

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Tradicionalmente se considera al asfalto como un material impermeable, cuya reacción ante agentes externos no es significativa. No obstante, las mezclas asfálticas tienen parámetros o variables que determinan su comportamiento aumentando el riesgo a la susceptibilidad por humedad, entre los más comunes se encuentran la condición del sistema de drenaje, la propia estructura del pavimento, el diseño de la mezcla, propiedades del asfalto y el agregado, el uso de aditivos, el servicio que va a prestar y el sitio de colocación, que involucra principalmente el clima y la acción de congelación y descongelación; finalmente, se debe tener en cuenta la variabilidad de construcción.

Uno de los principales mecanismos de daño prematuro para pavimentos flexibles en servicio es por los efectos de la presencia de la humedad. Este fenómeno ocurre principalmente cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo, generado por la pérdida de adhesión y cohesión a causa del ingreso de agua, sus principales consecuencias son el desprendimiento gradual de los agregados y la mezcla de la superficie por acción del tránsito vehicular.

El deterioro causado en las mezclas asfálticas de pavimentación por la presencia de agua ha sido reconocido como una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos. Las causas que generan el fenómeno de daño por humedad son complejas y a pesar del alto número de investigaciones realizadas, las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas e identificadas.

Con el objetivo de estudiar los efectos causados por la humedad en mezclas asfálticas, se han desarrollado varios trabajos al respecto, como en 2017, Aranda Bohm Javiera Paz, realizó el proyecto de grado sobre la “Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente utilizando ensayo de tracción indirecta”, en la universidad técnica Federico Santa María de Chile, donde se evaluó 3 mezclas asfálticas: CA-24, CA-24 más un aditivo de mejoramiento de adherencia, CA-24 más un aditivo de

mejoramiento de trabajabilidad, donde mediante el ensayo a tracción indirecta se evidenció que en la mezcla convencional se observó alto daño, siendo una mezcla inestable para condiciones de estudio y se comprobó que el uso de modificadores mediante aditivos mejoradores aumenta la estabilidad de las mezclas, entregando resultados aceptados por la norma, disminuyendo la sensibilidad de las probetas a la humedad y junto con ello, aumentando la confiabilidad de la vida del pavimento y en 2016, Hidalgo Flores Alberto José y Riera Cedeño Joffre Kevin, realizaron el proyecto de grado sobre el “Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos”, de la universidad católica de Santiago de Guayaquil de Ecuador, donde se utilizó mezclas asfálticas provenientes de 5 plantas de la región Costa del Ecuador, denominadas por las letras A, B, C, D y E, se realizó el estudio del daño por humedad empleando pruebas convencionales (agua hirviendo, tracción indirecta y estabilidad Marshall), y pruebas de desempeño con equipo NAT (módulo de rigidez, fatiga y compresión cíclica), para las pruebas convencionales se obtuvo que: en la prueba de agua hirviendo solo 2 plantas, la D y E, no cumplieron con la exigencia, teniendo porcentaje de despegue inferior al 95%. En las pruebas de tracción indirecta se obtuvieron resultados muy bajos, todos por debajo del 60%, algo inesperado. No obstante, el valor más bajo corresponde a la planta E. En la prueba Marshall los resultados fueron muy particulares para cada una de las plantas. Al respecto, el valor más bajo obtenido lo ofrece la planta E con 58% y el más elevado la planta A con casi el 100% retenido.

La presente investigación evaluó los efectos de la humedad en las mezclas asfálticas convencionales y modificadas bajo diferentes ciclos de saturación, analizó su influencia en las propiedades de las mismas, de tal manera, se generó un análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas, la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al daño por humedad y además se buscó alternativas de soluciones posibles para los daños presentados.

1.2. Justificación

Los daños ocasionados por la humedad en los pavimentos asfálticos es un problema presente en distintos caminos tanto en la ciudad de Tarija como a nivel nacional, siendo más frecuente en los lugares que presenta climas húmedos con periodos de precipitaciones más intensos, de tal manera que dichos daños inciden en las propiedades funcionales de

las mezclas asfálticas como ser: seguridad, comodidad y durabilidad, lo cual afecta directamente a los usuarios que se ven perjudicados al no cumplirse con dichas propiedades funcionales debido a la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas.

Debido a lo mencionado, es necesario que se realicen proyectos que garanticen la seguridad de los usuarios, para ello se analizó las mezclas asfálticas con dos diferentes cementos asfálticos planteados en el tema de investigación, para poder tener un conocimiento claro de la calidad que presenta cada una de ellas, para que en climas húmedos y en épocas de lluvia, no se vean afectados por los agentes climáticos.

En el ámbito académico, realizar la evaluación de los efectos de la humedad en la adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas con diferentes ciclos de saturación resulta beneficioso porque aporta conocimientos sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica por la presencia de humedad y su influencia en dichas propiedades y posibles consecuencias que pueda ocasionar y de esta manera ayudar a desarrollar alternativas de soluciones y recomendaciones que ayuden con dicho problema.

1.3. Planteamiento del problema

La situación problemática de la investigación es la siguiente:

1.3.1. Situación problemática

La presencia de humedad en las mezclas asfálticas ocasiona daños que se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua, disminuyendo la serviciabilidad.

El deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se presenta como la pérdida de recubrimiento del asfalto de la superficie de los agregados, que en caso de no ser tratado con el tiempo puede ocasionar en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico.

Este es un problema general en asfaltos que conlleva a la ocurrencia de fallas prematuras debilitando la estructura de la mezcla y haciéndola más susceptible a cargas cíclicas.

Para contribuir a la obtención de información sobre los daños por humedad en mezclas asfálticas, se debe realizar la evaluación de los efectos que genera la humedad en la adherencia y resistencia de las mismas y contribuir con recomendaciones para los problemas identificados como resultado de la evaluación.

1.3.2. Problema

¿Cómo la evaluación de los efectos que tiene la humedad en la adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, nos puede brindar información acerca de la incidencia que tiene la humedad en las mismas?

1.4. Objetivos

Los objetivos generales y específicos planteados en la investigación son:

1.4.1. Objetivo general

Evaluar los efectos de la humedad en la adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, bajo efectos de ciclos de humedad diferentes; de tal manera que se determine los cambios que ocasiona en dichas propiedades.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados pétreos y el cemento asfáltico.
- Definir la dosificación de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas
- Elaborar las briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico.
- Saturar las briquetas en diferentes ciclos de saturación para el daño por humedad.
- Establecer resultados que proporcionen conclusiones y recomendaciones sobre el efecto de la humedad en la adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas.

1.5. Hipótesis

Si, el evaluar los efectos que tiene la humedad en la adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, nos puede brindar información acerca de la incidencia que tiene la humedad en las mismas?

1.6. Conceptualización de las variables

1.6.1. Variable independiente

- Ciclos de saturación (tiempo).

1.6.2. Variable dependiente

- Propiedades de las mezclas asfálticas.
 - Estabilidad.
 - Fluencia.
 - Índice de resistencia conservada.

Tabla 1.1. Cuadro de operacionalización

Variable independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Humedad	Son diferentes tiempos de saturación de las briquetas de mezclas asfálticas.	Ciclos de saturación (tiempo)	Variación en el tiempo de saturación	Se realizará la saturación de briquetas con su incorporación en agua.
Variable dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Adherencia	Propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies diferentes cuando entran en contacto	Resistencia	Índice de resistencia conservada 80%	Someter a compresión diametral una probeta cilíndrica ensayo a tracción indirecta
		Textura de rotura	Visual	Rotura diametral de una probeta cilíndrica a tracción indirecta
Resistencia	Se refiere a los parámetros que caracterizan a la resistencia de una mezcla asfáltica	Marshall	Estabilidad	Determinado por el ensayo Marshall (lb)
			Fluencia	Determinado por el ensayo Marshall (0,01")

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Identificación del tipo de investigación

La presente investigación es de tipo causal o explicativa, es decir que se pretende establecer las causas de eventos, sucesos o fenómenos que se estudian.

Se centraría en explicar un fenómeno o comportamiento y las condiciones en las cuales se manifiesta, la relación de variables, indicándonos de esta manera, el enfoque de la presente investigación, la cual estudiará como afecta las diferentes condiciones de humedad ante una mezcla asfáltica convencional y modificada.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

La unidad de estudio, población, muestra y selección de las técnicas de muestreo de la investigación, se describe a continuación:

1.8.1. Unidad de estudio

Efectos de la humedad en mezclas asfálticas convencionales y modificadas.

1.8.2. Población

Efectos de la humedad en mezclas asfálticas convencionales y modificadas con diferentes ciclos de saturación.

1.8.3. Muestra

Ciclos de saturación adicionadas a las mezclas asfálticas convencionales y modificadas utilizando un mismo agregado. Los agregados a utilizar son provenientes de San Mateo de la chancadora Garzón. El cemento asfáltico convencional 85/100, es de procedencia colombiana y el cemento asfáltico modificado con polímero tipo SBS de procedencia chilena.

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

Se hará la evaluación del efecto de la humedad en el comportamiento de la estabilidad, fluencia y resistencia de tensión indirecta mediante el ensayo de laboratorio Marshall y tracción indirecta, observando los cambios producidos por diferentes ciclos de saturación en las mezclas asfálticas convencionales y modificadas.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Los métodos y técnicas empleadas en la investigación son los que se describen a continuación:

1.9.1. Métodos

El método a utilizar para la presente investigación será correlacionar mediante el cual estudiaremos, seleccionaremos y agruparemos las variables a analizar, para así estudiar las propiedades mecánicas, para verificar si estas cumplen las especificaciones mínimas de la fluencia y estabilidad de diseño Marshall y la adherencia entre agregado y cemento asfáltico de las mezclas asfálticas calientes.

1.9.2. Técnicas

Para ello se realizarán los ensayos establecidos por norma para la caracterización del agregado, cemento asfáltico y para el diseño de las mezclas asfálticas por el método Marshall, posteriormente se someterán a ciclos de saturación diferentes y se verificará que cumplen las especificaciones mínimas de la fluencia y estabilidad de Marshall y la resistencia conservada por tracción indirecta.

Ensayos de laboratorio a realizarse

De los agregados:

Ensayo de granulometría.

Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles.

Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos.

Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos.

Ensayo de peso unitario de los agregados.

Ensayo de equivalente de arena.

Ensayo de porcentaje de caras fracturadas.

Ensayo de determinación de partículas laminares, chatas y alargadas.

Del cemento asfáltico:

Ensayo de penetración.

Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol.

Ensayo de ductilidad.

Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland.

Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola.

Peso específico del asfalto.

Propiedades de resistencia y adherencia:

Método Marshall

Ensayo de estabilidad y fluencia.

Método tracción indirecta

Ensayo de tracción indirecta.

1.10. Procesamiento de la información

Se va a realizar un tratamiento estadístico para verificar la confiabilidad de los resultados.

1.11. Alcance de la investigación

En la presente investigación se realizó la evaluación de los efectos de la humedad en las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, para obtener conocimientos sobre su comportamiento frente a la incidencia por humedad en sus propiedades y poder prever posibles daños que podría ocasionar. La investigación se centra en determinar la resistencia y adherencia midiendo: estabilidad, fluencia y la resistencia a la tensión indirecta.

En primera instancia se hizo una introducción del tema central, el porqué de la investigación se detalló en el siguiente punto a través de las justificaciones, luego se procedió a la situación problemática donde se plasmó los puntos que a nuestro juicio son de vital importancia, luego se mencionó el problema, posteriormente se estableció los objetivos, tanto el general como los específicos, luego se estipuló la hipótesis con la que se cuenta para la ejecución de esta investigación, se definió las variables (dependiente e

independiente), posteriormente se realizó el diseño metodológico en donde se presentan los componentes, métodos y técnicas empleadas, procedimiento para el análisis y la interpretación de la información y por último el alcance.

Luego se procedió a realizar los aspectos generales de las mezclas asfálticas, tanto de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, y se determinó los conceptos de asfaltos y agregados.

En la ejecución se realizó los ensayos de caracterización de los agregados que provienen de la chancadora Garzón, así también se realizó los ensayos de caracterización del cemento asfáltico convencional y modificado con polímero 50/75, cuyas procedencias son de Colombia y Probisa Chile, respectivamente.

Posteriormente se realizó el diseño de la mezcla asfáltica según el método Marshall para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, tanto para la mezcla convencional 85/100 como la modificada con polímero 50/75.

Una vez elaboradas las briquetas con el método de diseño Marshall, se las sometió a ciclos de saturación para la evaluación de la humedad los cuales se realizó para un tiempo de 0, 24, 36 y 48 horas, a una temperatura de 60°C y se evaluó la resistencia con el procedimiento Marshall determinando su estabilidad y fluencia y la adherencia mediante el ensayo de resistencia a la tensión indirecta.

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis comparativo de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, para determinar las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES

SOBRE LA HUMEDAD EN

MEZCLAS ASFÁLTICAS

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE LA HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Pavimentos

La organización de los Estados Americanos, a través de su organismo técnico denominado congresos Panamericanos de carreteras, define a un pavimento como:

“La superestructura de una vía, construida sobre la sub-rasante, y compuesta normalmente por la sub-base, la base y la capa de rodamiento, cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndolos en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito”. (Corredor, 2004)

2.1.1. Tipos de pavimentos

Históricamente los pavimentos han sido divididos en dos tipos:

- a. Pavimentos flexibles.
- b. Pavimentos rígidos.

Bajo este esquema se define como “**pavimento flexible**” a aquél cuya superficie de rodamiento está constituida por una mezcla asfáltica, y sus principales características son:

- La capacidad estructural del pavimento es proporcionada por las capacidades de aceptación y distribución de cargas de cada una de las capas que conforman la estructura.
- Son construidos en, al menos la capa superior, con material asfáltico.
- Variaciones pequeñas del suelo de fundación tienen gran incidencia en la capacidad estructural del pavimento.
- Las propiedades de las mezclas, afectan, aun cuando en menor grado, la resistencia del conjunto multicapa.

Por lo contrario, un “**pavimento rígido**” es aquel que:

- Distribuye la carga sobre un área relativamente grande del suelo por la rigidez y alto módulo de elasticidad de sus componentes; una gran parte de la capacidad estructural la proporciona la capa superior.
- Construidos de concreto-cemento en su superficie de rodamiento
- En su comportamiento influye notablemente la resistencia del concreto

° Variaciones pequeñas del suelo de fundación tienen poca incidencia en la capacidad estructural del pavimento. (Corredor, 2004)

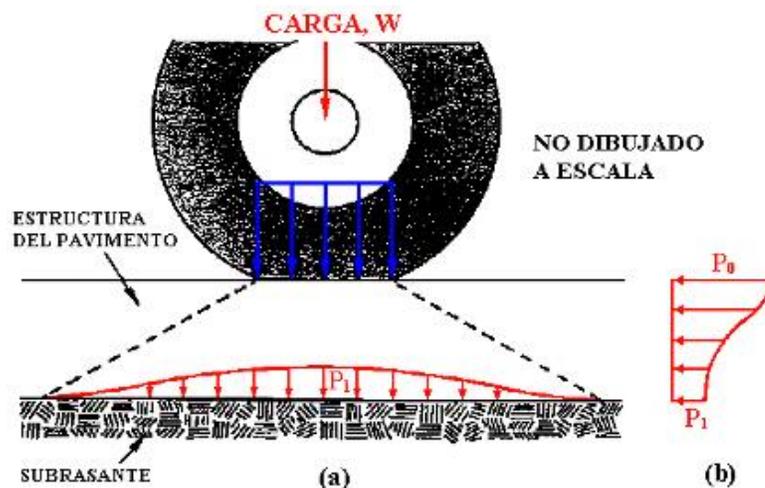
2.1.2. Conceptos estructurales básicos en los pavimentos flexibles

En el caso de los pavimentos flexibles, su capacidad de soporte se debe a la forma de cómo se distribuyen las cargas aplicadas sobre la superficie.

Por definición, un pavimento flexible consiste de una serie de capas con el mejor material cercano a la superficie. Como consecuencia, la carga aplicada se reduce con la profundidad. La forma como ésta varíe dependerá de las propiedades de los diferentes materiales empleados en la construcción del pavimento. La sub-rasante es, finalmente la capa que debe soportar las cargas impuestas, al igual que las capas que sobre ella serán construidas. La Figura 2.1. muestra la carga de una rueda (W), que es transmitida a la superficie del pavimento a través del caucho del vehículo, y que resulta en una presión unitaria vertical aproximadamente uniforme, identificada como (P_0). Cada capa del pavimento absorbe parte de esta presión, y distribuye la presión restante sobre la capa inferior de tal manera que este esfuerzo se ve reducido a un valor menor al esfuerzo resistente de la capa subyacente.

La selección adecuada de los materiales y/o mezclas, y de los correspondientes espesores, resultará en que el esfuerzo aplicado sobre la sub-rasante (P_1), será suficientemente pequeño para ser soportado fácilmente por el material de fundación.

Figura 2.1. Distribución de cargas de neumáticos en la estructura del pavimento

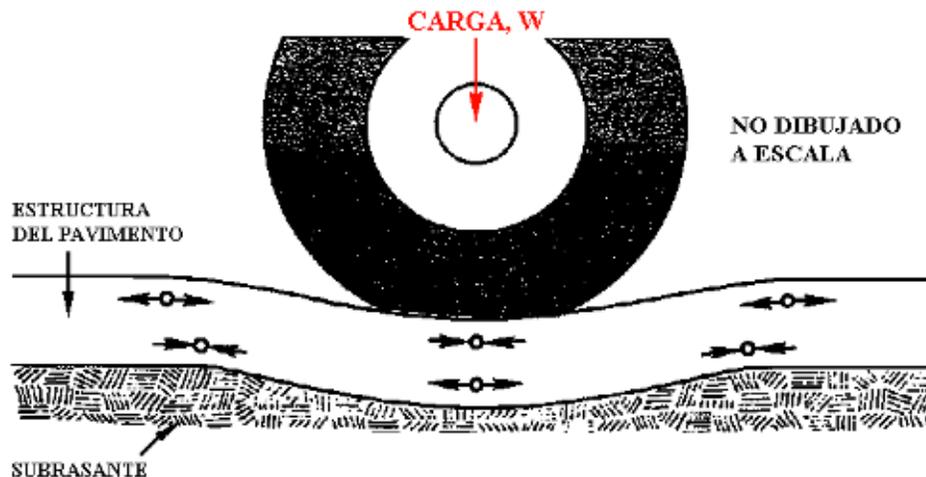


Fuente: (Corredor, 2004)

Cada vez que un vehículo pasa sobre una sección de un pavimento, éste sufre una deformación, o deflexión, que es recuperable; es decir es una deformación elástica.

La Figura 2.2. representa como la carga del vehículo (W) deforma levemente la estructura del pavimento, causando esfuerzos de tracción y compresión dentro del mismo. Las capas asfálticas tienen resistencia a la tracción y compresión para soportar los esfuerzos impuestos. Las capas granulares de sub-base y/o base sólo resisten esfuerzos de compresión. (Corredor, 2004)

Figura 2.2. Esfuerzo de tracción y compresión como resultado del paso de carga



Fuente: (Corredor, 2004)

2.2. Estructura del pavimento flexible

Figura 2.3. Estructura típica del pavimento flexible



Fuente: (Garzón, 2018)

La estructura del pavimento flexible está compuesta por una capa superficial que es la capa asfáltica o capa de rodadura, seguida por la base y la sub base consecutivamente, lo cual en complemento se encuentra apoyado sobre la subrasante o terreno natural a donde llega una parte de la carga vehicular.

Las capas de un pavimento flexible se colocan en orden descendente en capacidad de carga, lo que indica que la capa superior es la que mayor capacidad portante tiene de todas las que se disponen, por lo que la estructura como tal del pavimento es la que soporta la mayor parte como tal de las cargas de los vehículos y las cargas restantes se transfieren a la subrasante. (Garzón, 2018)

2.2.1. Capa asfáltica

Está compuesta por mezclas asfálticas y materiales pétreos. Esta capa recibe directamente las cargas vehiculares y los efectos ambientales como la lluvia y la radiación solar (Ortiz, 2017), es resistente a la abrasión producida por el tráfico y a los condicionamientos del intemperismo; además, tiene la función de proteger la estructura, impermeabilizando la superficie del pavimento. La textura superficial de la capa de rodadura debe presentar dos características para atender adecuadamente la circulación de los vehículos: la suavidad, para que sea cómoda, y la rugosidad, para que sea segura. (Garzón, 2018)

Figura 2.4. Capa asfáltica



Fuente: (Garzón, 2018)

2.2.2. Capa Base

Es una capa granular ubicada bajo la carpeta asfáltica, básicamente este material granular debe ser friccionante para que garantice una resistencia adecuada y la permanencia de dicha resistencia ante la variación de las condiciones que puedan producirse, y a su vez debe contener vacíos. Su función primordial es la de proporcionar un elemento resistente que transmita los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub base y sub rasante, en una intensidad adecuada. (Garzón, 2018)

Figura 2.5. Base granular



Fuente: (Garzón, 2018)

2.2.3. Capa sub-base

Es una capa granular construida con materiales más económicos que los de las anteriores capas, esta capa facilita el drenaje del agua que pueda filtrarse por la superficie o ascienda por capilaridad.

Es la capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la superficie de rodadura del pavimento, y son transmitidas a la cimentación. Para esta capa se utilizan agregados provenientes de bancos de materiales que cumplan con las especificaciones técnicas para una sub-base, que serán colocados sobre la superficie de la subrasante.

Para el proceso de conformación de la capa sub-base, se realiza el suministro de agregados granulares para su colocación en conformidad con los alineamientos verticales, pendientes y dimensiones indicadas en los planos del proyecto o establecidos por el Ingeniero supervisor. (Garzón, 2018)

Figura 2.6. Sub base granular



Fuente: (Garzón, 2018)

2.2.4. Sub-rasante

Es la superficie que soporta la estructura de pavimento, está compuesta por terreno natural, aunque en ocasiones es necesario mejorar las características del terreno para lo cual se requiere un proceso de mejoramiento como la compactación para mejorar sus características, pues de estas dependerá en gran medida, el espesor total del pavimento. (Garzón, 2018)

Ancho total de la vía que constituye la fundación para el pavimento, hombrillos y zonas de estabilización. Este término realmente es compartido en los aspectos de diseño geométrico: en ellos se refiere al plano que separa la infraestructura y superestructura del pavimento; y en el diseño de pavimentos: en el cual se refiere a los últimos centímetros (generalmente 50,0 cm) del relleno o corte del movimiento de tierras, que sirven de soporte a la estructura capaz de recibir y reducir las cargas del pavimento. La sub-rasante no forma parte del pavimento, pero es una variable fundamental en su determinación. (Corredor, 2004)

2.3. Mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas (o bituminosas), que también reciben usualmente la denominación de aglomerados, están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquéllos quedan cubiertos por una película continua de este. Se fabrican de forma mecánica en una centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y ahí se extienden y se compactan.

