidos en anillos de bronce, son calentados a una tasa de temperatura controlada en un baño líquido mientras cada disco soporta una esfera de acero con diámetros de 9.5 mm (3/8 pulg), teniendo una masa de 3.50 ± 0.05 g cada una.

El punto de ablandamiento es reportado como la temperatura media a la cual los dos discos se ablandan suficientemente hasta dejar caer cada esfera, envueltas en asfalto, hasta descender a una distancia de 25 mm (1.0 pulg).

Los resultados se muestran en el Anexo II.

Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuánto puede alargarse una muestra de cemento asfáltico antes de que se rompa

El CA modificado deberá ser fundida hasta estar en estado líquido.

Se coloca sobre la placa que debe estar plana y nivelada. Se coloca una capa de glicerina sobre la superficie de la placa, para evitar que el asfalto de pegue.

Se llena el molde con el CA modificado, se deja enfriar a temperatura ambiente entre 30 a 45 min. Pasado el tiempo se coloca en baño maría durante el mismo tiempo.

Se quita el exceso de material de la muestra se coloca la placa y el molde en el baño de agua dentro del aparato de separación, se retira la muestra de la placa quitando además las paredes laterales del molde y sometiendo inmediatamente al ensayo, el agua en el tanque de la máquina de ensayo debe cubrir de la muestra por encima de 10 centímetro, mantener la temperatura.

Se fijan los seguros en cada extremo de uno de los sujetadores en los ganchos de la máquina de ensayo y se separan los dos sujetadores a una velocidad constante especificado hasta que la briqueta se rompa.

Se mide en centímetros entre los dos sujetadores al momento de la ruptura de la muestra.

Los resultados se encuentran en el anexo II.

4.3.5 Especificaciones técnicas para diseño de la mezcla asfáltica drenante

4.3.6 Dosificación de agregados

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 se obtiene después de una serie de ensayos que permitan cumplir especificaciones de vacíos mayor al 20% y la permeabilidad mayor a 15 min. para realizar la dosificación se trabajó con valores promedios de la franja recomendada por la norma INVIAS, al no cumplir con las especificaciones se jugó con porcentajes próximos al promedio recomendado.

Se tomó con tamaño máximo de partícula al material que pasa el tamiz 1/2”.

Planilla de la granulometría proyectada

En la siguiente planilla podremos ver detalladamente la granulometría de los agregados a utilizar para dosificación óptima de mezclas drenantes.

La dosificación será la siguiente:

Tabla 4.10. Diseño granulométrico final

Granulometría porosa	Porcentajes por tamiz	Porcentaje por tipo de agregado
Tamiz 1/2"	15,79%	15,79% (Grava)
Tamiz 3/8"	23,68%	64,74% (Gravilla)
Tamiz N°4	41,05%	
Tamiz N°10	9,47%	17,48% (Arena gruesa)
Tamiz N°40	6,32%	
Tamiz N°200	1,68%	
Pasa tamiz N°200	2,00%	2,00% (Filler)
Total agregados	100,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

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 granulométricas y cumpla las especificaciones de una mezcla drenante.

Dosificaciones finales: pesos retenidos por tamices y su respectivo porcentaje de asfalto.

Tabla 4.11. Dosificación final

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	4,40%
Porcentaje de Agregado (%)	95,60%
Peso del Asfalto modificado (gr)	46,20
Peso tamiz 1/2" (gr)	158,50
Peso tamiz 3/8" (gr)	237,72
Peso tamiz N°4 (gr)	412,09
Peso tamiz N°10 (gr)	95,07
Peso tamiz N°40 (gr)	63,48
Peso tamiz N°200 (gr)	16,86
Peso tamiz pasa N°200 (gr)	20,08
Peso total de la briqueta (gr)	1050,00

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezclas drenantes

En lo que respecta al diseño de mezclas drenantes, las normativas INVIAS, en su aparato sobre mezclas drenantes, establece que este se realizará 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.

4.3.7 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 1050 g para mezclas porosas a diferencia de los 1.200 g para mezclas densas.

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.

Se procedió en primer lugar a preparar los materiales con la dosificación de diseño. En un recipiente se fueron pesando sucesivamente las cantidades de las fracciones de tal modo que la cantidad total de árido varía respecto al contenido de cemento asfáltico modificado. Se colocó a continuación el recipiente al horno para calentar la dosificación de agregados a una temperatura de 160 °C.

Se colocó la cantidad de asfalto necesaria para la fabricación de las briquetas en un recipiente y se llevó a una temperatura de 160 °C, de acuerdo a las propiedades del asfalto utilizado cuya temperatura de mezclado y compactación a utilizar es de 170 °C y 160 °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.

