

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El buen funcionamiento y la durabilidad de un pavimento asfáltico están muy relacionados con la correcta aplicación y control del riego de liga. Por ello es fundamental que la aplicación del riego de liga sea uniforme, con una cobertura total y con una dosificación adecuada durante el proceso constructivo de capas asfálticas, lo cual permitirá un correcto desempeño del pavimento al funcionar este como un solo sistema en la transmisión de cargas y disipación de esfuerzos a la estructura del pavimento.

El riego de liga se describe como “la aplicación de una película de material asfáltico a la superficie de pavimento existente para asegurar la unión adecuada entre ésta y la nueva capa aplicada. En pavimentos asfálticos entregan la unión necesaria a la interfaz entre dos capas para que actúen como una estructura monolítica ante las cargas de tráfico y las solicitaciones climáticas. La falta de unión en la interfaz entre capas asfálticas puede provocar deterioros que reducen la vida útil del pavimento” (The Asphalt Institute. 1982. “Manual Del Asfalto”).

Para garantizar el óptimo desempeño del material asfáltico colocado en la adherencia de capas, debe existir una adecuada extensión del ligante la misma que deberá cubrir uniformemente la superficie a ligar, lograr una correcta dotación está determinado por varios factores y uno de ellos es el control o medición de la dotación. Es ahí donde surge una problemática, en cuanto a la correcta forma de controlar la cantidad de riego a aplicar, ya que aparte de determinar las dosificaciones óptimas, se debe controlar también que la cantidad que se aplique en obra corresponda a la cantidad establecida en laboratorio de acuerdo al tipo de mezcla asfáltica.

La ingeniería enfrenta el reto constante para generar un panorama más amplio sobre la importancia de un adecuado control de la cantidad de ligante aplicado, en la colocación

de capas asfálticas para generar el desempeño esperado del pavimento. Ante esto la ingeniería ha recurrido a la búsqueda de nuevas alternativas que garanticen el adecuado control, respecto a la dotación del ligante, los cuales contribuyan a mejorar los resultados obtenidos en la aplicación de riegos de liga durante el proceso de colocación de capas asfálticas.

Por lo que en el presente trabajo de investigación se propone realizar la valoración e implementación de un sistema o metodología alternativa de medición de la cantidad de ligante aplicado, el cual se basa en la absorción de ligante con la utilización de geotextil, en ensayos que simularan la construcción de pavimento, la cual se espera que sirva como una herramienta efectiva y de fácil aplicación para un adecuado control de la cantidad de ligante, para lograr la correcta extensión del riego y contribuya con ello al mejoramiento en la adherencia entre capas asfálticas, logrando un adecuado desempeño de la carpeta asfáltica una vez puesto en servicio. También se realizará la determinación del rango óptimo de dotación de riego de adherencia, habitualmente usados en nuestro medio, mediante el ensayo de corte LCB, para que los mismos sean analizados con la metodología propuesta.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La aplicación del riego de liga es un elemento fundamental en el proceso constructivo de sobrecapas de mezcla asfálticas o en carpetas asfálticas nuevas. Un buen proceso constructivo y un adecuado control de la dotación, que garanticen un riego de liga uniforme con cobertura total de área de intervención y la cantidad adecuada, son actividades indispensables para garantizar un correcto desempeño del pavimento asfáltico.

Para lograr una correcta extensión del riego de liga sobre una superficie a ligar, además de conseguir en laboratorio la dosificación idónea de ligante, es necesario un adecuado control y medición de la cantidad de ligante a aplicar, para corroborar que la dotación aplicada en obra corresponda a la cantidad especificada. Para el control de ligante existe un método estándar recomendada en la normativa ASTM, lo cual según algunas

investigaciones realizadas, este método provoca una serie de dudas respecto a su fiabilidad, por los resultados obtenidos en la mismas.

Debido a esta problemática el presente trabajo se centrará en la implementación y valoración de una metodología alternativa para la medición del ligante aplicado, con la cual se espera lograr un correcto control de la dotación del riego de liga. Se aplicará un aparato de medición de ligante, desarrollado en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de Santander, España, cuyo método está basado en la absorción del ligante. Para esto se realizarán ensayos de laboratorio que simularan el proceso constructivo de una carpeta asfáltica, en la cual se analizará la efectividad e idoneidad del sistema alternativo propuesto.

Esta investigación será un aporte al conocimiento sobre una nueva técnica de medición y control de dotación de riego de liga aplicado en la construcción de repavimentaciones asfálticas, el cual se pretende que sea benéfico y ventajoso respecto a la optimización del riego a aplicar para lograr una adecuada adherencia entre capas asfálticas.

De igual forma permitirá implementar parámetros a ser tomados en cuenta para una correcta medición de la dotación de riego, la misma servirá como una herramienta alternativa de medición de ligante aplicado, dentro de las metodologías comunes de control y dotación de riego de liga en obras viales de repavimentación y obras nueva que se realizan en nuestro departamento, donde el paquete estructural proyectado deba asegurar una adecuada adherencia entre capas.