Actualmente, se emplean no solo en los pavimentos de carreteras y de calles, sino también en otro tipo de infraestructuras con tráfico: aeropuertos, superficies industriales, pistas deportivas. Se emplean también a menudo en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados e intensos.

Para fabricar las mezclas bituminosas, los áridos se clasifican en unas fracciones uniformes, a partir de las cuales se componen la granulometría elegida. Se suele considerar por separado el polvo mineral. Los ligantes intervienen en las mezclas en proporciones diferentes según el tipo de formulación: entre el 3 y el 10% sobre la masa de los áridos (en volumen, la proporción se sitúa entre el 8 y el 25%, aproximadamente). (Kraemer, 2004)

2.3.1. Concreto asfáltico en caliente

Constituyen el tipo más generalizado. Se emplean tanto en las vías urbanas como en las autopistas, en las carreteras convencionales y en los aeropuertos; Por otro lado, se utilizan tanto en las capas de rodadura como en las capas inferiores de los firmes. Las proporciones del ligante, según la granulometría y el empleo de la mezcla, van aproximadamente del 3% al 6% sobre la masa del árido.

El concreto asfáltico en caliente (hormigones bituminosos en caliente) más empleados para las capas de rodadura son mezclas cerradas. Su pequeña proporción de huecos hace que sean prácticamente impermeables, cumpliendo así la misión del pavimento de proteger a las capas inferiores del firme y al cimiento de la acción del agua. Sin embargo, nunca son totalmente impermeables, y en ocasiones la infiltración del agua puede ser importante a través de las grietas.

En todo caso, los hormigones bituminosos en caliente son mezclas de granulometría continua: las partículas más finas rellenan los huecos que dejan las más gruesas y todas ellas están recubiertas por una película continua de ligante. Un inconveniente de algunas

de estas granulometrías continuas es su sensibilidad al contenido del ligante, ya que unas pequeñas variaciones pueden producir unos cambios importantes en su comportamiento reológico. (Kraemer, 2004).

2.3.2. El método Marshall

El método de dosificación de mezclas que ha alcanzado la mayor difusión es el basado en el ensayo Marshall. En principio, es aplicable solo a los hormigones bituminosos en caliente, en los que además el tamaño máximo del árido no exceda de los 20 mm; sin embargo, a veces se aplica también a la formulación de otros tipos de mezcla.

El ensayo fue desarrollado durante la segunda guerra mundial por US Army Corps of Engineers y posteriormente lo hizo suyo el Asphalt Institute. Consiste en la rotura de unas probetas cilíndricas de 4 pulgadas (101,6 mm) diámetro y 2 1/2 pulgadas (63,5 mm) de altura mediante la aplicación de una mordaza perimetral, con una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min (2 pulgadas/min). El proceso es el siguiente:

- Una vez fijada una granulometría de los áridos y el tipo de ligantes, se fabrican las probetas con diferentes contenidos del ligante dentro de unos intervalos sancionados por la experiencia (al menos, cuatro probetas por cada contenido): por ejemplo, 3,5, 4, 4,5, 5 y 5,5 por 100 sobre la masa de los áridos. A continuación, se procede a su compactación en un molde mediante la denominada maza Marshall, de características normalizadas, aplicando unos golpes en cada una de las dos caras planas de la probeta y cuyo número (generalmente, 50 o 75 por cara) depende de las características del tráfico.
- Desmontadas las probetas tras su enfriamiento, se determina su densidad aparente con una balanza hidrostática. Este dato, junto con los pesos específicos del conjunto de los áridos y del ligante, permite el cálculo de las proporciones de los huecos en mezcla (porosidad) y de los huecos en áridos (suma de la porosidad y del volumen relativo ocupado por el ligante).
- Después de mantener las probetas en agua o en una estufa el tiempo necesario para que la mezcla alcance una temperatura de 60°C, se ensayan hasta la rotura de la manera ya

descritas. Se define como estabilidad Marshall la carga de rotura (kN) y como deformación Marshall el acortamiento diametral (mm) hasta el momento de la rotura.

Figura 2.7. Esquema del ensayo Marshall

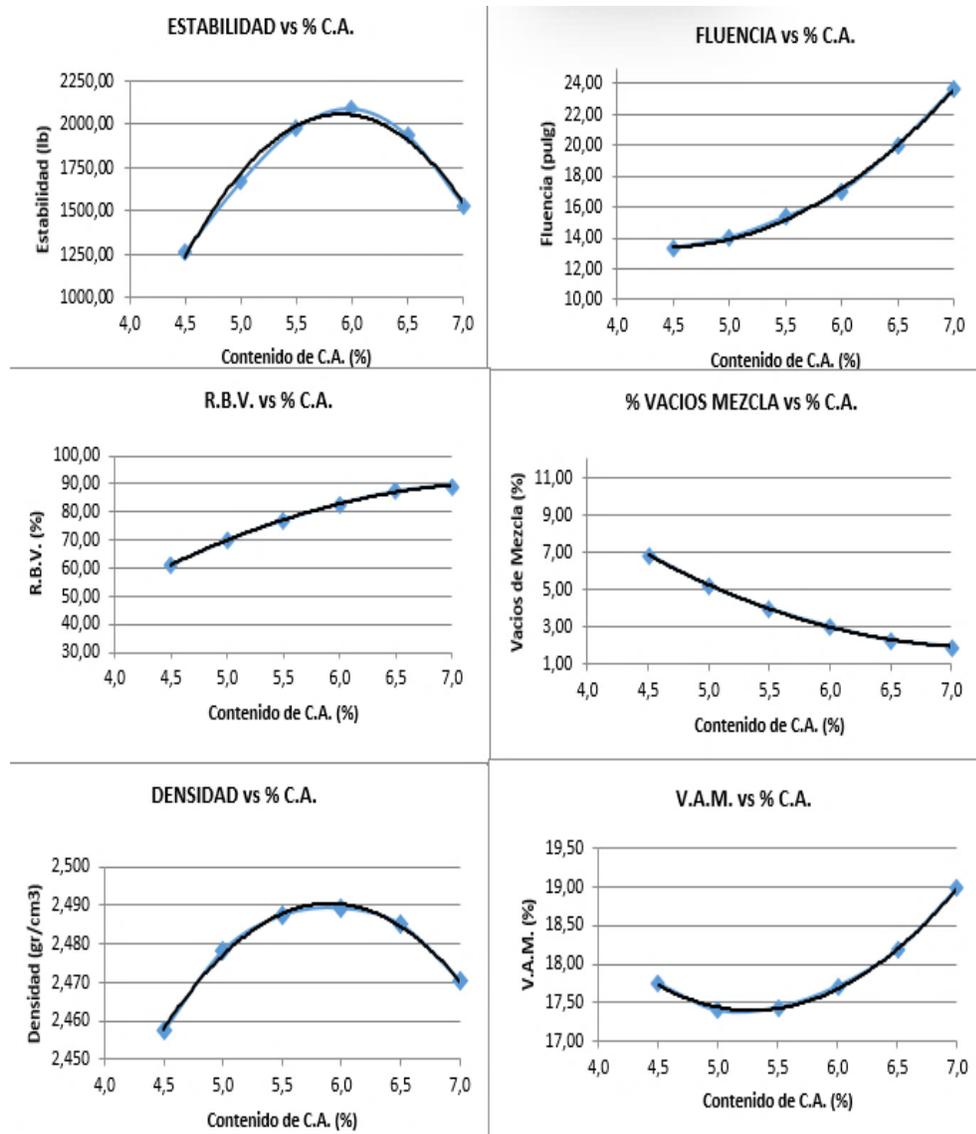


Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros con los que se trabaja en el método Marshall son los que se han citado: la densidad, la estabilidad, la deformación, la proporción de huecos en mezcla y la proporción de huecos en áridos. Su variación con el contenido del ligante (expresado normalmente en

proporción sobre la masa seca de los áridos) se representa en unas gráficas como las del ejemplo de la figura siguiente. (Kraemer, 2004).

Figura 2.8. Ejemplos de gráficos Marshall



Fuente: Elaboración propia.

2.4. Componentes de la mezcla asfáltica

2.4.1. Cemento asfáltico

Son el producto directo de la refinación, y tal como son producidos son empleados en la pavimentación de carreteras. Se clasifican tradicionalmente en varios tipos, o grados, en función de su “penetración o viscosidad”, de acuerdo a lo indicado en la tabla siguiente:

Tabla 2.1. Clasificación de los cementos asfálticos en función de su penetración

Penetración	Viscosidad
40 – 50 (más duro)	AC-40
60 – 70	AC-20
85 – 100	AC-10
120 – 150	AC-5
200 – 300 (más blando)	AC-2,5

Fuente: (Corredor, 2005)

Los cementos asfálticos deben ser calentados a temperaturas relativamente altas (alrededor de los 150°C) con el fin de lograr un grado de fluidez que permita su adecuado manejo en planta (bombeo y mezclado), y en obra (extendido y compactación). Como también en obra se calientan los agregados a esta misma temperatura en plantas especialmente diseñadas para este fin, las mezclas asfálticas que se obtienen a partir de los CA se denominan “mezclas en caliente” o “mezclas en planta en caliente”. (Corredor, 2005)

La composición de los betunes es extraordinariamente compleja y depende tanto de su origen como del proceso de obtención. Los mejores betunes para carreteras se obtienen a partir de crudos de base naftécnica, constituidos principalmente por hidrocarburos no saturados como los procedentes de Venezuela. Pero no todos los crudos de petróleo proporcionan por refino betunes aptos para carreteras.

Los betunes asfálticos son semi sólidos o sólidos a temperatura ambiente. Su manipulación requiere su calentamiento a fin de reducir su consistencia a un valor admisible para la operación deseada: bombeo, riego bituminoso, mezcla con los áridos, etc. (Kraemer, 2004).

2.4.1.1. Cemento asfáltico modificado con polímero

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. (Wulf, 2008)

El objetivo principal de modificar las mezclas asfálticas es que la adherencia aumente entre el material asfáltico y el pétreo y que aún en presencia de agua se conserve. Los modificadores generalmente se aplican al material asfáltico, antes de mezclarlo con el pétreo; al adicionarlos se aumentará la resistencia a la deformación y se pueden reducir los agrietamientos generados en él.

Se ha comprobado que el asfalto convencional tiene buenas propiedades de adhesión y mecánicas; pero en la actualidad debido a un incremento en los volúmenes de tráfico se originan aumentos en las cargas axiales, lo que ocasiona que no sea suficiente utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras, por lo cual se deben tener en cuenta parámetros que disminuyan el envejecimiento prematuro, la poca durabilidad causada por las deformaciones y las fisuras generadas en la carpeta asfáltica. (Sánchez, 2016)

2.4.1.2. Definición de polímero

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

- Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad. (Wulf, 2008)

2.4.2. Agregado

Las capas de un firme suelen tener una proporción muy elevada de unos elementos de naturaleza pétreo que se denominan áridos (agregados en la terminología americana). Las proporciones en los que intervienen son variables, aunque en general superiores al 90% en masa y al 80% en volumen. Aunque los áridos se suelen considerar como un conjunto de partículas discretas y de naturaleza inerte, hay que tener en cuenta que se pueden producir algunas acciones para el contacto tanto con el agua como con los ligantes y los conglomerantes (por ejemplo, las reacciones árido álcali en los hormigones que pueden llegar a provocar incluso su ruina). En las capas del firme de las que forman parte, los áridos aportan a la resistencia fundamentalmente la componente del rozamiento interno. En este sentido, es habitual hacer referencia al esqueleto mineral.

Los grandes volúmenes necesarios de áridos, así como su importancia técnica y económica de los firmes, hacen imprescindible estudiarlos en el laboratorio. Hay que determinar cuáles, entre los áridos disponibles a un coste adecuado, son los que cumplen las especificaciones; además, además su extracción no debe ocasionar unos problemas ambientales inadmisibles. Los estudios de laboratorio han de llevarse a cabo sobre muestras representativas y se basan en la realización de ensayos normalizados. (Kraemer, 2004).

El agregado es cualquier material mineral, en forma de partículas, granos o fragmentos que, adecuadamente proporcionados en diferentes tamaños, conforman una mezcla asfáltica. Los agregados convencionales son las arenas –simplemente cernidas o lavadas–, las gravas de río, naturales por tener sus granos redondeados al ser producto del tamizado del material del banco, o angulares por ser trituradas; y los provenientes

de canteras, como las calizas y los granitos, cuyos granos son siempre producto de la trituración y cernido del material obtenido de la voladura de los bancos; y las escorias de acería. Los agregados conforman aproximadamente entre el 90 y 95% del total en peso de la mezcla y sus características físicas y mecánicas son muy importantes ya que la resistencia total de la mezcla depende fundamentalmente del aporte de los granos. (Corredor, 2005)

2.4.2.1. Origen de los materiales granulares

Los agregados minerales provienen de las rocas, ya sean sedimentarias, metamórficas o ígneas.

Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos a medida que el agua se deposita. Los sedimentos pueden ser de origen mineral, como las gravas, las areniscas y las arcillas; de residuos de productos orgánicos, como las calizas y carbones; ser el producto de una reacción química o evaporación, como la sal y el yeso; o de la combinación de cualquiera de estos diferentes tipos de materiales. Las rocas sedimentarias se forman normalmente en capas o estratos, como consecuencia del proceso de sedimentación de los materiales en el fondo de antiguos lagos o mares. Las rocas sedimentarias más comunes son las areniscas y las gravas de río, que contienen un alto contenido de sílice, y son, por esta razón, llamados “agregados silicios”. Otras rocas sedimentarias muy frecuentes contienen altos contenidos de carbonato de calcio, son denominadas “calcáreas” y las más común entre estas son las calizas. (Corredor, 2005)

Rocas ígneas

Las rocas ígneas provienen del material fundido (magma) formado en los volcanes y que se ha enfriado y endurecido. Las rocas ígneas pueden ser “extrusivas” si se han formado del magma arrojado fuera de un volcán sobre la superficie terrestre. Estas rocas tienen una apariencia y estructura vidriosa (de grano fino) debido a su enfriamiento violento al ser expuesto a la atmósfera; el basalto y la andesita son ejemplos de rocas extrusivas. El otro tipo de roca ígnea es llamado “intrusiva” ya que se forma del enfriamiento lento del magma que ha quedado atrapado en las profundidades de la corteza terrestre y que posteriormente, debido a movimientos de la corteza terrestre y a procesos de erosión son

llevadas a la superficie; su apariencia y estructura es cristalina (de grano grueso). El granito y el gabro son ejemplos de rocas intrusivas. (Corredor, 2005)

Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intenso calor y presión, o por reacciones químicas. Muchos tipos de rocas metamórficas presentan como característica el que sus minerales están alineados en capas o planos paralelos, y son denominadas como “de estructura foliada”; las más comunes son los gneis, las pizarras y los esquistos. Las rocas metamórficas de estructura no paralela son “no foliadas”, siendo buenos ejemplos la cuarcita, el mármol y la serpentina. (Corredor, 2005)

2.4.2.2. Tipos de agregados para mezclas asfálticas

De acuerdo a los procesos de cómo son producidos, los agregados para mezclas asfálticas se clasifican como: naturales, procesados o sintéticos.

– Agregados naturales

Son aquellos que se emplean tal como han sido obtenidos de los saques o préstamos, sin ningún otro procesamiento que la eliminación del “sobre tamaño”. Los más comunes son de origen sedimentario, como las arenas y gravas de río; sus granos son redondeados y de textura lisa como consecuencia de la acción de roce entre los propios granos a medida que han sido transportados desde el sitio de deslave hasta el sitio de sedimentación. (Corredor, 2005)

Su único procesamiento en obra es el cernido (tamizado) para la eliminación de los fragmentos de tamaño mayor a 1,5 pulgadas. Su ventaja radica en su bajo costo, pero pueden presentar un alto grado de variabilidad granulométrica. La resistencia mecánica de las mezclas elaboradas con agregados 100% naturales puede ser baja. (Corredor, 2005)

– Agregados procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y cernidos con el fin de modificar su forma, tamaño y distribución granulométrica, y en un menor grado, su textura. También pueden ser lavados para mejorar su limpieza. Las fuentes más comunes de agregados procesados son las gravas de río y los materiales de cantera. Son

más costosos que los agregados naturales, pero las mezclas que se elaboran con estos agregados resultan con propiedades mecánicas y volumétricas superiores. Normalmente, como resultado de la trituración y cernido se obtienen agregados con diferentes estructuras granulométricas, que deben ser combinados para lograr una distribución de tamaños que satisfaga una especificación determinada. (Corredor, 2005)

– **Agregados sintéticos o artificiales**

Son agregados que no existen en la naturaleza y se obtienen como producto del procesamiento físico o químico de otros materiales. Algunos son el subproducto de procesos industriales como el refinamiento de metales: la escoria de acería o agregado siderúrgico es un material secundario (de desecho) no metálico que se obtiene en la cadena de elaboración de acero. El material fundido de descarte (escoria) es vertido en unas grandes copas y transportado a un patio, en donde es descargado y enfriado violentamente mediante chorros de agua, en un proceso conocido como “trituración por agua”. El material al enfriarse produce granos de diferentes tamaños que requieren solamente su tamizado antes de ser llevados a una planta de asfalto. (Corredor, 2005)

2.4.2.3. La fracción “pasa el tamiz N°200” o polvo mineral

El tamaño N°200 de la fracción fina es de suma importancia en el diseño y comportamiento de las mezclas asfálticas, ya que por su pequeño tamaño pueden comportarse como un “extendedor de asfalto” que al ser mezclado con el ligante se comporta más como un líquido que como un sólido. Por otra parte, variaciones pequeñas en la cantidad de pasa N°200 puede causar que la mezcla asfáltica resulte con exceso o muy pobre en asfalto, afectándose así las características de diseño de la mezcla. Tal como se ha indicado, sirve para llenar vacíos en la mezcla, pudiendo por ello reducir el contenido de asfalto requerido; sin embargo, debido a su gran área superficial, puede en algunos casos necesitarse la adición de mayores cantidades de asfalto para compensar aquél absorbido por el filler.

Se ha encontrado que la relación en peso entre el pasa N°200 y el asfalto efectivo – llamada relación filler-bitumen–, es un índice importante en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Algunas normas establecen criterios para esta relación: en general se

requiere que sea de 0,6 a 1,8; dependiendo del tipo de mezcla y de su uso propuesto, es decir si es de rodamiento, intermedia o base.

El material pasante el tamiz N°200 (0,075 mm) se encuentra formando parte de la distribución granulométrica de los agregados, pero en algunos, de acuerdo a su contenido original, al tipo de mezcla en estudio, y a las propiedades de la mezcla propuesta, se requiere la incorporación de uno importado. Este puede consistir de piedra caliza finamente molida, polvo de roca, cemento portland, cal hidratada, médanos limosos y materiales similares, los cuales deben ser limpios y no-plásticos. Los filler calcáreos pueden mejorar la adherencia de las mezclas asfálticas, mientras que la presencia de arcilla en la llenante mineral es generalmente perjudicial, debido a la tendencia de emulsificar el ligante asfáltico en la presencia de agua. (Corredor, 2005).

2.5. Humedad en la mezcla asfáltica

Típicamente el daño por humedad se relaciona con adhesión. El agua puede afectar el pavimento de diferentes maneras por drenaje, por lluvia, por humedad, por brillo solar o simplemente por la combinación de todos o algunos de estos efectos.

La mayoría de los agregados y cementos asfálticos absorben humedad cuando están expuestos a la humedad ambiental, un asfalto con un cambio significativo en las características de rigidez y un daño inicial en la mezcla podría terminar reflejado en el pavimento. (Figueroa, 2015)

El desempeño de una mezcla asfáltica en caliente (HMA) se ve afectado por la presencia del agua o vapor de agua al interior de la misma, esto se conoce como daño por humedad; desde los años 30s se ha investigado el fenómeno, encontrando que una de sus manifestaciones es el stripping o más conocido como el desprendimiento del agregado pétreo del ligante asfáltico.

El stripping se puede definir como la pérdida de adherencia entre la película de asfalto y la superficie del agregado en la mezcla asfáltica, debido a la acción del agua, la cual rompe la unión adhesiva entre ambos y ocasiona pérdida de funcionalidad de la vía. El agua también puede afectar el cemento asfáltico por interacción química y/o físicamente

resultando en una reducción de la cohesión, lo que podría conducir a una severa reducción en la integridad y la resistencia de la mezcla.

Los mecanismos involucrados en el fenómeno de stripping se definen como: desplazamiento que ocurre por penetración de agua en la superficie de los agregados a través de una ruptura en la película de asfalto; desprendimiento por suciedad, humedad o incompatibilidad mineralógica en los agregados; emulsificación espontánea la cual ocurre cuando el agua y el asfalto se juntan para formar una emulsión invertida, cuando ocurre esto la emulsión penetra en el sustrato y la unión adhesiva se rompe, y la socavación mecánica, que se produce como consecuencia del aumento de la presión en los poros por la carga de tráfico.

Lottman presentó el protocolo del ensayo TSR en 1978, el cual fue un gran avance para predecir el daño por humedad inducido en la mezcla asfáltica. Posteriormente, en 1978, este protocolo fue modificado por Tunnicliff y estandarizado como AASHTO T-283 y llamado ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas. (Figuroa y Reyes, 2016).

El daño por humedad es el efecto que produce el agua en las mezclas asfálticas, este se encuentra relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto, se puede presentar a través de diferentes síntomas, entre los que tenemos:

- Ahuellamiento.
- Desprendimiento de agregados.
- Fisuras.
- Grietas.