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 pérdida por desgaste” de la normativa INVIAS. Establece que el número de golpes deberá de ser de 75 por cara.

4.3.8 Método Cántabro seco (máquina 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.
- ❖ 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.

4.3.9 Método Cántabro húmedo (máquina 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.

Tabla 4.12. Resultados método cántabro

Ensayo	Especificaciones	Resultado
Vacíos de la mezcla (%)	20 mín. - 25 máx.	22,51
Desgaste cántabro seco (%)	25 máx.	21,82
Desgaste cántabro húmedo (%)	40 máx.	34,56
Permeabilidad (seg)	25 máx.	7,30

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- ❖ Los materiales pétreos a ser utilizados deberán ser cuidadosamente seleccionados con el objeto de cuidar que sean representativos de los mismos y puedan así garantizar una correcta dosificación, ya que, si no se hace esto, puede influir de forma determinante en el trabajo final.
- ❖ La utilización de un asfalto modificado para este tipo de mezclas es muy importante, ya que las partículas necesitan ser envueltas correctamente para que puedan formar una buena estructura y así evitar problemas que se pueden presentar durante la exposición permite del aire y del agua, que son el uso que se les da a este tipo de mezclas.
- ❖ Se realizó la caracterización de los agregados y el asfalto modificado dando como conclusión que el agregado y el asfalto modificado cumplen con las especificaciones técnicas.
- ❖ Realizando la dosificación y computación de resultados de las briquetas, por el método de Marshall obtuvimos el contenido óptimo de asfalto igual a 4,66%, este resultado nos muestra que la mezcla cumple con las características mecánicas de estabilidad y fluencia deseadas para poder ser utilizadas en nuestro departamento.
- ❖ Los resultados obtenidos de las briquetas ensayadas por el método de Cántabro seco y húmedo, obtuvimos un porcentaje de cemento asfáltico modificado de 4,40% para un 22,50 % de vacíos, por lo tanto, es un resultado satisfactorio, de acuerdo a la recomendación de la noma INV 453-07 (INVIAS).

- ❖ Ambos valores óptimos de asfalto modificado fueron sometidos a un análisis de calidad y costo, de donde se obtuvo que el porcentaje más óptimo es el de 4,40%, porque resulta que los resultados obtenidos cumplen la norma y es más económico.
- ❖ El desgaste de cántabro seco estará garantizado por un contenido óptimo de vacíos y este deberá garantizar a su vez el óptimo contenido de asfalto y el porcentaje de los mismos, así como también la permeabilidad de la mezcla.
- ❖ Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de cántabro seco y húmedo nos muestran que gran parte de la cohesión de la mezcla la aporta el asfalto, se observa que hay una variación muy alta entre el 4% al 7% de contenido de asfalto, obteniendo desgastes desde el 21, 81% hasta casi un 34,53 %, lo que indica que la adhesión de los materiales es buena, según la norma.
- ❖ Finalmente analizando el punto de vista económico y técnico, se llega a la conclusión que el contenido óptimo para la mezcla drenante con material pétreo del valle de Tarija y el cemento asfáltico modificado de procedencia brasilera es igual al 4,40 %.

5.2 Recomendaciones

- ❖ Se recomienda utilizar este tipo de mezclas drenantes, en calles y avenidas con problemas de inundaciones, y con tránsito vehicular de tráfico liviano a mediano. Con la finalidad de evacuar en sistemas de drenaje previamente ejecutados. Como por ejemplo el casco viejo de la ciudad de Tarija.
- ❖ Es necesario realizar un estudio técnico y económico, evaluando la aplicabilidad y los beneficios que estas pueden brindar ante determinados problemas.
- ❖ Para el diseño de mezclas drenantes se recomienda tener bastante cuidado en la elección de los agregados que forman parte de la mezcla, ya que los agregados

dependerán si existe buen rozamiento interno, que es la base de una buena resistencia la disgregación.

- ❖ El tamaño máximo del agregado grueso adquirido de la chancadora fue de $\frac{3}{4}$ " , sin embargo, debe de realizarse un estudio con tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ " , y establecerse parámetros de comparación entre estos y así determinar ciertos beneficios.
- ❖ Para este trabajo se ha utilizado el asfalto modificado C.A. 85-100, sin embargo, es necesario realizar estudios con diversos tipos de asfalto y establecer comparaciones.
- ❖ Por la factibilidad y la rapidez de ejecución se recomienda el uso del ensayo de cántabro lo cual es de mayor uso en algunos países latinoamericanos que ya utilizan este tipo de mezclas.
- ❖ La información aquí presentada debe servir como incentivo para desarrollar nuevas investigaciones que amplíen los conocimientos ya adquiridos.