Estas características muestran una debilitación en la unión agregados – ligante asfáltico compuesta por la humedad que queda atrapada en el tiempo de la fabricación o en la que pudo penetrar desde la superficie, dando como resultado un desplazamiento del ligante con los agregados por el proceso de emulsificación lo cual se podría traducir en un ablandamiento. (Sánchez y Vega, 2016)

En la siguiente tabla se mostrarán los diferentes factores que ayudan a que se presente el daño por humedad:

Tabla 2.2. Factores que contribuyen al daño por humedad

Diseño de la mezcla	- Química del asfalto y agregado
	- Contenido de asfalto
	- Vacíos con aire
	- Aditivos
Producción	- Porcentajes de recubrimiento de agregados y calidad del material que pasa el tamiz N°200
	- Temperatura en planta
	- Exceso de humedad en los agregados
	- Presencia de arcilla
Construcción	- Compactación
	- Alta permeabilidad
	- Segregación de la mezcla
	- Cambios del diseño de la mezcla respecto al sitio de colocación
Clima	- Áreas muy lluviosas
	- Ciclos de congelamiento y descongelamiento
	- Separación del vapor de agua
Otros factores	- Drenaje superficial
	- Drenaje sub superficial
	- Estrategia de rehabilitación-sellos de materiales marginales sobre las mezclas asfálticas en caliente
	- Peso de altas cargas 28 vehiculares (tracto mulas)

Fuente: (Cubillos y Núñez, 2013)

Al menos 6 mecanismos de fallas son los que se asocian con los daños por humedad y los desprendimientos de agregado, pudiendo estos presentarse en forma individual o simultánea. Estos mecanismos son: separación, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro, socavación hidráulica y efectos ambientales. La separación se distingue del desplazamiento en que el agua que penetra en el agregado es debido a una discontinuidad en la película de asfalto que recubre al mismo, la cual puede ser debido a un recubrimiento parcial o de una ruptura en la película asfáltica. La emulsificación espontánea ocurre cuando el asfalto y el agua son combinadas para formar una emulsión, un fenómeno que se maximiza con la presencia de emulsificantes como arcillas minerales. La presión de poro puede también generar un daño por humedad en mezclas asfálticas con altos contenidos de vacíos, como es el caso

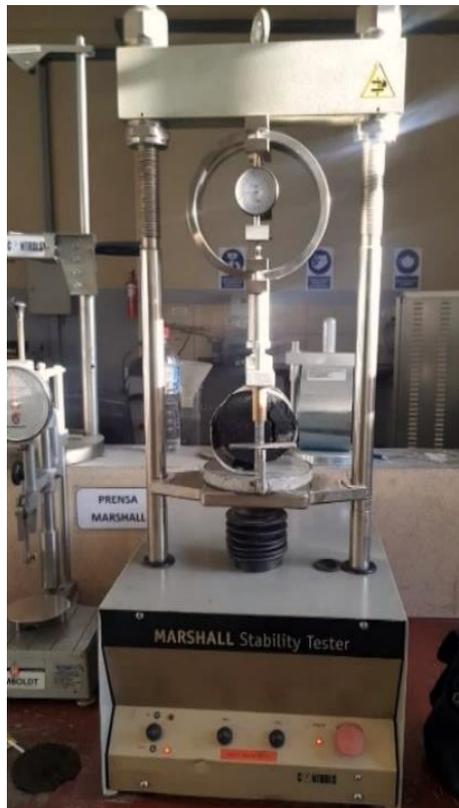
de las mezclas abiertas (open graded), en las que el agua puede circular entre los poros interconectados. Por último, la socavación hidráulica ocurre únicamente en la superficie del pavimento y ocurre a partir del efecto de los neumáticos de los vehículos sobre un pavimento mojado, sobre los cuales se generan altas presiones delante del neumático y succión detrás del mismo. (Adame, 2018)

2.6. Ensayo tracción indirecta

El ensayo de pérdida de resistencia ante el agua por tracción indirecta, más conocido como TSR, conlleva el uso de una carga a compresión que se distribuye en toda la extensión de los ejes diametrales de una muestra. En el mencionado ensayo, se produce un estado de tensiones de tracción aproximadamente homogéneas a lo largo de los ejes diametrales, debido a los mecanismos empleados en el mismo.

El comportamiento de los especímenes al estar sometido a los mencionados esfuerzos, es capturado por medio de deformímetros, para posteriormente ser registrados y evaluados. (Hidalgo y Riera, 2016)

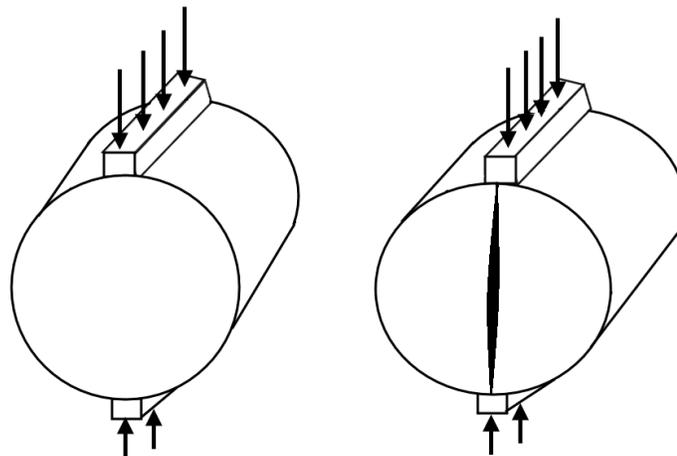
Figura 2.9. Fotografía equipo TSR



Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad, el ensayo AASHTO T 283 es el más utilizado para evaluar el daño por humedad de las mezclas asfáltica en caliente. Se utiliza en el método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) para el diseño de pavimentos, el cual está enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente mediante una cuidadosa selección y proporcionamiento de los materiales. Este método, considera en sus procedimientos el análisis del daño por humedad de las mezclas asfálticas para determinar con mayor precisión el comportamiento futuro de la estructura del pavimento.

Figura 2.10. Configuración de la carga, así como la rotura del ensayo TSR



Fuente: (Aranda, 2017)

La reacción de los especímenes a la carga puede ser captada por medio de un registrador de multicanales o un dispositivo de adquisición de datos analógico digital. Se determina la resistencia a la tracción indirecta (ITS), tanto para probetas secas como húmedas, aplicando la siguiente fórmula:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H}$$

Donde:

P = Carga máxima (kN)

D = Diámetro de la probeta (mm)

H = Altura de la probeta (mm)

Con los valores promedio de ITS de cada grupo de probetas, se calcula la razón de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) mediante la siguiente ecuación:

$$ITSR = \frac{ITS (húmedas)}{ITS (secas)} * 100\%$$

El porcentaje resultante es la variación por las distintas condiciones en las que se encuentra la probeta, es decir, determina cuán susceptible es la mezcla en condiciones de humedad. Esto debido al grado de saturación, temperaturas que se encuentra. Se necesitan 6 probetas para la realización del ensayo, 3 muestras para condición de humedad y 3 muestras para condición seca.

Este ensayo tiene como objetivo dos ejes principales. El primero de ellos es identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua. Segundo, mide la efectividad de los aditivos mejoradores.

Sin embargo, el ensayo tiene límites para su veracidad, tras estudios dirigidos por Tesoriere, Marino y Canale (Tesoriere, 1990), demostraron que el rango de temperaturas para que el valor de la resistencia varíe de forma lineal es entre los 10- 25°C, ya que, a temperaturas de ensayo sobre los 30°C, la función tiende a comportarse de forma parabólica, con valores dispersos y prevaleciendo la componente viscosa de la mezcla bituminosa. (Aranda, 2017)

Las variables más importantes del estudio son: saturación, ciclo hielo/deshielo, condicionamiento de las muestras, temperatura ensayo TSR, tipo de agregado, tipo de aditivo. A continuación, se muestra tabla comparativa entre las 3 Normas:

Tabla 2.3. Parámetros ensayos normas ASTM D4867, AASHTO T283 y LNV

Parámetros del ensayo	ASTM D 4867	AASHTO T283	LNV
Envejecimiento mezcla suelta	No hay	Enfríe por 2 horas a temperatura ambiente. Envejecer a 60°C por 16 horas	No hay
Porcentaje vacíos de aire en la mezcla	6-8	6,5-7,5	No hay límite, solo utiliza 50 golpes por cara de la probeta
Saturación	55-80% 5min. A 525 (mmHg)	70-80% 5-10 min entre 254-600 (mmHg)	No debe expandir la probeta en más del 2% de su volumen inicial.
Ciclo Hielo/deshielo	-18±0,1°C por 15 horas (opcional)	-18±0,1°C por 16 horas	-18±0,1°C por 15 horas (opcional)
Acondicionamiento en agua	60°C por 24 horas	60°C por 24 ± 1 horas	40°C por 68-72 horas
Ensayo TSR	A 25±1°C A 51 (mm/min)	A 25±1°C A 51 (mm/min)	A 25±1°C A 51 (mm/min)
Límite ITSR exigido	75%	80%	85%
Análisis visual	No hay	Solo exige realizarlo	No hay

Fuente: (Aranda, 2017)

2.7. Factores de influencia en el daño por humedad

El daño por humedad de las mezclas asfálticas puede ocurrir debido a distintos factores, por lo que es difícil de predecir el modo de falla. En general, la susceptibilidad a la humedad incrementa por cualquier factor que haga aumentar el contenido de humedad de la mezcla bituminosa, disminuyendo la adhesión del ligante a la superficie del agregado. A continuación, se mencionan algunos de los factores que han sido estudiados a la susceptibilidad al daño por humedad en cierto grado, aun así, ninguna es punto de referencia para poder predecir este fenómeno. (Aranda, 2017)

2.7.1. Cemento asfáltico

La viscosidad indica concentraciones más altas de asfaltenos. Estas moléculas de mayor tamaño crean una mejor adherencia, por lo tanto, viscosidades más bajas, pueden representar concentraciones más bajas de asfaltenos, que generalmente son más susceptibles al desprendimiento. (Aranda, 2017)

2.7.2. Características del agregado

Normalmente, los agregados que son hidrófilos (atraen el agua) son más propensos a tener problemas con el desprendimiento que los agregados hidrófobos (repulsión al agua). (Aranda, 2017)

2.7.3. Volumen de Aire

Cuando se tiene una mezcla abierta, con porcentaje de vacíos sobre el 8 por ciento, permite que el agua penetre fácilmente en la mezcla asfáltica y junto con ello, causar daño de humedad a través de la presión de poro o expansión de hielo. Es por esto, que el diseño de las mezclas limita el contenido de ligante y la graduación del agregado. Los vacíos de aire excesivos pueden ser un problema tanto en el diseño de la mezcla o en la construcción. En este trabajo de investigación, sólo se aborda el primero de estos problemas. (Aranda, 2017)

2.7.4. Condiciones climáticas al momento de la construcción

En condiciones de bajas temperaturas se puede conducir a una mala compactación, generando alto contenido de volumen de vacío y un pavimento relativamente permeable. Esto aumenta la posibilidad de agua en la estructura del pavimento y, por lo tanto, mayor susceptibilidad al daño por humedad. Además, las condiciones de climas húmedas, siempre pueden aumentar el contenido de humedad en las mezclas bituminosas. (Aranda, 2017)

2.7.5. Clima

Los ciclos de hielo-deshielo y las fluctuaciones de temperatura pueden permitir mayor humedad en la estructura del pavimento, además, con estos ciclos, se genera una presión

interna dentro de la probeta, que hace más fácil los desprendimientos del material. (Aranda, 2017)

2.7.6. Tráfico

Si existe agua presente en la mezcla asfáltica, una mayor carga de tráfico aumenta la probabilidad del daño por humedad debido principalmente a un aumento en la presión de los poros, ya que el agua se encuentra atrapada en los poros, la carga vehicular tiende a comprimir estos espacios, empujando el aglomerante de las partículas de agregados. Por otro lado, la rueda del vehículo pasa sobre el pavimento, tendiendo a mover el agua. Esto se conoce con el nombre de lavado hidráulico, en donde la rueda, mediante un movimiento de fregado, puede eliminar el ligante de asfalto de la superficie del agregado. (Aranda, 2017)

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE
INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1. Criterio de la selección de banco de materiales

La ciudad de Tarija cuenta con distintos bancos de préstamos de materiales que proporcionan una buena calidad de áridos, la investigación utilizó los agregados de la chancadora Garzón, este material es procedente de la comunidad de San Mateo y se encuentra a la orilla del río Sella, el cual tiene una gran cantidad de áridos que cumple con las especificaciones de la investigación.

Figura 3.1. Ubicación de la comunidad de San Mateo



Fuente: Google Earth

Figura 3.2. Coordenadas de la chancadora Garzón



Fuente: Google Earth

Departamento	Tarija
Provincia	Cercado
Micro localización	Comunidad de San Mateo
Coordenadas geográficas	Latitud: 21° 28' 15,44" Longitud: 64° 45' 3,61"
Coordenadas UTM (m)	X: 318576,48 Y: 7624713,99 Zona: 20

3.2. Criterio de los ciclos de saturación de las muestras

Según la norma AASHTO T-283, para el ensayo de tracción indirecta, donde se evalúa la susceptibilidad a la humedad en los distintos ciclos de saturación de 0 hrs y 24 hrs debido a que se realiza una relación entre las secas y húmedas que deben cumplir la especificación, donde la resistencia conservada debe ser mayor a 80%, del grupo húmedo respecto del grupo seco.

En el trabajo de investigación se realizó los ciclos de saturación a 24, 36 y 48 hrs, debido a la disponibilidad de tiempo para hacer los ensayos de manera que se podrá experimentar el comportamiento de las mezclas asfálticas en los distintos ciclos de saturación a una temperatura de 60°C y ver si en estos ciclos cumple con la resistencia conservada.

3.3. Criterios de selección de asfalto

Se utilizó dos cementos asfálticos, el primero es el cemento asfáltico convencional 85/100 de procedencia colombiana que es empleado en la posta municipal de Tarija y el segundo es el cemento asfáltico modificado con polímero 50/75 de procedencia chilena que está siendo empleado en el proyecto de construcción carretera Uyuni-Tupiza tramo I.

3.4. Criterio para el número de briquetas de mezclas asfálticas

Para determinar el número de briquetas se debe en primera instancia determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, para el cual se elaboró 18 briquetas con 6 porcentajes diferentes de cemento asfáltico según método Marshall.

Con el contenido óptimo establecido para ambos tipos de cementos asfálticos, se elaboran las briquetas para someterlas a diferentes ciclos de saturación y determinar los efectos de la humedad en la adherencia y resistencia mediante los ensayos de Marshall, para evaluar la estabilidad y fluencia, determinando la resistencia remanente y el ensayo de tracción indirecta para determinar su resistencia a tensión indirecta (TSR) y determinar el índice de resistencia conservada (IRC).

Detalle de la comparación y ensayos a realizar:

Tabla 3.1. Total de briquetas para la evaluación del daño por humedad

Ensayo Marshall	Descripción	Cantidad (unidad)
	Mezclas convencionales	3
	24	3
	36	3
	48	3
	Descripción	Cantidad (unidad)
	Mezclas con polímeros	3
	24	3
	36	3
	48	3
Ensayo tensión indirecta (TSR)	Descripción	Cantidad (unidad)
	Mezclas convencionales	3
	24	3
	36	3
	48	3
	Descripción	Cantidad (unidad)
	Mezclas con polímeros	3
	24	3
	36	3
	48	3
Total		48
Briquetas elaboradas para hallar el porcentaje óptimo para CA 85/100 y CA modificado con polímero SBS 50/70		36
Total de briquetas elaboradas para los ensayos		84

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Muestra

Ciclos de saturación adicionados a las mezclas asfálticas convencionales y modificadas utilizando agregados provenientes de la chancadora Garzón, cuyo material cumplirá con las exigencias de las mezclas asfálticas elaboradas. El cemento asfáltico convencional 85/100, es de procedencia colombiana y el cemento asfáltico modificado de procedencia chilena.

3.6. Muestreo

El muestreo se lo realizará con el método Marshall (ASTM D-3515) y el ensayo a tensión indirecta (AASHTO T-283) con el cual podremos realizar la evaluación del efecto de la humedad en el comportamiento de la estabilidad, fluencia y la resistencia a la tensión de dichos ensayos y se observará los cambios que se generan a causa de los ciclos de saturación de las mezclas elaboradas con cemento asfáltico convencional y modificado elaborados con materiales que se utilizan en la ciudad de Tarija.

Forma de muestreo no probabilístico.

Tabla 3.2. Ensayos de la muestra estratificada

Fase de la investigación	N	Nombre de los ensayos	Cantidad de ensayos
Pruebas del agregado grueso y fino	1	Granulometrías de áridos	15
	2	Densidad aparente	15
	3	Peso específico y absorción de agregado grueso	10
	4	Peso específico y absorción de agregado fino	5
	5	Equivalente de arena	5
	6	Desgaste de los ángeles	6
	7	Porcentaje de caras fracturas	3
	8	Partículas laminares, chatas y alargadas	3
Pruebas del cemento asfáltico	9	Peso específico	5
	10	Punto de inflamación	5
	11	Punto de ablandamiento	5
	12	Penetración CA	5
	13	Viscosidad	5
	14	Ductilidad	5
Pruebas de pre diseño encontrando los valores óptimos	15	Estabilidad y fluencia para asfalto convencional	30
	16	Estabilidad y fluencia para asfalto modificado	30
Pruebas finales	17	Estabilidad final y flujo	42
	18	Tracción indirecta	42
Total de ensayos		Total de ensayos	236

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 3.3. Análisis estadístico

Nivel de confianza (NC) %	Variable Z
90	1,64
95	1,96
97	2,17
98	2,33

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el análisis estadístico se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

Donde:

N = Población

σ^2 = Parámetro estadístico (0,2)

n = Tamaño de la muestra

NC = Nivel de confiabilidad (95%)

Z = Variable estandarizada (1,96 para el 95% de confiabilidad)

e = Margen de error (0,05)

Tabla 3.4. Cálculo de muestra estratificada

N	Nombre de los ensayos	Cantidad de ensayos	σ^2	$N_i \sigma^2$	fi	ni	ni
1	Granulometrías de áridos	15	0,2	3	0,064	8,517	9
2	Densidad aparente	15	0,2	3	0,064	8,517	9
3	Peso específico y absorción de agregado grueso	10	0,2	2	0,042	5,678	6
4	Peso específico y absorción de agregado fino	5	0,2	1	0,021	2,839	3
5	Equivalente de arena	5	0,2	1	0,021	2,839	3
6	Desgaste de los ángeles	6	0,2	1,2	0,025	3,407	4
7	Porcentaje de caras fracturas	3	0,2	0,6	0,013	1,703	2
8	Partículas laminares, chatas y alargadas	3	0,2	0,6	0,013	1,703	2
9	Peso específico	5	0,2	1	0,021	2,839	3
10	Punto de inflamación	5	0,2	1	0,021	2,839	3
11	Punto de ablandamiento	5	0,2	1	0,021	2,839	3
12	Penetración CA	5	0,2	1	0,021	2,839	3
13	Viscosidad	5	0,2	1	0,021	2,839	3
14	Ductilidad	5	0,2	1	0,021	2,839	3
15	Estabilidad y fluencia para asfalto convencional	30	0,2	6	0,127	17,034	18
16	Estabilidad y fluencia para asfalto modificado	30	0,2	6	0,127	17,034	18
17	Estabilidad final y flujo	42	0,2	8,4	0,178	23,847	24
18	Tracción indirecta	42	0,2	8,4	0,178	23,847	24
Total de ensayos		236		47,2		134	140

Fuente: Elaboración propia.

$$n = \frac{47,2}{236 \left(\frac{0,05}{1,96} \right)^2 + \frac{47,2}{236}} = 140$$

Resultados de cantidad de ensayos

Tabla 3.5. Resultado de muestra estratificada

N	Nombre de los ensayos	ni
1	Granulometrías de áridos	9
2	Densidad aparente	9
3	Peso específico y absorción de agregado grueso	6
4	Peso específico y absorción de agregado fino	3
5	Equivalente de arena	3
6	Desgaste de los ángeles	4
7	Porcentaje de caras fracturas	2
8	Partículas laminares, chatas y alargadas	2
9	Peso específico	3
10	Punto de inflamación	3
11	Punto de ablandamiento	3
12	Penetración CA	3
13	Viscosidad	3
14	Ductilidad	3
15	Estabilidad y fluencia para asfalto convencional	18
16	Estabilidad y fluencia para asfalto modificado	18
17	Estabilidad final y flujo	24
18	Tracción indirecta	24
Total de ensayos		140

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Levantamiento de la información

3.7.1. Caracterización del material pétreo

Los agregados utilizados en la investigación son de la chancadora Garzón ubicada en San Mateo. Para la caracterización de los agregados se realizaron los ensayos que muestran la calidad que presentan, para ellos se muestran todos los ensayos realizados.

Se realizó la caracterización de los agregados pétreos:

- a) Grava 3/4"
- b) Gravilla 3/8"
- c) Arena triturada.

3.7.1.1. Ensayo de granulometría

Norma: (AASHTO T-27) (ASTM C-136)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente.

En el método de la AASHTO T-27 y ASTM C-136 se describe el procedimiento detallado para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Figura 3.3. Tamices para granulometría de agregado fino



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Tamices para granulometría de agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 1

Peso total seco (gr)	5000		5000		1000	
Tamices	Grava 3/4"		Gravilla 3/8"		Arena	
Nº	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	117,00	97,66	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3475,10	30,50	19,70	99,61	0,00	100,00
3/8"	4669,70	6,61	686,60	86,27	0,00	100,00
Nº4	4997,10	0,06	4262,50	14,75	50,80	94,92
Nº8	4997,20	0,06	4991,80	0,16	228,20	77,18
Nº16	4997,20	0,06	4996,70	0,07	365,60	63,44
Nº30	4997,20	0,06	4996,80	0,06	499,70	50,03
Nº50	4997,20	0,06	4996,90	0,06	691,20	30,88
Nº100	4997,20	0,06	4996,90	0,06	888,00	11,20
Nº200	4998,70	0,03	4998,50	0,03	971,00	2,90

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 2

Peso total seco (gr)	5000		5000		1000	
Tamices	Grava 3/4"		Gravilla 3/8"		Arena	
Nº	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	157,40	96,85	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3487,30	30,25	19,30	99,61	0,00	100,00
3/8"	4683,40	6,33	730,00	85,40	0,00	100,00
Nº4	4997,70	0,05	4206,00	15,88	4,44	95,56
Nº8	4998,00	0,04	4975,50	0,49	26,30	73,70
Nº16	4998,00	0,04	4993,00	0,14	42,35	57,65
Nº30	4998,00	0,04	4994,20	0,12	54,85	45,15
Nº50	4998,00	0,04	4994,80	0,10	70,53	29,47
Nº100	4998,00	0,04	4995,60	0,09	86,76	13,24
Nº200	4999,20	0,02	4998,10	0,04	96,01	3,99

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 3

Peso total seco (gr)	5000		5000		1000	
Tamices	Grava 3/4"		Gravilla 3/8"		Arena	
Nº	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	83,00	98,34	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3126,20	37,48	15,00	99,70	0,00	100,00
3/8"	4443,10	11,14	649,70	87,01	0,00	100,00
Nº4	4995,90	0,08	4167,80	16,64	5,13	94,87
Nº8	4996,60	0,07	4986,90	0,26	24,18	75,82
Nº16	4997,60	0,05	4995,60	0,09	39,34	60,66
Nº30	4997,60	0,05	4996,70	0,07	52,95	47,05
Nº50	4997,60	0,05	4996,90	0,06	71,63	28,37
Nº100	4997,60	0,05	4997,10	0,06	89,32	10,68
Nº200	4998,90	0,02	4998,80	0,02	97,39	2,61

Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.2. Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles

Norma: (AASHTO T-96) (ASTM C-131)

Los agregados deben ser lo suficientemente estables ante los efectos impuestos por el manipuleo durante su paso a través de la planta de asfalto – que producen choques entre granos y de granos con componentes metálicos de la planta–, y procesos de compactación en las etapas de construcción, y ante los esfuerzos impuestos por las cargas en el período de acción bajo el tráfico. Estos efectos y esfuerzos tienden a triturar y degradar las partículas, y la habilidad de un material para mantener su granulometría original ante ellos, se define como su resistencia.

Los ensayos que se utilizan para medir la resistencia de los agregados a estos efectos y esfuerzos son el de desgaste los Ángeles (DLA) normalizado por la ASTM bajo el número C-131.

Este ensayo mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión. Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,5 mm (1 1/2") y

agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4”), por medio de la máquina de los Ángeles. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en las normas AASHTO T-96 y ASTM C-131.

Figura 3.5. Máquina de desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6. Realización del ensayo de desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9. Agregados gruesos y el N° de esferas para desgaste de los Ángeles

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"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6

Fuente: Elaboración propia.

La grava de 3/4" corresponde a la gradación B, por lo que se pesó 2500±10 gr, de material que pasa el tamiz 3/4" y se retiene en el 1/2", también se pesó 2500±10 gr, de material que pasa el tamiz 1/2" y se retiene en el 3/8", teniendo un peso inicial de 5000±10 gr.

Posterior a esto, se debe introducir el material en la máquina de los Ángeles y se procede a realizar el ensayo, utilizando 500 revoluciones y 11 esferas de carga abrasiva.

Una vez terminado el ensayo se tamiza el material por el método del lavado en el tamiz Nº12 con una abertura de 1,7 mm de abertura, el material retenido se seca en el horno durante un tiempo de 24 ± 1 hr para obtener el peso final.

Tabla 3.10. Datos de la grava 3/4" para el ensayo

Pasado	Retenido	Cantidad tomada (gr)
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
Peso inicial		5000
Retenido tamiz de corte Nº12 (1,7 mm)		4006,5
Tipo de gradación "B"		
Diferencia		993,5
Número de ensayos realizados		1
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar se determina el porcentaje de desgaste con la siguiente fórmula:

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

$$\% \text{ desgaste} = \frac{993,5}{5000} * 100$$

$$\% \text{ desgaste} = 19,87\%$$

La gravilla de 3/8" corresponde a la gradación C, por lo que se pesó 2500±10 gr, de material que pasa el tamiz 3/8" y se retiene en el 1/4", también se pesó 2500±10 gr, de material que pasa el tamiz 1/4" y se retiene en el N°4, teniendo un peso inicial para el ensayo de 5000±10 gr.

Posterior a esto, se debe introducir el material en la máquina de los Ángeles y se procede a realizar el ensayo, utilizando 500 revoluciones y 8 esferas de carga abrasiva.

Una vez terminado el ensayo, se tamiza el material por el método del lavado en el tamiz N°12 con una abertura de 1,7 mm de abertura, el material retenido se seca en el horno durante un tiempo de 24±1 hr para obtener el peso final.

Tabla 3.11. Datos de la gravilla 3/8" para el ensayo

Pasado	Retenido	Cantidad tomada (gr)
3/8"	1/4"	2500
1/4"	N°4	2500
Peso inicial		5000
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7 mm)		3888,4
Tipo de gradación "C"		
Diferencia		1111,6
Número de ensayos realizados		1
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar se determina el porcentaje de desgaste con la siguiente fórmula:

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

$$\% \text{ desgaste} = \frac{1111,6}{5000} * 100$$

$$\% \text{ desgaste} = 22,23\%$$

3.7.1.3. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos

Norma: (AASHTO T-85) (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Este ensayo se utilizó para la medición del peso específico de la gravilla 3/8" y la grava 3/4".

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

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de peso específico de la grava 3/4"

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,61	2,64	2,69	1,13
2	2,60	2,63	2,69	1,23
	2,61	2,64	2,69	1,18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla 3/8"

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,58	2,62	2,70	1,71
2	2,57	2,62	2,69	1,77
	2,57	2,62	2,70	1,74

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7. Calibración de la balanza mecánica para el peso sumergido



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8. Canastillo para el peso sumergido de agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.4. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos

Norma: (AASHTO T-84) (ASTM C-128)

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

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

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

Muestra N°	P.E. a granel (gr/cm ³)	P. E. saturado con sup. seca (gr/cm ³)	P. E. aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,63	2,68	2,76	1,72
2	2,66	2,70	2,78	1,58
3	2,62	2,67	2,75	1,74
	2,64	2,68	2,77	1,71

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Matraz con el agregado fino para peso específico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10. Arena para el ensayo de peso específico para agregado fino



Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.5. Ensayo de peso unitario de los agregados

Norma: (AASHTO T-19) (ASTM C-29)

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ellos se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el método AASHTO T-19 y ASTM C-29.

Tabla 3.15. Resultados del ensayo para peso unitario suelto

Muestra N°	Grava 3/4"	Gravilla 3/8"	Arena
	Peso unitario suelto (gr/cm ³)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)
1	1,513	1,442	1,613
2	1,504	1,459	1,636
3	1,484	1,459	1,638
	1,500	1,453	1,629

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo para peso unitario compactado

Muestra N°	Grava 3/4"	Gravilla 3/8"	Arena
	Peso unitario compactado (gr/cm ³)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)
1	1,590	1,510	1,740
2	1,589	1,516	1,754
3	1,586	1,532	1,750
	1,588	1,519	1,748

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11. Enrazado del agregado grueso para el peso unitario suelto



Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.6. Ensayo de equivalente de arena

Norma: (AASHTO T-176) (ASTM D-2419)

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N°4 (4,75mm).

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

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	11,80	10,60	89,83
2	11,90	10,70	89,92
3	11,60	10,60	91,38
	Promedio		90,38

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12. Muestras en reposo



Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.7. Ensayo de porcentaje de caras fracturadas

Norma: (ASTM D-5821-95)

Este ensayo se realiza para determinar el porcentaje del peso de la muestra que se utilizó del agregado en las diferentes caras fracturadas.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el método ASTM de 5821-95 manual de la administración boliviana de carreteras (ABC).

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de caras fracturadas

Ensayo	Grava 3/4"	Gravilla 3/8"
1	90,87	89,38
2	90,32	89,73
3	91,06	87,49
Promedio	90,8	88,9

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13. Separando las muestras para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.8. Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas

Norma: (ASTM D-4791)

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el método ASTM D-4791.

Tabla 3.19. Resultados del ensayo para grava 3/4"

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas chatas alargadas (gr)	% retenido partículas chatas alargadas
3/4"	5000	72,0	1,44
Peso total de la muestra	5000		
(% Total de partículas laminares (máximo 10%))			1,44

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20. Resultados del ensayo para gravilla 3/8"

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas chatas alargadas (gr)	% retenido partículas chatas alargadas
3/8"	5000	235,1	4,70
Peso total de la muestra	5000		
(% Total de partículas laminares (máximo 10%))			4,70

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14. Aparato para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2. Caracterización del cemento asfáltico convencional 85/100

El cemento asfáltico a utilizarse es el convencional 85/100 de procedencia colombiana y fue proporcionada por la posta municipal de Tarija. Para el cual se realizó los siguientes ensayos de caracterización:

3.7.2.1. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol

Norma: (AASHTO T-72) (ASTM D-244)

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos necesarios para que pasen 60 ml de líquido, a una temperatura determinada.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-72 y ASTM D-244.

Tabla 3.21. Resultado del ensayo de viscosidad Saybolt-Furol del C.A. 85/100

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C	s SF	90	109,0	101,0	100,0	85	400

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.15. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol para el C.A. 85/100



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.2. Ensayo de penetración

Norma: (AASHTO T49-97) (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetros hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T49-97 y ASTM D-5.

Tabla 3.22. Resultados del ensayo de penetración del C.A. 85/100

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100 gr 5 seg (AASHTO T49-97)							
Lectura N°1	0,1 mm	96	93	93	86	85	100
Lectura N°2	0,1 mm	83	91	87			
Lectura N°3	0,1 mm	75	80	79			
Penetración promedio	0,1 mm	85	88	86			

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de penetración de 86 mm a 25°C, con una carga de 100 gr cada 5 seg.

Figura 3.16. Equipo de penetración



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.3. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland

Norma: (AASHTO T 79-96) (ASTM D 1310-01)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el método AASHTO T 79-96 y ASTM D 1310-01.

Tabla 3.23. Resultados del ensayo de punto de inflamación del C.A. 85/100

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de inflamación (AASHTO T79-96)	°C	240	230	236	235	232	-

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados tenemos 235°C.

Figura 3.17. Aparato de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.4. Peso específico del asfalto

Norma: (AASHTO T 229-97) (ASTM D-71)

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T 229-97 y ASTM D-71.

Tabla 3.24. Resultados del ensayo de peso específico para el C.A. 85/100

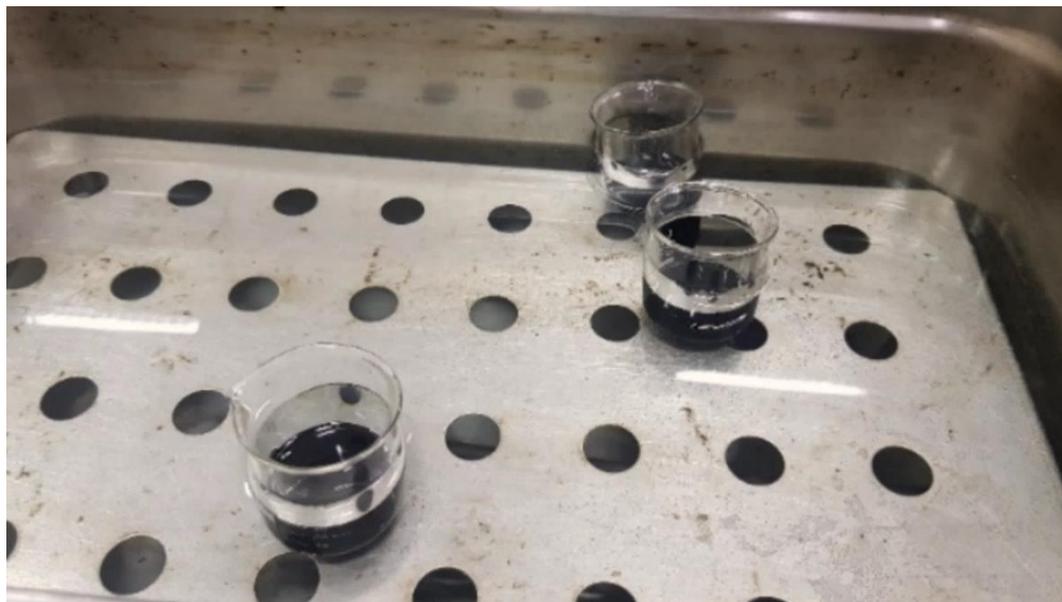
Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Peso específico a 25°C (AASHTO 7229-97)							
Peso picnómetro	gr	34,0	35,8	34,6	1,001	1	1,05
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr	88,3	86,5	87,9			
Peso picnómetro + muestra	gr	65,5	64	65,6			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	87,8	86,6	88,6			
Peso específico promedio	gr/cm ³	0,981	1,001	1,020			

Fuente: Elaboración propia.

Resultado

Peso específico del C.A. = 1,001 gr/cm³.

Figura 3.18. Frascos calibrados para el peso específico del C.A. 85/100



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.5. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola

Norma: (AASHTO T-53-96) (ASTM D-36)

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

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASHTO T-53-96 y ASTM D-36.

Tabla 3.25. Resultados de punto de ablandamiento para el C.A. 85/100

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	46,5	47,0	46,0	47	42	53

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo: se realizó a proceder a tomar un promedio de las muestras de manera de obtener un resultado más claro del ensayo obtuvimos 47°C.

Figura 3.19. Ensayo de punto de ablandamiento de C.A. 85/100 en ejecución



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.6. Ensayo de ductilidad

Norma: (AASHTO T 51-00) (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm, a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen en detalle en los métodos AASHTO T 51-00 y ASTM D-113.

Tabla 3.26. Resultados del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85/100

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	112	106	108	109	100	-

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo: se realizó a proceder a tomar un promedio de las muestras de manera de obtener un resultado más claro del ensayo obtuvimos una ductilidad de 109 cm.

Figura 3.20. Moldes de ductilidad con cemento asfáltico 85/100



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3. Caracterización del cemento asfáltico modificado con polímero SBS 50/75.

El cemento asfáltico modificado que se utilizó es el cemento asfáltico modificado con polímero SBS 50/75 de procedencia chilena, la ficha técnica del cemento asfáltico modificado con polímero SBS que fueron proporcionados por el laboratorio de la asociación accidental Santa Fe, se adjunta en el siguiente cuadro:

Tabla 3.27. Especificación técnica del C.A. modificado con polímero SBS

Descripción	Método AASHTO ASTM	Ensayos		Especificaciones ficha técnica
		1	2	
Peso específico (25°C)	T-228	1,017	1,016	-
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg	T-49	75	75	50-75
Penetración a 4°C, 200gr. 60seg.	T-49	30	31	Min 25
Punto de inflamación copa abierta de Cleveland (°C)	T-48	278	330	Min 232,2
Punto de ablandamiento (°C)	T-53	67	67	-
Recuperación elástica a 25°C (%)	T-301	92	92	-
Ductilidad a 25°C y 5 (cm/mm), (cm)	T-51	105	104	-
Viscosidad Brookfield a 135°C (cP)	TP-48	1093	1090	Max 2999
Viscosidad Brookfield a 145°C (cP)	TP-48	448	448	-
Viscosidad Brookfield a 175°C (cP)	TP-48	208	208	-

Fuente: Especificación técnica del fabricante.

3.7.3.1. Ensayo de penetración

Norma: (AASHTO T49-97) (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetros hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T49-97 y ASTM D-5.

Tabla 3.28. Resultados del ensayo de penetración del C.A. 50/75

Ensayo	Unidad	Muestras		Resultado	Especificaciones	
		1	2		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100 gr 5 seg (AASHTO T49-97)						
Lectura N°1	0,1 mm	76	78	75	50	75
Lectura N°2	0,1 mm	72	71			
Lectura N°3	0,1 mm	75	77			
Penetración promedio	0,1 mm	74	75			

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de penetración de 75mm a 25°C, aplicando una carga de 100 gr cada 5 seg.

3.7.3.2. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland

Norma: (AASHTO T-79-96) (ASTM D-1310-01)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el método AASHTO T-79-96 y ASTM D-1310-01.

Tabla 3.29. Resultados del ensayo de punto de inflamación del C.A. 50/75

Ensayo	Unidad	Muestras		Resultado	Especificaciones	
		1	2		Mínimo	Máximo
Punto de inflamación (AASHTO T79-96)	°C	294	272	283	232	-

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados obtenemos 283°C.

3.7.3.3. Peso específico del asfalto

Norma: (AASHTO T 229-97) (ASTM D-71)

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T 229-97 y ASTM D-71.

Tabla 3.30. Datos y resultados de peso específico para el C.A. 50/75

Ensayo	Unidad	Muestras		Resultado	Especificaciones	
		1	2		Mínimo	Máximo
Peso específico a 25°C (AASHTO 7229-97)						
Peso picnómetro	gr	34,4	35,4	1,004	1	1,05
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr	87,2	89,7			
Peso picnómetro + muestra	gr	68,2	68,5			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	88,6	88,8			
Peso específico promedio	gr/cm ³	1,037	0,971			

Fuente: Elaboración propia.

Resultado

Peso específico del CA = 1,004 gr/cm³

Figura 3.21. Peso para el ensayo de peso específico del C.A. modificado 50/75



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3.4. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola

Norma: (AASHTO T-53) (ASTM D-36)

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

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASHTO T-53 y ASTM D-36.

Tabla 3.31. Resultados de punto de ablandamiento del C.A 50/75

Ensayo	Unidad	Muestras		Resultado	Especificaciones	
		1	2		Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	72,0	69,0	71	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo: se realizó a proceder a tomar un promedio de las muestras de manera de obtener un resultado más claro del ensayo obtuvimos 71°C.

Figura 3.22. Ensayo de punto de ablandamiento de C.A. 50/75



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3.5. Ensayo de ductilidad

Norma: (AASHTO T 51-00) (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm, a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen en detalle en los métodos AASHTO T 51-00 y ASTM D-113.

Tabla 3.32. Resultados de ductilidad del cemento asfáltico modificado 50/75

Ensayo	Unidad	Muestras		Resultado	Especificaciones	
		1	2		Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	103	106	105	100	-

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo: se realizó a proceder a tomar un promedio de las muestras de manera de obtener un resultado más claro del ensayo obtuvimos una ductilidad de 105 cm.

NOTA: PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLÍMERO SBS 50/75, NO SE REALIZÓ EL ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL DEBIDO A QUE LA NORMA DE LA ABC NO LO SEÑALA EN LAS ESPECIFICACIONES A02 ENSAYOS RELACIONADOS A CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS.

3.8. Diseño Marshall para mezclas asfálticas

3.8.1. Agregados pétreos

Se presentan los resultados obtenidos de la recolección la información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO. El resumen de los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos se mostrará en la siguiente tabla:

Tabla 3.33. Resumen de resultados de granulometrías de los agregados

Peso total seco (gr)	5000		5000		1000	
Tamices	Grava 3/4"		Gravilla 3/8"		Arena	
Nº	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total	Ret. Acum	% que pasa del total
1"	0,00	100,00	0,00	100,00		
3/4"	119,13	97,62	0,00	100,00		
1/2"	3362,87	32,74	18,00	99,64	0,00	100,00
3/8"	4598,73	8,03	688,77	86,22	0,00	100,00
Nº4	4996,90	0,06	4212,10	15,76	48,83	95,12
Nº8	4997,27	0,05	4984,73	0,31	244,33	75,57
Nº16	4997,60	0,05	4995,10	0,10	394,17	60,58
Nº30	4997,60	0,05	4995,90	0,08	525,90	47,41
Nº50	4997,60	0,05	4996,20	0,08	704,27	29,57
Nº100	4997,60	0,05	4996,53	0,07	882,93	11,71
Nº200	4998,93	0,02	4998,47	0,03	968,33	3,17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.34. Tabla resumen de resultados de la caracterización del agregado

Agregado grueso y fino						
Ensayos	Agregado	Especificación		Resultado	Norma	
		Min.	Máx.		ASTM	AASHTO
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35%	19,87%	C-131	T-96
	Gravilla 3/8"	-	35%	22,23%		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	-	-	2,69 gr/cm ³	C-127	T-85
	Gravilla 3/8"	-	-	2,70 gr/cm ³		
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,77 gr/cm ³	C-128	T-84
Peso unitario	Grava 3/4"	-	-	1,59 gr/cm ³	C-29	T-19
	Gravilla 3/8"	-	-	1,52 gr/cm ³		
	Arena	-	-	1,75 gr/cm ³		
Equivalente de arena	Arena	45%	-	90,38%	D-2419	T-176
Porcentaje de caras fracturadas	Grava 3/4"	75%	-	90,77%	D-5821	-
	Gravilla 3/8"	75%	-	88,87%		
Partículas largas y achatadas	Grava 3/4"	-	10%	1,44%	D-4791	-
	Gravilla 3/8"	-	10%	4,70%		

Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Cemento asfáltico convencional 85/100

Se presentan los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por las normas ASTM.

Tabla 3.35. Resultados de caracterización de C.A. convencional 85/100

Cemento asfáltico convencional 85/100					
Ensayos	Especificación		Resultado	Norma	
	Min.	Máx.		ASTM	AASHTO
Penetración	85	100	86	D-5	T 49-97
Viscosidad Saybolt-Furol	85	400	100	D-244	T-72
Punto de inflamación	232	-	235	D 1310-01	T 79-96
Peso específico	1	1,05	1,001	D-71	T 229-97
Punto de ablandamiento	42	53	47	D-36	T 53-96
Ductilidad	100	-	109	D-113	T 51-00

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3. Cemento asfáltico modificado 50/75

Se presentan los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por las normas ASTM.

Tabla 3.36. Resultados de caracterización de C.A. modificado 50/75

Cemento asfáltico modificado 50/75					
Ensayos	Especificación		Resultado	Norma	
	Min.	Máx.		ASTM	AASHTO
Penetración	50	75	75	D-5	T 49-97
Punto de inflamación	232	-	283	D 1310-01	T 79-96
Peso específico	1	1,05	1,004	D-71	T 229-97
Punto de ablandamiento	-	-	71	D-36	T 53-96
Ductilidad	100	-	105	D-113	T 51-00

Fuente: Elaboración propia.

3.8.4. Diseño por el método Marshall para el contenido óptimo

Se realizó la dosificación para una mezcla densa, cuyos límites granulométricos deben estar en función del tamaño máximo nominal del agregado que es de 3/4", con un porcentaje de vacíos de 4%, el cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.37. Designación de mezcla para el tamaño máximo nominal

Tamaño de tamiz	37,5 mm (1 1/2 in)	25 mm (1 in)	19 mm (3/4 mm)	12,5 mm (1/2 in)	9,5 mm (3/8 in)
50 mm (2 in)	100				
37,5 mm (1 1/2 in)	90-100	100	-	-	-
25 mm (1 in)	-	90-100	100	-	-
19 mm (3/4 in)	56-80	-	90-100	100	-
12,5 mm (1/2 in)	-	56-80	-	90-100	100
9,50 mm (3/8 in)	-	-	56-80	-	90-100
4,75 mm (N°4)	23-53	29-59	35-65	44-54	55-85
2,36 mm (N°8)	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
1,18 mm (N°16)	-	-	-	-	-
0,6 mm (N°30)	-	-	-	-	-
0,3 mm (N°50)	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,15 mm (N°100)	-	-	-	-	-
0,075 mm (N°200)	0-5	1-7	2-8	2-10	2-10
Cemento asfáltico porcentaje en peso total de la mezcla	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del

Asphalt Institute serie de manuales N°22 (MS-22)

Se realizó las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones, lo que determinó la faja de la granulometría de la mezcla asfáltica convencional 85/100 y la modificada 50/75, las mismas se desarrollaron en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, se estableció que la mezcla de agregados está compuesta por el 40% de agregado fino, 26% de grava de 3/4” y 30% de gravilla de 3/8” para la granulometría de la mezcla, los cuales cumplen con las especificaciones del manual de la administradora boliviana de carreteras (ABC) por lo que se da por aceptado los factores de combinación, para los rangos establecidos de la faja de 3/4” de tamaño máximo nominal con 4 a 10% de vacíos.

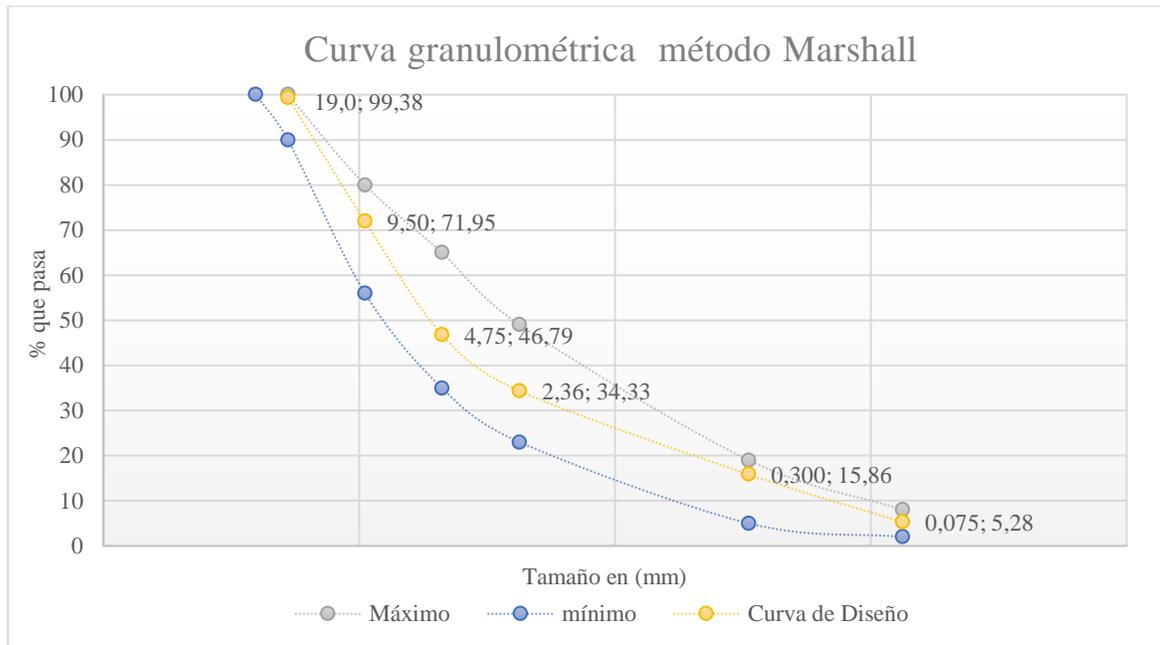
A continuación, se mostrarán los pesos para la dosificación con los porcentajes establecidos que cumplen para la faja de 3/4” de tamaño máximo nominal con 4 a 10% de vacíos, para una mezcla asfáltica densa:

Tabla 3.38. Dosificación para la mezcla asfáltica densa

		Dosificación				Curva de dosificación		Especificaciones	
Tamices	Tamaño	Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
	(mm)	26,00	30,00	40,00	4,00			Mínimo	Máximo
1”	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4”	19,0	30,97	0,00	0,00	0,00	0,62	99,38	90	100
1/2”	12,5	843,37	5,40	0,00	0,00	17,59	82,41	-	-
3/8”	9,50	321,33	201,23	0,00	0,00	28,05	71,95	56	80
N°4	4,75	103,52	1057,00	97,67	0,00	53,21	46,79	35	65
N°8	2,36	0,10	231,79	391,00	0,00	65,67	34,33	23	49
N°16	1,18	0,09	3,11	299,67	0,00	71,72	28,28	-	-
N°30	0,60	0,00	0,24	263,47	0,00	77,00	23,00	-	-
N°50	0,30	0,00	0,09	356,73	0,00	84,14	15,86	5	19
N°100	0,15	0,00	0,10	357,33	0,00	91,28	8,72	-	-
N°200	0,075	0,35	0,58	170,80	0,00	94,72	5,28	2	8

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.1. Curva granulométrica de la mezcla según diseño Marshall



Fuente: Elaboración propia.

Contenido mínimo de cemento asfáltico

Con la granulometría de los agregados se determinó el porcentaje mínimo de cemento asfáltico, donde se utilizó el método basado en la distribución de tamaño de partículas:

$$P = 0,020a + 0,045b + cd$$

Donde:

a = Porcentaje de material retenido en la malla N°10

b = Porcentaje que pasa malla N°10 y se retiene en N°200

c = Porcentaje que pasa malla N°200

d = Coeficiente asfáltico según el tipo de material

Tabla 3.39. Índice asfáltico para la distribución de tamaño de partículas

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0,15
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0,20
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0,30
Gravas trituradas de alta absorción	0,35

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando los datos en la fórmula tenemos:

$$P = 0,020 * 67,52 + 0,045 * 27,20 + 5,28 * 0,35$$

$$P = 4,42\%$$

Dando como resultado un porcentaje de contenido mínimo de cemento asfáltico de 4,42% al cual se debe restar 1% para el primer porcentaje y para los siguientes se suma un 0,5%, respecto del contenido mínimo calculado, con los cuales se determina seis porcentajes con diferentes contenidos de cementos asfálticos, para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico, estos porcentajes se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.40. Variaciones del porcentaje de asfalto para el porcentaje óptimo

Porcentaje de cemento asfáltico (% de CA)	Número de briquetas (unidad)
3,42	3
4,42	3
4,92	3
5,42	3
5,92	3
6,42	3
Total de briquetas elaboradas	18

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado los porcentajes de agregado de la mezcla, se procede a calcular las cantidades de cada uno de sus componentes, las cantidades utilizadas para la dosificación se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.41. Dosificación para el contenido óptimo de asfalto 85/100

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	3,42%	4,42%	4,92%	5,42%	5,92%	6,42%
Porcentaje de agregado (%)	96,58%	95,58%	95,08%	94,58%	94,08%	93,58%
Peso del cemento asfáltico (gr) *	41,04	53,04	59,04	65,04	71,04	77,04
Peso de grava (gr) *	301,33	298,21	296,65	295,09	293,53	291,97
Peso de gravilla (gr) *	347,69	344,09	342,29	340,49	338,69	336,89
Peso de arena (gr) *	463,58	458,78	456,38	453,98	451,58	449,18
Peso de filler (gr) *	46,36	45,88	45,64	45,40	45,16	44,92
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó las 18 briquetas con los porcentajes obtenidos, de igual manera varió el porcentaje de agregados en la mezcla y se utilizó estos mismos porcentajes para ambos tipos de asfaltos, ya que para ambas mezclas es el mismo agregado.

Tabla 3.42. Planilla de criterios de diseño Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336	-	5338	-	8006	-
(lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo (0,25 mm) (0,01")	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Criterios del instituto del asfalto USA para el diseño Marshall.

3.8.5. Desarrollo de la elaboración de las briquetas

Equipo:

- Martillo de compactación.
- Moldes de briquetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza de precisión de $\pm 0,1$ gr.
- Bandejas metálicas.
- Estufa.
- Termómetro.
- Espátula.
- Medidor de estabilidad.
- Agregado.
- Cemento asfáltico.

Procedimiento del ensayo:

Antes de preparar la mezcla se debe tener pesados los agregados de acuerdo a cada porcentaje de cemento en la mezcla, los materiales a utilizar deben estar limpios y se tiene que lubricar los moldes de briquetas para poder desmoldar con mayor facilidad, luego se

vierte el material en una bandeja metálica y se calienta hasta alcanzar una temperatura de 150 a 170°C. Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140°C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se mezcla el asfalto con los agregados hasta obtener una mezcla homogénea la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C y en ningún caso someterse a recalentamiento.

Figura 3.23. Elaboración de briquetas



Elaboración de briquetas con mezclas asfálticas convencionales 85/100.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se coloca la mezcla en el molde para briquetas que tiene 4" de diámetro interior y 3" de altura, y se distribuye la mezcla en 3 capas y compacta con 25 golpes cada una, luego se debe compactar con el martillo Marshall compuesto de:

Un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla al compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y altura de caída libre es de 18".

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura 3.24. Compactación y desmolde de briquetas



Se compacta aparato del martillo Marshall, con 75 golpes por cara, diseñado para tráfico pesado, posterior a su enfriado se desmolda en el gato hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.6. Ensayo de Marshall

Una vez realizadas las briquetas, se proceden a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa Marshall.

Primero se debe medir con un vernier las alturas en 4 puntos de las briquetas para determinar la altura media que será corregida por un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo de las muestras deben ser sumergidas en baño de agua a 60°C durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 min.

Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que es el indicador del dial que se encuentre en la posición correspondiente a cero. Se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto (2"/minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C 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 se anota esta lectura como valor de flujo de las briquetas, expresado en centésimas de pulgada.

Figura 3.25. Medición de las alturas de briquetas y rotura en la prensa Marshall



Se debe pesar y medir las briquetas para determinar sus propiedades mecánicas para posteriormente romper con la prensa Marshall.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.7. Procedimiento de cálculo para el ensayo Marshall

Se desarrollará el procedimiento del ensayo de una briqueta con el porcentaje de 3,42% del cemento asfáltico convencional 85/100 para un mayor entendimiento del ensayo.

3.8.7.1. Alturas de briquetas

Se miden las alturas después de desmoldar, la medición se la realiza en 4 puntos de la briqueta y se calcula la altura promedio de la briqueta:

Tabla 3.43. Alturas para la briqueta 3,42%

Identificación	Alturas (cm)	Promedio de alturas (cm)
3,42	6,29	6,30
	6,35	
	6,30	
	6,27	

Fuente: Elaboración propia.

3.8.7.2. Base de mezcla y agregado

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 3,42%.

Mientras que para la base de agregados se realiza el siguiente procedimiento de cálculo:

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

$$\text{Base de agregado} = \frac{3,42 * 100}{100 - 3,42}$$

$$\text{Base de agregado} = 3,54$$

3.8.7.3. Peso de briqueta en el aire

El peso de la mariquita en el aire consiste en medir su peso después de sacarlo del molde.

Tabla 3.44. Peso al aire de la briqueta para el porcentaje de 3,42

Identificación	Peso briqueta en el aire (gr)
3,42	1157,2

Fuente: Elaboración propia.

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

El peso de la riqueza saturado superficialmente seca consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 5 minutos a 25°C.

Tabla 3.45. Peso briqueta saturadas superficialmente seca

Identificación	Peso briqueta saturado superficialmente seco S.S.S. (gr)
3,42	1163,4

Fuente: Elaboración propia.

3.8.7.5. Peso de briquetas sumergida en el agua

El peso de la piqueta sumergida en agua consiste en determinar su peso cuando la briqueta se encuentra sumergida totalmente en el agua.

Tabla 3.46. Peso briqueta sumergida en agua.

Identificación	Peso briqueta sumergida en agua (gr)
3,42	671

Fuente: Elaboración propia.

3.8.7.6. Volumen de la briqueta

Para este proceso de cálculo se lo realizará para la briqueta identificada como 3,42.

$Vol. de briqueta = Peso briqueta en el aire SSS - Peso de briqueta sumergida.$

$$Vol. de briqueta = 1163,4 - 671$$

Debido que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm³ se considera:

$$Vol. de briqueta = 492,4 \text{ cm}^3$$

3.8.7.7. Densidad real de la briqueta

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

$$Densidad real = \frac{1157,2}{492,4}$$

$$Densidad real = 2,35 \frac{gr}{cm^3}$$

3.8.7.8. Densidad máxima teórica de la briqueta

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

$$\text{Densidad máx. } T = \frac{100}{\frac{3,42}{1,009} + \frac{100 - 3,42}{2,70}}$$

$$\text{Densidad máx. } T = 2,57 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

3.8.7.9. Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$Vv = \frac{\text{Densidad máx. } T - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad máx. } T} * 100\%$$

$$Vv = \frac{2,57 - 2,35}{2,57} * 100\%$$

$$Vv = 8,49\%$$

3.8.7.10. Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM)

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

$$VAM = \frac{3,42 * 2,35}{1,001} + 8,49$$

$$VAM = 16,52\%$$

3.8.7.11. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)

$$RBV = \frac{VAM - Vv}{VAM} * 100\%$$

$$RBV = \frac{16,52 - 8,49}{16,52} * 100\%$$

$$RBV = 48,62\%$$

3.8.8. Estabilidad y fluencia

Estabilidad y la fluencia son propiedades que se obtienen a partir de la prensa Marshall.

Tabla 3.47. Datos del ensayo de estabilidad y fluencia para la briqueta 3,42

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia
3,42	969	13

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a realizar una corrección de calibración de la prensa Marshall mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad real} = \text{Lectura dial} * \text{Factor de unidad}$$

Donde:

Lectura dial = Es la lectura medida en la prensa Marshall.

Tabla 3.48. Estabilidad real

Identificación	Lectura dial	Real
3,42	969	2591,10

Fuente: Elaboración propia.

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

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

Donde:

Factor corrección altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5 mm.

Tabla 3.49. Alturas promedio y factor de corrección por altura

Identificación	Promedio de alturas (cm)	Estabilidad real	Factor de corrección por altura	Estabilidad corregida (lb)
3,42	6,30	2591,10	1,013	2624,79

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.50. Resultados de la estabilidad y fluencia para la briqueta 3,42

Identificación	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia
3,42	2624,79	13

Fuente: Elaboración propia.

3.8.9. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica 85/100

A continuación, se muestra la planilla de resultados para el contenido óptimo de cemento asfáltico por el método Marshall para el cemento asfáltico 85/100:

Tabla 3.51. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85/100

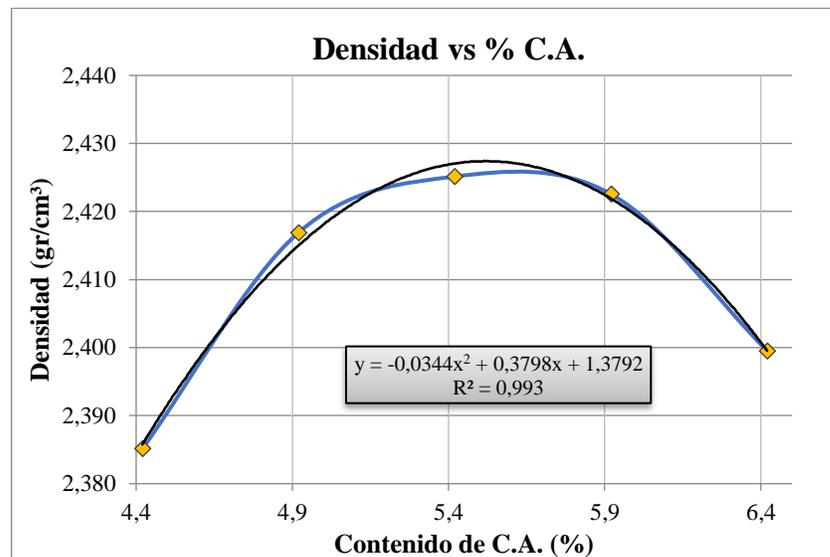
N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Densidad briqueta		% de vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	base mezcla	Base agregados		Densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
1			6,30	2,35						
2	3,42	3,54	6,30	2,35	2,35	8,49	16,52	48,62	2579,14	13,33
3			6,29	2,35						
4			6,19	2,39						
5	4,42	4,62	6,22	2,38	2,39	5,53	16,06	65,56	3284,58	14,00
6			6,20	2,39						
7			6,23	2,40						
8	4,92	5,17	6,21	2,42	2,42	3,43	15,31	77,57	3536,50	15,33
9			6,23	2,43						
10			6,17	2,41						
11	5,42	5,73	6,13	2,45	2,43	2,25	15,38	85,36	3356,13	17,00
12			6,14	2,41						
13			5,99	2,42						
14	5,92	6,29	6,06	2,42	2,42	1,50	15,82	90,55	2769,14	20,00
15			6,05	2,42						
16			6,18	2,38						
17	6,42	6,86	6,31	2,41	2,40	1,57	16,96	90,74	1931,97	23,67
18			6,28	2,40						
Especificaciones			mínimo			3	13	75	1800	8
			máximo			5	-	82	-	16

Fuente: Elaboración propia.

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

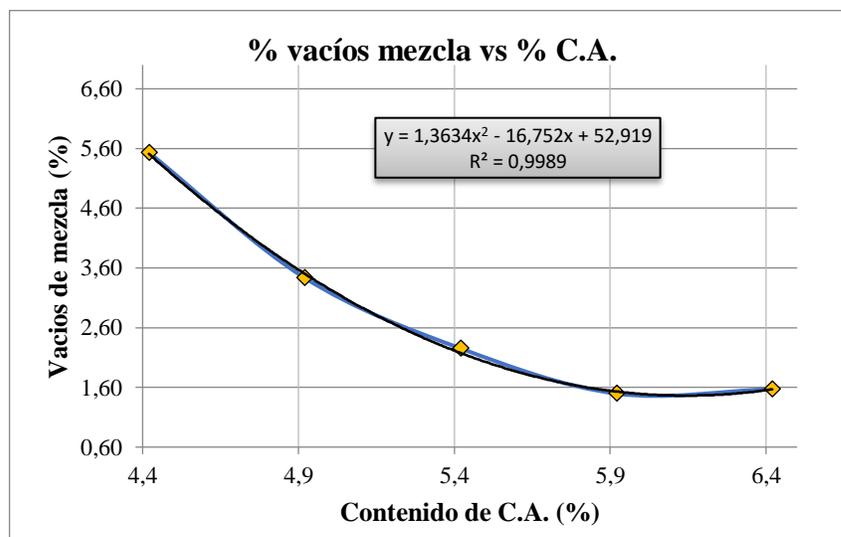
- Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total
- Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos llenos de asfaltos (RBV)
- Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida
- Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)

Gráfica 3.2. Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta



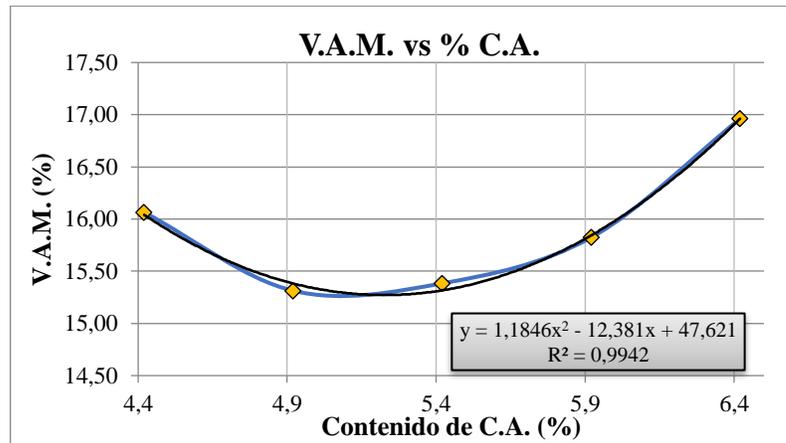
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.3. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire de la mezcla



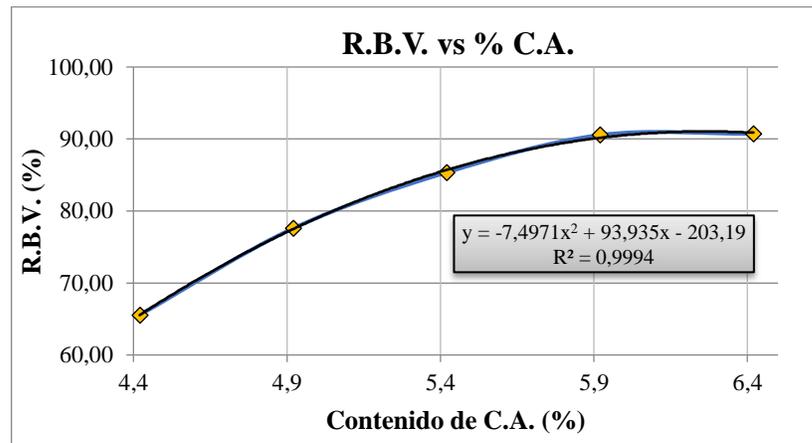
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.4. Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)



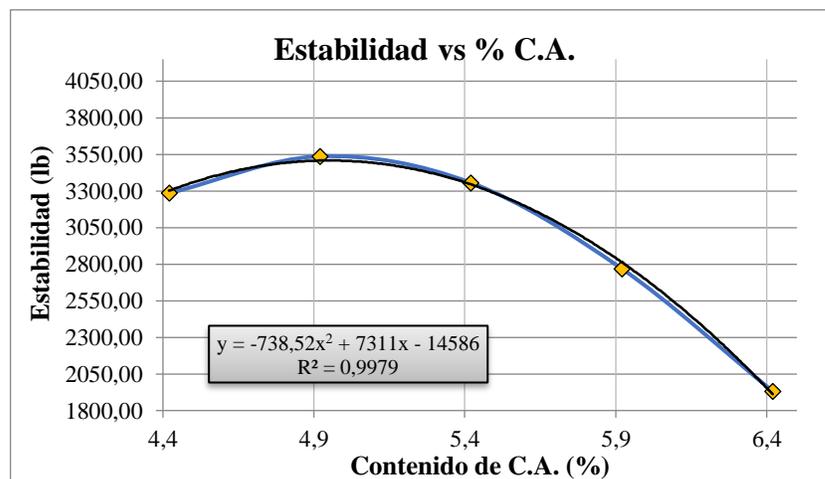
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos lleno de asfalto (RBV)



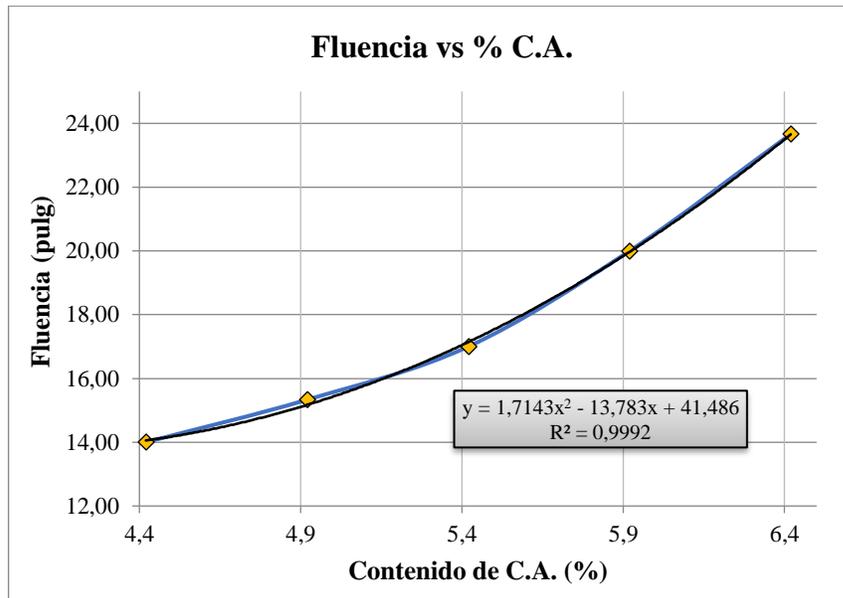
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6. Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.7. Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración propia.

3.8.10. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico 85/100

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 3.52. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85/100

Valores				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Estabilidad Marshall (lb)	4,95	3507,86	>1800 lb (75 golpes)	
Densidad	5,52	2,43	-	-
% Vacíos	4,76	4,00	3	5
Promedio (%)	5,08	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas (densidad, estabilidad y Vv)		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53. Resultados del diseño óptimo de la mezcla convencional 85/100

Valores			
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas
Estabilidad Marshall (lb)	5,08	3495,34	>1800 lb (75 golpes)
Densidad		2,42	- -
% vacíos		3,00	3 5
% óptimo de asfalto			5,08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.54. Porcentaje en la mezcla total

Porcentaje en la mezcla total		
Mezcla asfáltica total	Grava 3/4"	24,679
	Gravilla 3/8"	28,476
	Arena	37,968
	Filler	3,797
	% asfalto óptimo	5,08
	Total	100

Fuente: Elaboración propia.

3.8.11. Resultados del ensayo Marshall para el C.A. modificado 50/75

A continuación, se muestra la planilla de resultados para el contenido óptimo de cemento asfáltico por el método Marshall para el cemento asfáltico modificado 50/75:

Tabla 3.55. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica modificado 50/75

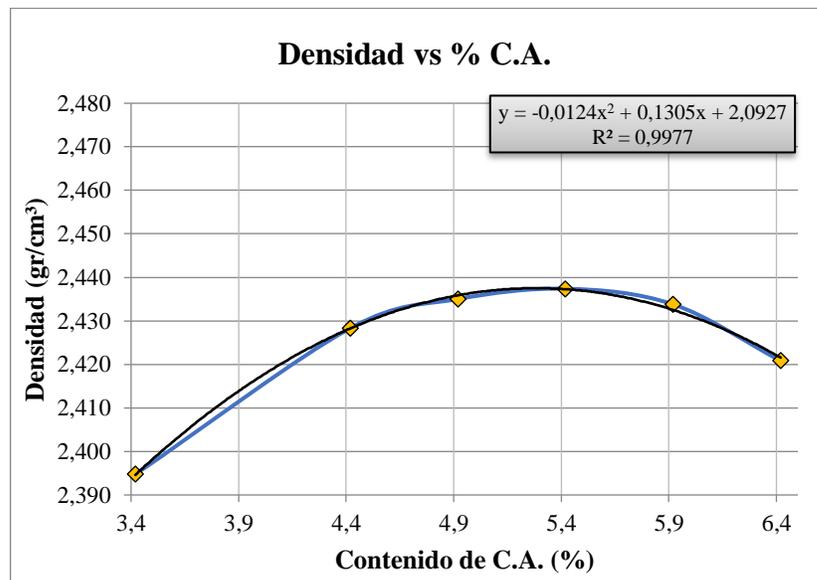
N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Densidad briqueta		% de vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	Base mezcla	Base agregados		Densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
	%	%		grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	libras	0,01 pulg
1			6,50	2,40						
2	3,42	3,54	6,52	2,39	2,39	6,82	14,98	54,47	3406,19	8,67
3			6,47	2,39						
4			6,12	2,44						
5	4,42	4,62	6,16	2,43	2,43	3,86	14,55	73,50	4444,17	12,00
6			6,07	2,41						
7			6,18	2,43						
8	4,92	5,17	6,23	2,44	2,44	2,75	14,68	81,28	4413,59	14,67
9			6,16	2,44						
10			6,11	2,45						
11	5,42	5,73	6,07	2,44	2,44	1,80	14,96	87,96	4144,31	17,00
12			6,02	2,43						
13			6,05	2,44						
14	5,92	6,29	6,03	2,43	2,43	1,09	15,44	92,97	3703,14	19,33
15			6,00	2,43						
16			6,03	2,42						
17	6,42	6,86	6,05	2,42	2,42	0,75	16,23	95,39	2810,80	21,67
18			6,01	2,42						
Especificaciones			mínimo			3	13	75	1800	8
			máximo			5	-	82	-	16

Fuente: Elaboración propia.

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

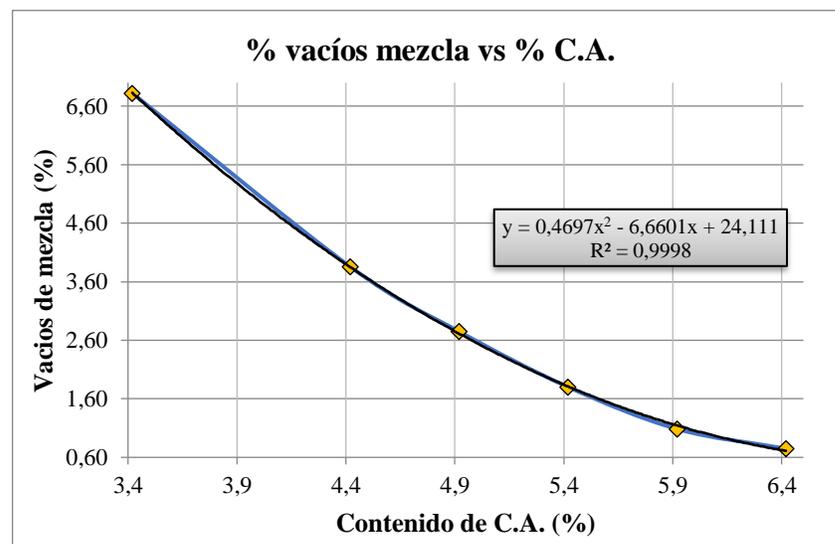
- Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total
- Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos llenos de asfaltos (RBV)
- Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida
- Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)

Gráfica 3.8. Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta



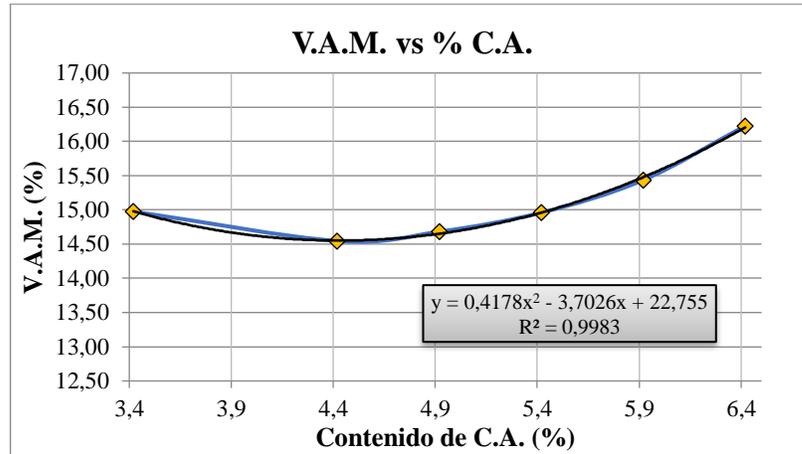
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.9. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire de la mezcla



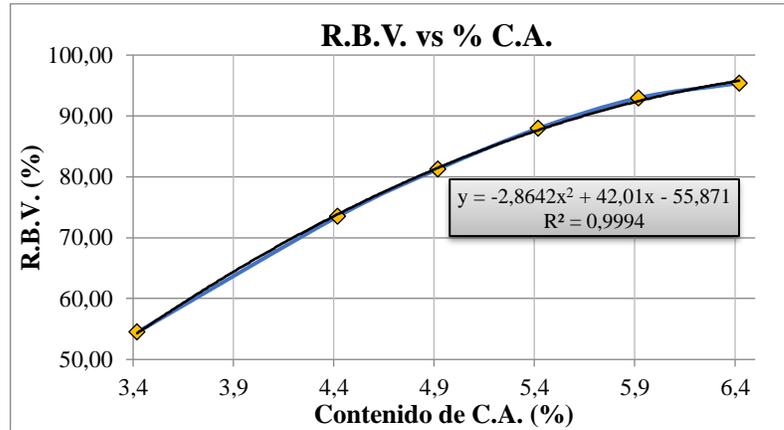
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.10. Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)



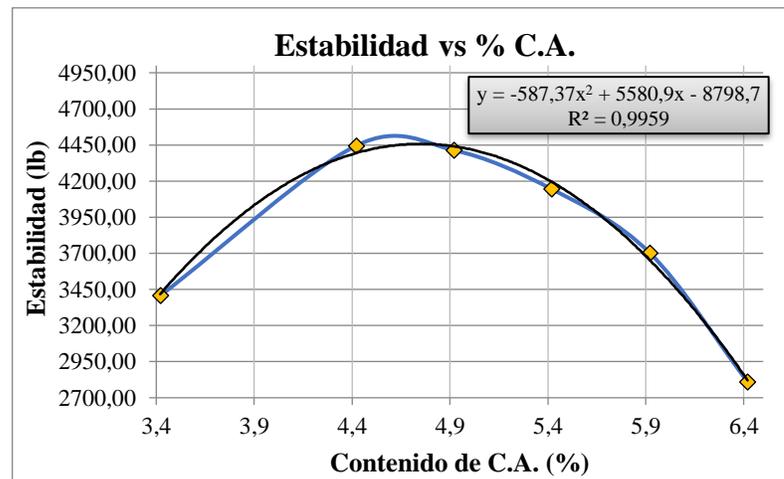
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.11. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacío lleno de asfalto (RBV)



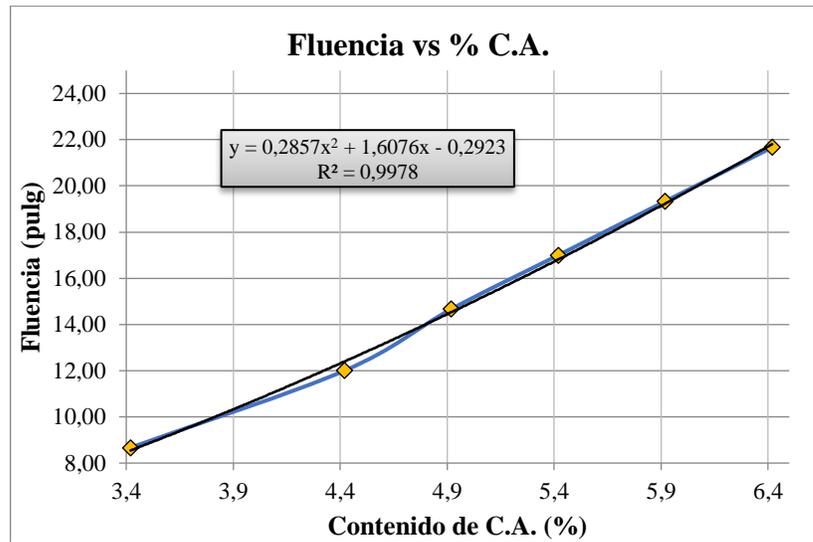
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.12. Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.13. Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración propia.

3.8.12. Determinación del porcentaje óptimo de C.A. modificado 50/75

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 3.56. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica modificada 50/75

Valores				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Estabilidad Marshall (lb)	4,75	4458,04	>1800 lb (75 golpes)	
Densidad	5,26	2,44	-	-
% vacíos	4,33	4,00	3	5
Promedio (%)	4,78	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas (densidad, estabilidad y Vv)		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.57. Resultados del diseño óptimo de la mezcla convencional 50/75

Valores			
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas
Estabilidad Marshall (lb)	4,78	4457,54	>1800 lb (75 golpes)
Densidad		2,43	- -
% vacíos		3,01	3 5
% óptimo de asfalto			4,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.58. Porcentaje en la mezcla total

Porcentaje en la mezcla total		
Mezcla asfáltica total	Grava 3/4"	24,757
	Gravilla 3/8"	28,566
	Arena	38,088
	Filler	3,809
	% asfalto óptimo	4,78
	Total	100

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
PROCESAMIENTO Y
VALIDACIÓN DE
RESULTADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo para el asfalto 85/100

Después de calcular el porcentaje óptimo del cemento asfáltico que es igual a 5,08% para el cemento asfáltico 85/100 del total de las briquetas de 1200 gr, se procede a pesar las muestras para su respectiva compactación, en la siguiente tabla se muestran los pesos para la realización de briquetas convencionales manteniendo la combinación de agregados de 26% de grava de 3/4", 30% de gravilla de 3/8", 4% de filler y 40% de arena.

Tabla 4.1. Dosificación con el contenido óptimo de asfalto 85/100

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	5,08%
Porcentaje de agregado (%)	94,92%
Peso del cemento asfáltico (gr) *	60,96
Peso de grava (gr) *	296,15
Peso de gravilla (gr) *	341,71
Peso de arena (gr) *	455,62
Peso de filler (gr) *	45,56
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo para el asfalto 50/75

Después de calcular el porcentaje óptimo del cemento asfáltico modificado, que es igual a 4,78% para el asfalto 50/75 del total de las briquetas de 1200 gr, se procede a pesar las muestras para su respectiva compactación, en la siguiente tabla se muestran los pesos para la realización de briquetas manteniendo la combinación de agregados de 26% de grava de 3/4", 30% de gravilla de 3/8", 4% de filler y 40% de arena.

Tabla 4.2. Dosificación con el contenido óptimo de asfalto 50/75

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	4,78%
Porcentaje de agregado (%)	95,22%
Peso del cemento asfáltico (gr) *	57,36
Peso de grava (gr) *	297,09
Peso de gravilla (gr) *	342,79
Peso de arena (gr) *	457,06
Peso de filler (gr) *	45,71
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Ensayo Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto 85/100

Para realizar el ensayo de estabilidad Marshall para determinar los efectos de la humedad en las mezclas asfálticas, se realizaron las siguientes briquetas: las briquetas BP1, BP2 y BP3 son los datos obtenidos con los valores de la estabilidad para la briketa patrón, las briquetas S1.1,S1.2 y S1.3 fueron los datos obtenidos con los valores de estabilidad a las 24 horas, las briquetas S2.1, S2.2 y S2.3 con los valores de estabilidad a las 36 horas y las briquetas S3.1, S3.2 y S3.3 con los valores de estabilidad a las 48 horas, estos tiempos fueron sumergidos a baño maría, a una temperatura de 60°C.

A continuación, se mostrará los datos obtenidos del ensayo Marshall:

Tabla 4.3. Datos obtenidos del ensayo Marshall con asfalto 85/100

% de asfalto	Identificación	Altura promedio de briketa (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso sat. sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura del dial estabilidad	Lectura dial fluencia
5,08	BP1	6,05	1171,1	1174	689	1302	15
	BP2	6,21	1180,3	1183,8	695	1231	14
	BP3	6,18	1164,7	1167,7	686	956	14
5,08	S1.1	7,18	1183,8	1187,2	689	1128	13
	S1.2	5,98	1141,3	1145,7	677	1090	12
	S1.3	6,45	1163,5	1166,7	685	868	14
5,08	S2.1	6,13	1173,6	1177,4	689	823	12
	S2.2	6,09	1153,4	1156,4	678	783	11
	S2.3	6,27	1181,9	1184,8	691	1127	12
5,08	S3.1	6,16	1164,8	1168,3	688	731	10
	S3.2	6,24	1187,2	1190,5	697	943	9
	S3.3	6,21	1177,7	1180,8	692	892	11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4. Resultados con tiempos de saturación utilizando el asfalto 85/100

% de asfalto	Identificación	Altura promedio de probeta	Densidad real gr/cm ³	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral) %	R.B.V. (relación betumen vacíos) %	Estabilidad real corregida (libras)	Fluencia promedio 0,01 pulg
5,08	BP1	6,05	2,41				3791,2	
	BP2	6,21	2,41				3418,6	
	BP3	6,18	2,42				2673,7	
	Promedio		2,42	3,21	15,5	79,3	3294,50	14,333
5,08	S1.1	7,18	2,38				2494,8	
	S1.2	5,98	2,44				3234,9	
	S1.3	6,45	2,42				2261,2	
	Promedio		2,41	3,49	15,7	77,8	2663,6	13
5,08	S2.1	6,13	2,40				2334,2	
	S2.2	6,09	2,41				2244,9	
	S2.3	6,27	2,39				3079,9	
	Promedio		2,40	3,74	15,9	76,5	2553,02	11,667
5,08	S3.1	6,16	2,43				2053,6	
	S3.2	6,24	2,41				2594,2	
	S3.3	6,21	2,41				2472	
	Promedio		2,41	3,30	15,6	78,8	2373,2	10

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la resistencia remanente de 24 horas es:

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{2663,6}{3294,5} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \mathbf{80,85\%}$$

Por lo tanto, la resistencia remanente de 36 horas es:

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{2553,0}{3294,5} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \mathbf{77,49\%}$$

Por lo tanto, la resistencia remanente de 48 horas es:

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{2373,2}{3294,5} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = 72,04\%$$

4.4. Ensayo Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto 50/75

Para realizar el ensayo de estabilidad Marshall para determinar los efectos de la humedad en las mezclas asfálticas, se realizaron las siguientes briquetas: las briquetas BP1, BP2 y BP3 son los datos obtenidos con los valores de la estabilidad para la briketa patrón, las briquetas S1.1, S1.2 y S1.3 fueron los datos obtenidos con los valores de estabilidad a las 24 horas, las briquetas S2.1, S2.2 y S2.3 con los valores de estabilidad a las 36 horas y las briquetas S3.1, S3.2 y S3.3 con los valores de estabilidad a las 48 horas, estos tiempos fueron sumergidos a baño maría, a una temperatura de 60°C.

A continuación, se mostrará los datos obtenidos del ensayo Marshall:

Tabla 4.5. Datos del ensayo Marshall con asfalto 50/75

% de asfalto	Identificación	Altura promedio de briketa (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso sat. sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	lectura del dial estabilidad	Lectura dial fluencia
4,78	BP1	6,11	1174,5	1176	689	1612	17
	BP2	6,16	1185,7	1176,8	691	1521	14
	BP3	6,23	1157,8	1159,7	680	1582	17
4,78	S1.1	6,27	1161,5	1163	689	1392	15
	S1.2	6,32	1177,9	1179,5	693	1473	14
	S1.3	6,18	1183,1	1185	691	1421	14
4,78	S2.1	6,11	1174,5	1176	693	1328	11
	S2.2	6,15	1180,1	1181,5	695	1294	11
	S2.3	6,22	1168,8	1170,7	682	1341	13
4,78	S3.1	6,21	1164,9	1166,4	689	1213	10
	S3.2	6,27	1175,7	1176,8	695	1292	11
	S3.3	6,18	1177,3	1179,2	691	1252	10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6. Resultados con tiempos de saturación utilizando el asfalto 50/75

% de asfalto	Identificación	Altura promedio de briqueta (cm)	Densidad real gr/cm ³	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral) %	R.B.V. (relación betumen vacíos) %	Estabilidad real corregida (libras)	Fluencia promedio 0,01 pulg
4,78	BP1	6,11	2,41				4616,51	
	BP2	6,16	2,44				4293,64	
	BP3	6,23	2,41				4377,53	
	Promedio		2,42	3,50	15,03	76,70	4429,22	16,00
4,78	S1.1	6,27	2,45				3808,49	
	S1.2	6,32	2,42				3979,86	
	S1.3	6,18	2,39				3983,43	
	Promedio		2,42	3,32	15,03	76,73	3923,93	14,33
4,78	S2.1	6,11	2,43				3799,75	
	S2.2	6,15	2,43				3660,37	
	S2.3	6,22	2,39				3718,57	
	Promedio		2,42	3,41	15,23	75,52	3726,23	11,67
4,78	S3.1	6,21	2,44				3368,33	
	S3.2	6,27	2,44				3533,55	
	S3.3	6,18	2,41				3507,41	
	Promedio		2,43	3,16	14,73	78,55	3469,76	10,33

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la resistencia remanente de 24 horas es:

$$Resistencia\ remanente = \frac{Estabilidad\ promedio\ remanente}{Estabilidad\ promedio\ normal} * 100\%$$

$$Resistencia\ remanente = \frac{3923,93}{4429,22} * 100\%$$

$$Resistencia\ remanente = 88,59\%$$

Por lo tanto, la resistencia remanente de 36 horas es:

$$Resistencia\ remanente = \frac{Estabilidad\ promedio\ remanente}{Estabilidad\ promedio\ normal} * 100\%$$

$$Resistencia\ remanente = \frac{3726,23}{4429,22} * 100\%$$

$$Resistencia\ remanente = 84,13\%$$

Por lo tanto, la resistencia remanente de 48 horas es:

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = \frac{3469,76}{4429,22} * 100\%$$

$$\text{Resistencia remanente} = 78,34\%$$

4.5. Ensayo de tracción indirecta para el porcentaje óptimo de asfalto 85/100

Procedimiento:

Se realiza la fabricación de las briquetas con el contenido óptimo calculado para el asfalto 85/100, que es de 5,08% para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la biqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron en total 12 briquetas para el ensayo.

Una vez fabricadas las briquetas, se dividió en 4 grupos, para realizar un análisis más detallado del comportamiento de las muestras.

Para el cálculo del ensayo es necesario determinar el diámetro con una aproximación de $\pm 0,1$ mm de la probeta, en 6 planos, se registra el diámetro promedio de las mediciones. La altura de la probeta se mide también con precisión de $\pm 0,1$ mm en cuatro planos definidos por los extremos de todos planos diametrales perpendiculares, se registra la altura promedio de las cuatro mediciones.

Para el ensayo se estableció el grupo de briquetas secas y el grupo de briquetas húmedas, cuyo acondicionamiento y realización del ensayo, se describe a continuación:

Grupo 1 de briquetas: las 3 briquetas de este grupo pertenecen al grupo de biqueta secas y se mantienen al aire en un recinto o estufa a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas, finalizado este periodo se introducen un baño de aguas regulado a $25^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2 horas, determinando a continuación su resistencia a tracción indirecta por compresión diametral.

Grupo 2 de briquetas: las 3 briquetas de este grupo pertenecen al grupo de briquetas húmedas y son sometidas a un proceso de congelación y descongelación, llevándolas a congelar a una temperatura de $- 5^\circ\text{C}$, durante al menos 16 horas, cumpliendo este paso se colocó a las briquetas en un baño de agua a 60°C durante 24 horas, inmediatamente

después se las coloca en un baño de agua a 25°C durante 2 horas para luego ser ensayadas a tracción indirecta.

Grupo 3 de briquetas: las 3 briquetas de este grupo también son del grupo de briquetas húmedas y se les realiza el proceso de congelamiento a una temperatura de -5°C, durante al menos 16 horas, cumpliendo este paso se colocó a las briquetas en un baño de agua a 60°C durante 36 horas finalizando este periodo se introducen en un baño de agua regulada $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2 horas, una vez terminado el acondicionamiento se procede a determinar su resistencia a tracción directa.

Grupo 4 de briquetas: las 3 briquetas de este grupo también son del grupo de briquetas húmedas y son sometidas a un proceso de congelación a una temperatura de -5°C, durante al menos 16 horas, posteriormente se colocó a las briquetas en un baño de agua a 60°C durante 48 horas, finalizando este periodo se introducen en un baño de agua regulada a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2 horas, una vez terminado este paso se procede a determinar su resistencia a tracción directa.

Figura 4.1. Acondicionamiento de briquetas para el ensayo de tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia.

La prensa utilizada en el ensayo de estabilidad y fluencia Marshall es adecuada para efectuar el ensayo de tracción por compresión diametral.

Se aplica la carga la probeta manteniendo una velocidad de deformación de 50,8 mm por minuto constante, hasta que rompa la probeta.

Luego se registran o anotan los valores de la carga de rotura.

Figura 4.2. Equipo para realizar el ensayo y ruptura de briquetas



Fuente: Elaboración propia.

La resistencia a compresión diametral, tracción indirecta de una probeta, se calcula con la siguiente fórmula aproximando a la primera cifra decimal donde:

$$R = \frac{2 * P}{\pi * D * H}$$

Donde:

R = Resistencia a compresión diametral en kg/cm²

P = Carga máxima en Kg.

D = Diámetro de la probeta en cm

H = Altura de la probeta en cm

π = Constantes 3,14159...

Tabla 4.7. Datos del ensayo tracción indirecta utilizando asfalto 85/100

% de asfalto	Ident.	Prob. N°	Altura	Diam.	Carga
			cm	cm	kg
5,08	T1	1	6,16	10,19	1047,05
	T2	2	6,24	10,16	865,06
	T3	3	6,40	10,15	818,65
5,08	T1.1	4	6,31	10,12	860,17
	T1.2	5	6,21	10,12	684,29
	T1.3	6	6,19	10,09	719,71
5,08	T2.1	7	6,27	10,12	626,88
	T2.2	8	6,23	10,12	477,87
	T2.3	9	6,29	10,13	584,13
5,08	T3.1	10	6,26	10,14	430,23
	T3.2	11	6,15	10,11	336,18
	T3.3	12	5,98	10,13	529,17

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo:

$$R = \frac{2 * P}{\pi * D * H}$$

$$R = \frac{2 * 1047,05}{\pi * 10,19 * 6,16}$$

$$R = 10,62 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 4.8. Desarrollo del ensayo tracción indirecta

% de asfalto	Ident.	Prob. N°	Altura	Diam.	Carga	Tracción indirecta	Promedio
			cm	cm	kg	kg/cm ²	
5,08	T1	1	6,16	10,19	1047,05	10,62	9,11
	T2	2	6,24	10,16	865,06	8,69	
	T3	3	6,40	10,15	818,65	8,02	
5,08	T1.1	4	6,31	10,12	860,17	8,57	7,61
	T1.2	5	6,21	10,12	684,29	6,93	
	T1.3	6	6,19	10,09	719,71	7,33	
5,08	T2.1	7	6,27	10,12	626,88	6,29	5,65
	T2.2	8	6,23	10,12	477,87	4,82	
	T2.3	9	6,29	10,13	584,13	5,84	
5,08	T3.1	10	6,26	10,14	430,23	4,31	4,44
	T3.2	11	6,15	10,11	336,18	3,44	
	T3.3	12	5,98	10,13	529,17	5,56	

Fuente: Elaboración propia.

4.5.1. Cálculo del índice de resistencia conservada

Con los valores promedio de la resistencia a tracción indirecta de cada grupo de probetas, se calcula la razón de resistencia a la tracción indirecta, índice de resistencia conservada (IRC), mediante la siguiente ecuación:

$$IRC = \frac{R2 \text{ (húmedas)}}{R1 \text{ (secas)}} * 100\%$$

$$IRC = \frac{7,61}{9,11} * 100\%$$

$$IRC = 83,57\%$$

Tabla 4.9. Resultados del ensayo tracción indirecta para asfalto 85/100

	Alt	Diam	Carga	Tracción indirecta	Prom. de la resistencia seca	Prom. de la resistencia húmeda	Cálculo IRC=Rh/Rs*100	Tipo de ensayo
Iden	cm	cm	kg	kg/cm ²	Rs (kg/cm ²)	Rh (kg/cm ²)	IRC (%)	
T1	6,16	10,19	1047,05	10,62	9,11		-	Sin Acondicionar
T2	6,24	10,16	865,06	8,69				
T3	6,40	10,15	818,65	8,02				
T1.1	6,31	10,12	860,17	8,57		7,61	83,57	Acondicionada
T1.2	6,21	10,12	684,29	6,93				
T1.3	6,19	10,09	719,71	7,33				
T2.1	6,27	10,12	626,88	6,29		5,65	62,01	Acondicionada
T2.2	6,23	10,12	477,87	4,82				
T2.3	6,29	10,13	584,13	5,84				
T3.1	6,26	10,14	430,23	4,31		4,44	48,74	Acondicionada
T3.2	6,15	10,11	336,18	3,44				
T3.3	5,98	10,13	529,17	5,56				

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Ensayo de tracción indirecta para el porcentaje óptimo de asfalto 50/75

Para la elaboración del ensayo se realizó y consideró los mismos parámetros que el punto 4.5., pero aplicado para las briquetas elaboradas con el diseño del porcentaje óptimo de asfalto 50/75.

Para la evaluación del daño por humedad, se elaboró 12 briquetas que fueron separadas en 4 grupos, siendo las briquetas T1, T2 y T3 las briquetas del grupo seco y las briquetas T1.1, T1.2, T1.3, T2.1, T2.2, T2.3, T3.1, T3.2 y T3.3, las briquetas del grupo húmedo, cuyos tiempos de acondicionamiento y realización del ensayo son iguales a los descritos en el punto 4.5.

Tabla 4.10. Datos del ensayo tracción indirecta utilizando asfalto 50/75

% de asfalto	Ident.	Prob. N°	Altura	Diámetro	Carga
			cm	cm	kg
4,78	T1	1	6,17	10,10	1110,57
	T2	2	6,00	10,15	924,91
	T3	3	6,03	10,12	861,40
4,78	T1.1	4	6,14	10,10	874,83
	T1.2	5	6,04	10,12	816,20
	T1.3	6	6,08	10,14	778,34
4,78	T2.1	7	6,09	10,14	678,18
	T2.2	8	5,98	10,13	592,68
	T2.3	9	6,18	10,12	604,89
4,78	T3.1	10	6,06	10,13	580,47
	T3.2	11	5,97	10,16	469,32
	T3.3	12	6,05	10,15	507,18

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1. Cálculo del índice de resistencia conservada

Tabla 4.11. Resultados del ensayo tracción indirecta para asfalto 50/75

	Altura	Diam.	Carga	Tracción indirecta	Prom. De la resistencia seca	Prom. De la resistencia húmeda	Cálculo IRC=Rh/Rs*100	
Ident.	cm	cm	kg	kg/cm ²	Rs (kg/cm ²)	Rh (kg/cm ²)	IRC (%)	Tipo de ensayo
T1	6,17	10,10	1110,57	11,34	10,00			Sin Acondicionar
T2	6,00	10,15	924,91	9,67				
T3	6,03	10,12	861,40	8,99				
T1.1	6,14	10,10	874,83	8,98		8,50	85,04	Acondicionada
T1.2	6,04	10,12	816,20	8,50				
T1.3	6,08	10,14	778,34	8,04				
T2.1	6,09	10,14	678,18	6,99		6,46	64,58	Acondicionada
T2.2	5,98	10,13	592,68	6,23				
T2.3	6,18	10,12	604,89	6,16				
T3.1	6,06	10,13	580,47	6,02		5,40	54,02	Acondicionada
T3.2	5,97	10,16	469,32	4,93				
T3.3	6,05	10,15	507,18	5,26				

Fuente: Elaboración propia.

4.7. Evaluación del ensayo Marshall

4.7.1. Evaluación del ensayo Marshall para el asfalto 85/100

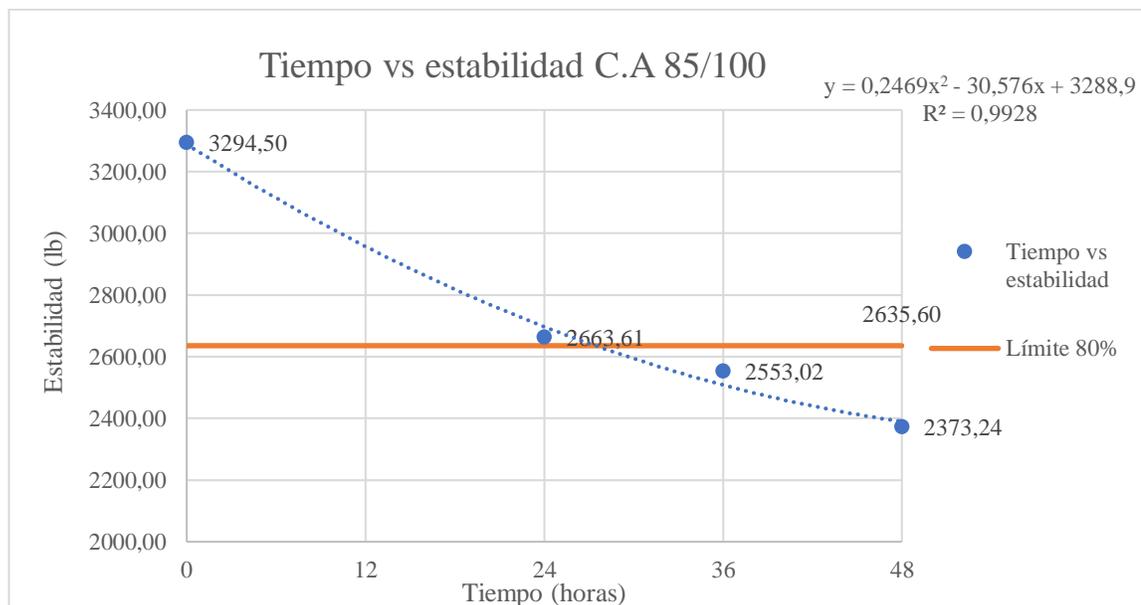
Para la investigación se realizó la evaluación de la estabilidad y fluencia del ensayo Marshall para las briquetas elaboradas con el diseño para el asfalto 85/100, sometidas a acondicionamientos de ciclos de saturación de 0, 24, 36 y 48 horas.

Tabla 4.12. Resultados del ensayo Marshall, cemento asfáltico 85/100

Tiempo (hr)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01")	Resistencia remanente (%)
0	3294,50	14,33	-
24	2663,61	13,00	80,85
36	2553,02	11,67	77,49
48	2373,24	10,00	72,04

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4.1. Tiempo vs estabilidad C.A. 85/100



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 4.1., se puede observar que existe una disminución del valor de la estabilidad a medida que aumenta el tiempo de saturación, como para la primera saturación de 24 horas se puede observar que es el único punto que cumple con el límite al tener una resistencia remanente de 80,85% siendo mayor que 80%, también se puede observar una disminución en la estabilidad en un 19,15%, para el segundo punto con una

saturación de 36 horas se puede ver una disminución en la estabilidad en un 22,51% y para el tercer punto con una saturación de 48 horas se puede ver una disminución en la estabilidad en un 27,96%.

Con respecto a la fluencia, se puede observar que también disminuye su valor a medida que aumenta el tiempo saturado, disminuyendo hasta un 30,22% para el último ciclo de 48 horas.

4.7.2. Evaluación del ensayo Marshall para el asfalto 50/75

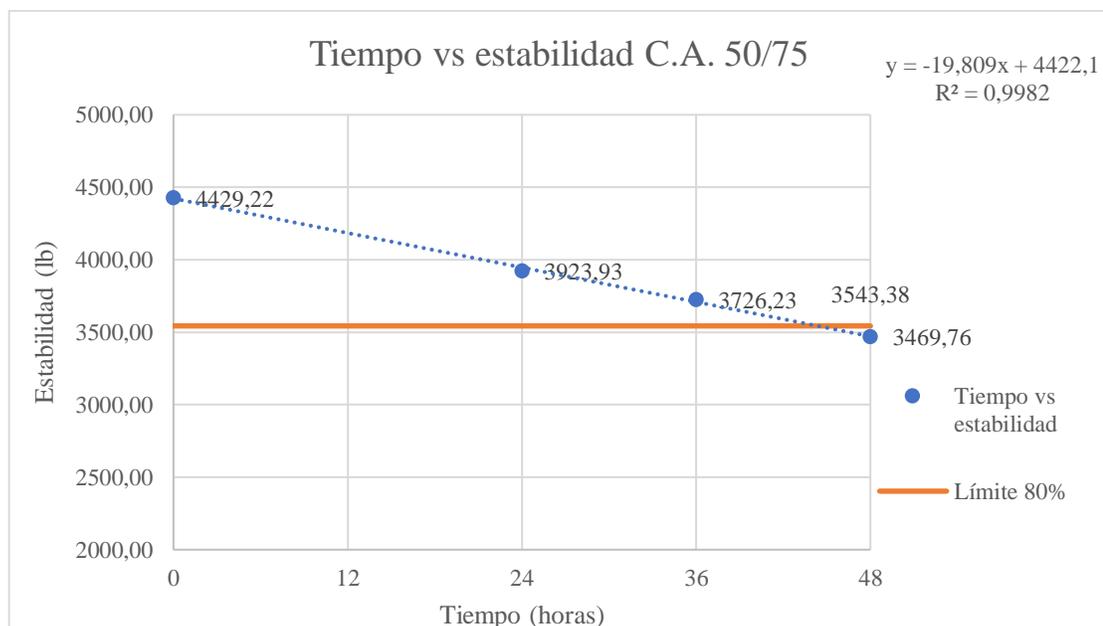
Para la investigación se realizó la evaluación de la estabilidad y fluencia del ensayo Marshall para las briquetas elaboradas con el diseño para el asfalto 50/75, sometidas a acondicionamientos de ciclos de saturación de 0, 24, 36 y 48 horas.

Tabla 4.13. Resultados del ensayo Marshall, cemento asfáltico 50/75

Tiempo (hr)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01")	Resistencia remanente (%)
0	4429,22	16,33	-
24	3923,93	14,33	88,59
36	3726,23	11,67	84,13
48	3469,76	10,33	78,34

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4.2. Tiempo vs estabilidad C.A. 50/75



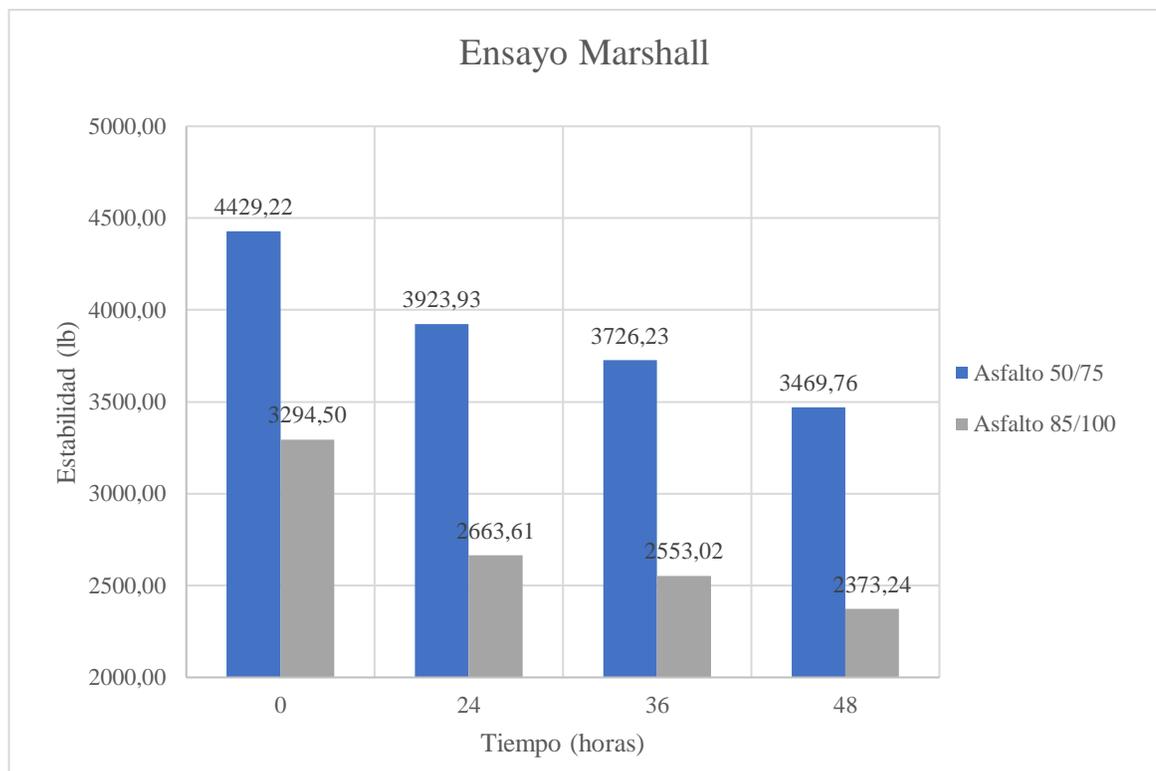
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 4.2., se puede observar que existe una disminución del valor de la estabilidad a medida que aumenta el tiempo de saturación, como para la primera saturación de 24 horas se puede observar que cumple con el límite al tener una resistencia remanente de 88,59% siendo mayor que 80%, el segundo punto también cumple con dicho límite con un 84,13%, para el segundo punto con una saturación de 36 horas se puede ver una disminución en la estabilidad en un 15,87% y para el tercer punto con una saturación de 48 horas se puede ver una ver una disminución en la estabilidad en un 21,66%.

Con respecto a la fluencia, se puede observar que también disminuye su valor a medida que aumenta el tiempo saturado, disminuyendo hasta un 36,74% para el último ciclo de 48 horas.

4.7.3. Análisis comparativo de estabilidad del asfalto convencional y modificado.

Gráfica 4.3. Comparación de la estabilidad



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 4.3., se puede apreciar un mejor comportamiento en la resistencia (estabilidad) en el asfalto 50/75, siendo capaz de resistir cambios de humedades y temperaturas con un daño menor al convencional.

Humedad por 24 horas con una temperatura de 60°C

En ambos tipos de mezclas asfálticas convencional y modificada se pudo verificar que cumplen con las resistencias remanente que sobrepasaron el 80% de la estabilidad patrón, dando un resultado de la mezcla asfáltica convencional con un porcentaje del 80,85% y la mezcla asfáltica modificada con un porcentaje del 88,59%. Teniendo una diferencia porcentual de estabilidad del 32,12% entre el asfalto convencional y el modificado. Verificando que el asfalto modificado 50/75 nos brinda mayor estabilidad que el convencional 85/100 por las características poliméricas que cuenta.

Humedad por 36 horas con una temperatura de 60°C

En este caso se observó que solo la mezcla modificada cumple con la resistencia remanente con un 83,13% y la mezcla convencional es menor al 80% de la estabilidad patrón, obteniendo una diferencia porcentual de estabilidad del 31,49% entre el asfalto convencional y el modificado. Se puede observar que a partir de las 36 horas la mezcla convencional ya no cumple con la resistencia remanente exigida y de esta manera se demuestra que la humedad es un agente muy perjudicial para la estabilidad y la vida útil del asfalto.

Humedad por 48 horas con una temperatura de 60°C

En ambos tipos de mezclas asfálticas convencional y modificada se pudo verificar que éstas no cumplen con las resistencias remanente ya que ambas son menores al 80% de la estabilidad patrón, obteniendo una diferencia porcentual de estabilidad del 31,60% entre el asfalto convencional y el modificado. Se puede observar que a partir de las 48 horas ambos tipos de mezclas ya no cumplen con la resistencia remanente exigida y de esta manera se demuestra que la humedad es un agente muy perjudicial para la estabilidad y la vida útil del asfalto.

4.8. Evaluación del ensayo de tracción indirecta

4.8.1. Evaluación del ensayo de tracción indirecta para el asfalto 85/100

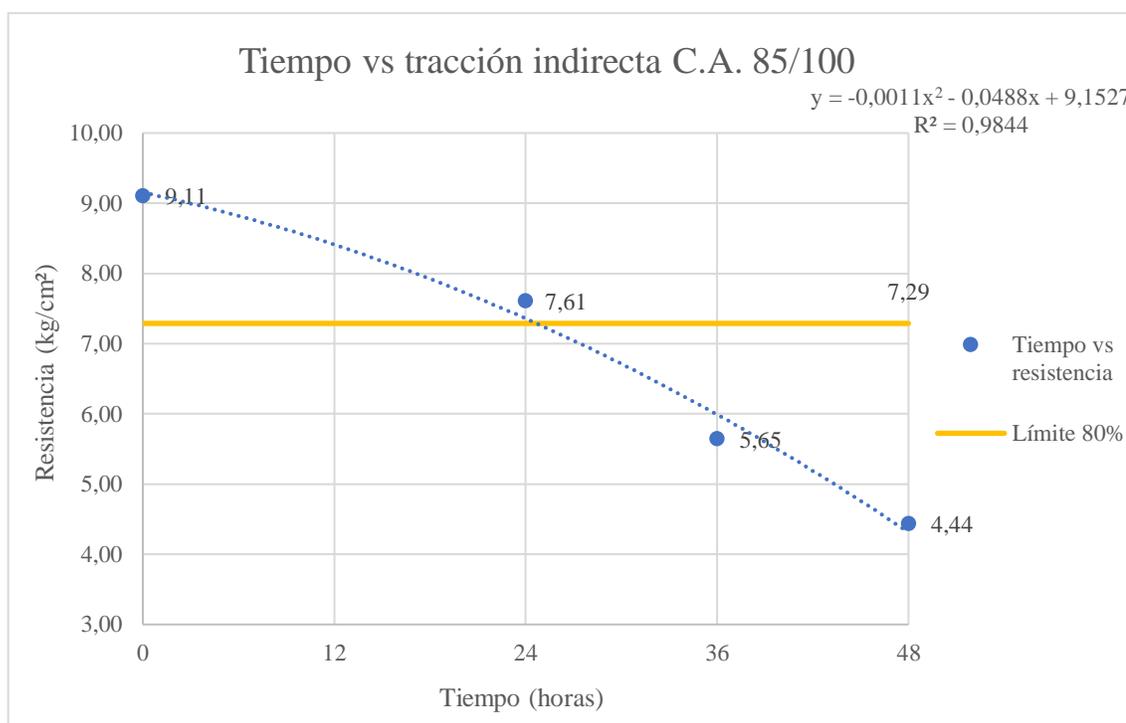
Para la investigación se realizó la evaluación del índice de resistencia conservada (IRC) del ensayo de tracción indirecta, para las briquetas elaboradas con el diseño para el asfalto 85/100, sometidas a acondicionamientos de ciclos de saturación de 0, 24, 36 y 48 horas.

Tabla 4.14. Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 85/100

Tiempo (hr)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Cálculo del índice de resistencia conservada IRC (%)
0	9,11	-
24	7,61	83,57
36	5,65	62,01
48	4,44	48,74

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4.4. Tiempo vs tracción indirecta C.A. 85/100



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 4.4., se puede observar que existe una disminución del valor de la resistencia a medida que aumenta el tiempo de saturación, como para la primera saturación de 24 horas se puede observar que es el único punto que cumple con el límite al tener un IRC de 83,57% siendo mayor que 80%, también se puede observar una disminución en la resistencia en un 16,47%, para el segundo punto con una saturación de 36 horas se puede ver una disminución en la resistencia en un 37,99% y para el tercer punto con una saturación de 48 horas se puede ver una ver una disminución en la resistencia en un 51,26%.

Con estos valores se puede demostrar el daño que ocasiona la humedad en las mezclas asfálticas, siendo el tiempo de saturación el factor determinante para el incremento del daño, siendo directamente proporcional el tiempo de saturación con el daño por humedad, llegando a perder la resistencia hasta en más del 50% en el último ciclo de saturación de 48 horas.

4.8.2. Evaluación del ensayo de tracción indirecta para el asfalto 50/75

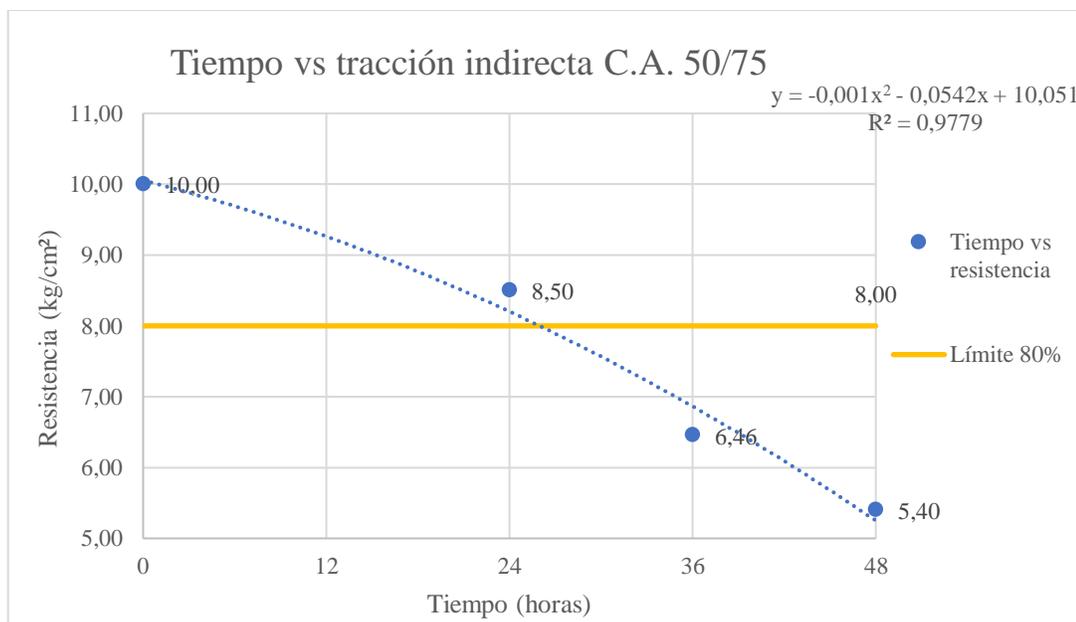
Para la investigación se realizó la evaluación del índice de resistencia conservada (IRC) del ensayo de tracción indirecta, para las briquetas elaboradas con el diseño para el asfalto 50/75, sometidas a acondicionamientos de ciclos de saturación de 0, 24, 36 y 48 horas.

Tabla 4.15. Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 50/75

Tiempo (hr)	Resistencia Promedio (kg/cm ²)	Cálculo del índice de resistencia conservada IRC (%)
0	10,00	-
24	8,50	85,04
36	6,46	64,58
48	5,40	54,02

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4.5. Tiempo vs tracción indirecta C.A. 50/75



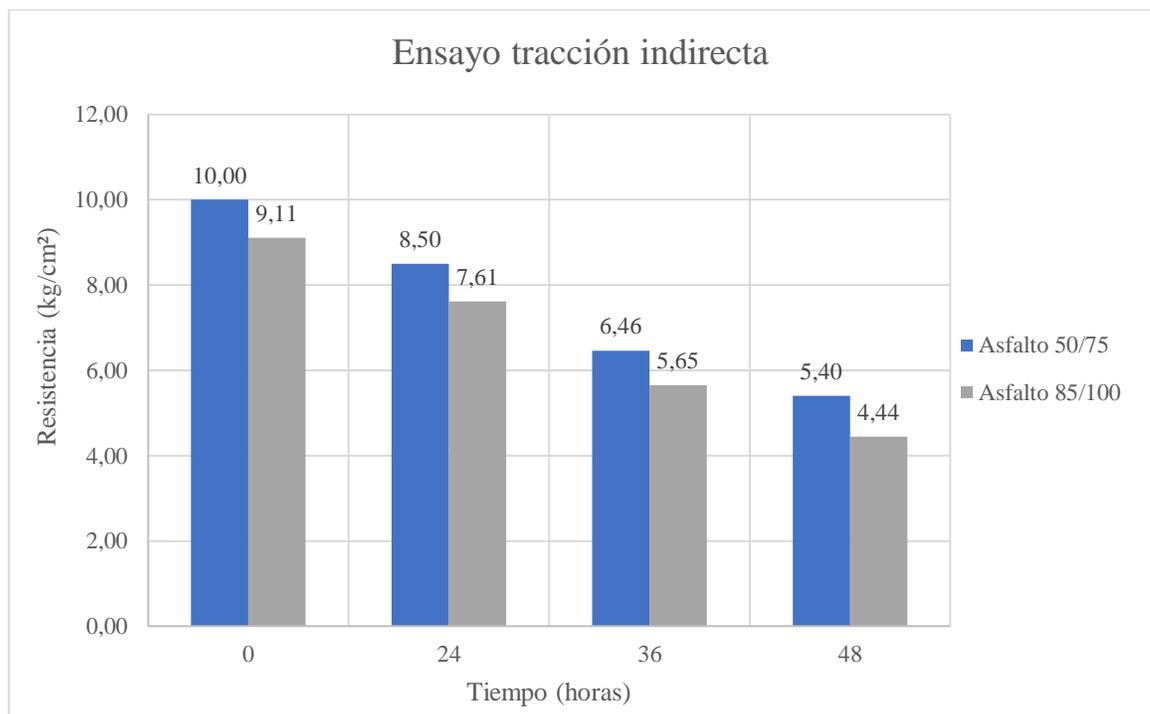
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 4.5., se puede observar que existe una disminución del valor de la resistencia a medida que aumenta el tiempo de saturación, como para la primera saturación de 24 horas se puede observar que es el único punto que cumple con el límite al tener una IRC de 85,04% siendo mayor que 80%, también se puede observar una disminución en la resistencia en un 14,96%, para el segundo punto con una saturación de 36 horas se puede ver una disminución en la resistencia en un 35,42% y para el tercer punto con una saturación de 48 horas se puede ver una ver una disminución en la resistencia en un 45,98%.

Con estos valores se puede demostrar el daño que ocasiona la humedad en las mezclas asfálticas, siendo el tiempo de saturación el factor directamente proporcional y determinante para el incremento del daño.

4.8.3. Análisis comparativo de la resistencia a tracción indirecta.

Gráfica 4.6. Comparación de la resistencia a tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 4.6., se puede apreciar un mejor comportamiento en la resistencia a tracción indirecta en el asfalto modificado 50/75, siendo capaz de resistir cambios de humedades y temperaturas con un daño menor al convencional.

Humedad por 24 horas con una temperatura de 60°C

En ambos tipos de mezclas asfálticas convencional y modificada se pudo verificar que cumplen con los IRC que sobrepasaron el 80% de la resistencia a tracción patrón, dando un resultado de la mezcla asfáltica convencional con un porcentaje del 83,57% y la mezcla asfáltica modificada con un porcentaje del 85,04%. Teniendo una diferencia porcentual de resistencia de 10,47% entre el asfalto convencional y el modificado. Verificando que el asfalto modificado 50/75 nos brinda mayor IRC que el convencional 85/100 por las características poliméricas que cuenta.

Humedad por 36 horas con una temperatura de 60°C

En ambos tipos de mezclas asfálticas convencional y modificada se pudo verificar que éstas no cumplen con los IRC ya que ambas son menores al 80% de la resistencia patrón, obteniendo una diferencia porcentual de resistencia de 12,54% entre el asfalto convencional y el modificado. Se puede observar que a partir de las 36 horas ambos tipos de mezclas ya no cumplen con el IRC exigido y de esta manera se demuestra que la humedad es un agente muy perjudicial para la resistencia y la vida útil del asfalto.

Humedad por 48 horas con una temperatura de 60°C

En ambos tipos de mezclas asfálticas convencional y modificada se pudo verificar que éstas no cumplen con los IRC ya que ambas son menores al 80% de la resistencia patrón, obteniendo una diferencia porcentual de resistencia del 17,78% entre el asfalto convencional y el modificado. Se puede observar que a partir de las 48 horas ambos tipos de mezclas ya no cumplen con el IRC exigido y de esta manera se demuestra que la humedad es un agente muy perjudicial para la resistencia y la vida útil del asfalto.

4.8.4. Análisis de adherencia

El pavimento de una carretera debe cumplir con ciertos requisitos para garantizar al usuario seguridad como principal y más relevante condición de servicio, es por eso que la selección de los agregados y el cemento asfáltico juegan un papel importante a la hora de realizar el diseño de la mezcla. Para adentrarnos en el tema se requiere exaltar la función de estos dos componentes, vitales a la hora de interactuar en la función de servicio y durabilidad.

La adherencia es una de las propiedades más importantes de una mezcla asfáltica, siendo así que debe cumplir a ser mayor al valor de 80% para que tenga una buena adherencia agregado y cemento asfáltico, así también tendrá una buena resistencia para hacerle frente a los daños climáticos, al efecto del agua que ocasiona fallas dentro de las carreteras.

El diseño Marshall especifica un rango de 3 a 5% de vacíos que deben cumplir las mezclas asfálticas, esto significa que cuando los porcentajes de vacíos sobrepasan del rango establecido la mezcla asfáltica es de mala calidad, siendo así el 4% un valor óptimo de vacíos para una mezcla.

El ensayo de tracción indirecta es poco usual en nuestro medio, son más usuales los métodos empíricos de visualización del comportamiento agregado – cemento asfáltico, siendo muy útil y preciso para controlar la adherencia, debido a que se puede controlar de forma visual y por medio del valor del índice de resistencia conservada (IRC), que debe ser mayor al 80% para que presente una buena adherencia.

La principal ventaja de este ensayo es la sencillez en cuanto a su metodología. Es muy valorado por las instituciones que necesitan caracterizar de forma rápida, confiable y económica los pavimentos que gestionan. Es un método que cuenta con varias ventajas: Es un ensayo relativamente sencillo, presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall y el tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos. La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción. Una de las desventajas que se puede evidenciar dentro del estudio de adherencia mediante el método de tracción indirecta, es el procesamiento que se realiza a las briquetas del grupo húmedo el mantenerlos en las temperaturas y tiempos indicados, realizar el proceso de congelamiento y descongelamiento, el poder contar con los equipos necesarios dentro del laboratorio.

Tabla 4.16. Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 85/100

Tiempo (hr)	Resistencia promedio (kg/cm²)	Cálculo del índice de resistencia conservada IRC (%)
0	9,11	-
24	7,61	83,57
36	5,65	62,01
48	4,44	48,74

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Rotura de briquetas del ensayo de tracción indirecta asfalto 85/100



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17. Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 50/75

Tiempo (hr)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Cálculo del índice de resistencia conservada IRC (%)
0	10,00	-
24	8,50	85,04
36	6,46	64,58
48	5,40	54,02

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4. Rotura de briquetas del ensayo de tracción indirecta asfalto 50/75



Fuente: Elaboración propia.

Después de analizar los datos obtenidos del ensayo de tracción indirecta se puede observar que solo el primer ciclo de saturación cumple con el IRC, para ambos tipos de mezclas y la mezcla modificada presenta una mayor resistencia para el primer ciclo, además de obtener resistencias más altas que la mezcla convencional.

Considerando también la resistencia remanente y el IRC para el primer ciclo de saturación a 24 horas, ambas mezclas cumplen con el requisito exigido que es mayor a 80%, además que para la resistencia remanente la mezcla modificada también cumple con el requisito para el segundo ciclo de 36 horas y considerando el valor de la carga que puede resistir antes de su rotura, el asfalto modificado obtiene valores más altos de carga, siendo así una mezcla apta para su uso en la construcción de carreteras.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y análisis realizados se concluye:

1. Se estableció que los agregados son óptimos para su uso en las mezclas asfálticas ya que al realizar la caracterización del agregado pétreo: grava 3/4", gravilla 3/8" y arena, con los ensayos de granulometría, desgaste mediante la máquina de los Ángeles, peso específico del agregado grueso, peso específico del agregado fino, peso unitario, equivalente de arena, porcentaje de caras fracturas y partículas largas y achatadas, este agregado cumple con las especificaciones exigidas por norma para cada uno de los ensayos.
2. Se determinó el diseño de las briquetas mediante el método Marshall, donde se estableció que los porcentajes del agregado pétreo son: 26% de grava, 30% de gravilla, 40% de arena y 4% de filler, con el cual se definió que el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica convencional con el asfalto 85/100 es de 5,08% y el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica modificada con el asfalto 50/75 es de 4,78%.
3. Determinado el diseño de las briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico para ambos tipos de mezclas asfálticas se procedió a la elaboración de las briquetas y se realizó la inmersión en agua a temperatura de 60°C, en tiempos de saturación de 24, 36 y 48 hrs de manera que fue posible observar y determinar el daño que sufren las mezclas asfálticas ante la presencia permanente de la humedad en el tiempo indicado, comprobando que el daño es directamente proporcional al tiempo de saturación de las muestras ya sea en mezclas asfálticas convencionales o modificadas.
4. Se determinó que las mezclas asfálticas convencionales elaboradas con cemento asfáltico 85/100 sufren de un daño más crítico en el daño por humedad, esto debido a que solo cumple con la resistencia remanente las briquetas saturadas por 24 horas, teniendo un valor de 80,85% siendo mayor a 80%, mientras que las

briquetas saturadas durante 36 y 48 horas obtuvieron valores de 77,49% y 72,04% respectivamente, no cumpliendo lo exigido por norma.

5. Las mezclas asfálticas modificadas elaboradas con el cemento asfáltico 50/75 cumple con la resistencia remante para los ciclos de 24 y 36 horas, con valores de 88,59% y 84,13% respectivamente, siendo mayor al 80%, sólo fallando para el ciclo de 48 horas, con 78,34% no cumpliendo con lo exigido por norma, mostrando mayor estabilidad en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.
6. De acuerdo a los ensayos realizados se puede observar que la estabilidad, fluencia y la carga máxima cuando se utiliza el cemento asfáltico 50/75 modificado presenta mejores resultados.
7. Se realizó el ensayo de tracción indirecta comprobando que los agregados en las mezclas asfálticas presentan una buena adherencia con el cemento asfáltico, dado que al ser fallado por tracción indirecta se observa que las gravas se fracturan efectivamente por la carga ejercida sobre la briqueta. Al observar la rotura de la briqueta debido a la tracción indirecta se puede verificar que los agregados están recubiertos por el cemento asfáltico.
8. Realizando la comparación entre ambos tipos de mezclas, las mezclas asfálticas modificadas presentan mayores valores IRC (índice de resistencia conservada), en comparación con las mezclas asfálticas convencionales, pero en ambos casos solo el ciclo de 24 hrs cumple con el IRC mayor a 80%, obteniendo un valor de 83,57 para la mezcla asfáltica convencional y 85,04 para la mezcla asfáltica modificada.
9. Los 3 grupos de ciclos de saturación elaborados de 24, 36 y 48 horas, que pertenecen a las mezclas asfálticas 50/75, que se realizaron los ensayos de tensión indirecta y el Marshall, evaluándolos obtuvieron mayores resultados tanto en estabilidad, fluencia y tracción indirecta que los obtenidos con las mezclas convencionales.
10. Con los resultados obtenidos, se establece que utilizando las mezclas asfálticas fabricadas con el cemento asfáltico 50/75 modificado, sería adecuado el empleo de este material para zonas húmedas, debido a que las zonas húmedas causan gran daño al pavimento y se debe utilizar una mezcla asfáltica modificada con polímero que pueda soportar los fenómenos en climas húmedos.

5.2. Recomendaciones

Después de analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en esta investigación, se obtienen las siguientes recomendaciones:

- Se debe contar con los equipos necesarios en el laboratorio, para el calentamiento, mezclado y compactación de mezclas asfálticas calientes, además de los equipos para determinar los parámetros necesarios a ser medidos, en este caso se puede realizar el ensayo de tracción indirecta con el equipo Marshall, solo cambiando el dial para la rotura.
- Se debe tener en cuenta que para la elaboración de las mezclas asfálticas se deberá controlar la temperatura de compactación para evitar errores que puedan afectar a los resultados de las propiedades evaluadas.
- Para la compactación de las briquetas elaboradas en el ensayo Marshall se deberá tener en cuenta que el número de golpes sea exacto para que el compactado de la briqueta sea efectivo, además se deberá tener en cuenta que el martillo de compactación deberá estar verticalmente para evitar posibles fallas en las mediciones de las alturas de las briquetas.
- Para la elaboración de las muestras del ensayo a tracción indirecta se deberá controlar las temperaturas del baño maría y los tiempos de manera que se cumpla con la norma AASHTO T-283.
- Para las mediciones de las propiedades evaluadas de las mezclas asfálticas obtenidas en el ensayo Marshall y tracción indirecta las mediciones se deberán calibrar los equipos y realizar la lectura de forma perpendicular al medidor para evitar el error de paralaje y evitar datos erróneos.
- Se deberá realizar las mediciones cuidadosamente de los pesos de las muestras para el diseño, tanto para las briquetas necesarias para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico como para las briquetas con el contenido óptimo, necesarias para la saturación de diferentes ciclos para la evaluación de sus propiedades.