De igual forma servirá para que nuestros compañeros lo utilicen como una referencia para nuevas investigaciones relacionadas a la misma, como también servirá a todas las personas interesadas sobre el tema.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

En la construcción de una carpeta asfáltica se realiza el diseño suponiendo que estas capas estarán unidas en su totalidad, para ello durante su construcción, se procede a

aplicación de un riego de liga, con el fin de asegurar la adherencia entre capas. Sin embargo, la experiencia ha puesto al descubierto que la unión propuesta en el diseño no siempre se consigue, lo cual conlleva a deterioros prematuros en el pavimento.

Por esto que para el buen funcionamiento y desempeño de un pavimento asfáltico, será fundamental la correcta aplicación del riego de liga. Por ello que además de conseguir las dotaciones adecuadas de riego, es necesario controlar que las mismas sean iguales a las aplicadas durante el proceso constructivo de capas asfálticas.

El problema surge a la hora de corroborar que las dotaciones de riego de adherencia calculadas, sean iguales a las aplicadas en obra. Tal afirmación ha dado lugar a la búsqueda de alternativas para garantizar un adecuado control de la dotación de riego.

Debido a esto en esta investigación, se plantea una metodología o sistema alternativo de control de la dotación de riego de liga, utilizando para ello un instrumento de medición del ligante aplicado en obra, el cual está basado en la absorción del ligante mediante el uso de un geotextil, esto con la finalidad de lograr un adecuado control a la dotación de ligante y su correcta aplicación en obra.

1.3.1.2. Problema

¿En qué medida beneficiará el uso del sistema alternativo de medición, a lograr una correcta dotación y medición de la cantidad de riego de liga?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Realizar la valoración de un sistema de control alternativo de la dotación de riego de liga, mediante procedimientos experimentales en laboratorio, para determinar su idoneidad respecto a distintas dotaciones y tipos de ligante, con lo cual se garantice el adecuado control y aplicación del ligante.

1.4.2. Objetivos específicos

- ❖ Realizar la descripción de los conceptos relacionados al riego de liga, su importancia, características, procesos de ejecución, y método de control.

- ❖ Realizar la caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica convencional para la elaboración de las probetas.
- ❖ Elaborar probetas bicapa y probetas prismáticas para el ensayo de control de ligante y la obtención de los rangos óptimos de riego de liga.
- ❖ Realizar el ensayo de corte con el método LCB, sobre probetas bicapa unidas por un riego de liga para determinar los rangos óptimos de ligante que garanticen una óptima adherencia.
- ❖ Realizar el control de la dotación de riego de liga, mediante el ensayo de absorción aplicando el sistema alternativo de medición de la dotación de riego de liga.
- ❖ Realizar el ensayo de absorción de ligante con el uso de dos tipos de geotextil.
- ❖ Realizar el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de control de la dotación del riego de adherencia y la obtención de las tasas adecuadas de ligante.
- ❖ Establecer las conclusiones a partir de los resultados obtenidos en la investigación.

1.5. HIPÓTESIS

El uso del sistema alternativo de control de dotación de ligante, permitirá la correcta medición de la cantidad de ligante aplicado considerando la superficie sobre la que se extiende, de igual forma poder comprobar que la cantidad aplicada en obra corresponda a la cantidad calculada en laboratorio, para lograr una buena adherencia entre capas.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Variable independiente

- ❖ Riego de liga.
- ❖ Tipo de geotextil.

1.6.2. Variable dependiente

- ❖ Cantidad de riego de liga.
- ❖ Valoración del sistema de control de la dotación de ligante aplicado.

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Variable	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor/ acción
<u>Variable independiente</u> Riego de adherencia o riego de liga	Se define como una película delgada de emulsión asfáltica o asfaltos líquidos aplicados en la interfaz de dos capas asfálticas.	Asfalto líquido de curado rápido RC	lt/m ² o gr/m ²	Cantidad calculada
		Asfalto líquido de curado medio MC	lt/m ² o gr/m ²	Cantidad calculada
Tipo geotextil	Esta referido al tipo de geotextil utilizado para medir la cantidad de riego aplicado	-	-	-
<u>Variable dependiente</u> Cantidad de riego de liga	Referido a la cantidad de ligante asfáltico aplicado sobre una superficie asfáltica	Cantidad de ligante por metro cuadrado	lt/m ² o gr/m ²	Valor definido
Sistema de control de la dotación de ligante	Es la medición de la cantidad de riego de adherencia aplicado, con el instrumento propuesto	Ensayo de absorción de ligante	%	Valor calculado

Fuente: Elaboración propia

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidad de estudio

- ❖ Riegos asfálticos

1.7.1.2. Población

- ❖ Riegos de liga

1.7.1.3. Muestra

- ❖ Sistema de control de dotación de riego de liga

1.7.1.4. Muestreo

- ❖ Se realizará la caracterización del cemento asfáltico (85-100) y los agregados gruesos y finos mediante los ensayos correspondientes
- ❖ Se utilizará el asfalto diluido de curado rápido (RC-70) y curado medio (MC-70) como riego de liga.
- ❖ Determinación del rango óptimo de dotaciones mediante la medición de la adherencia entre capas por el ensayo de corte LCB.
- ❖ Se realizará la medición de la dotación de ligante con el sistema propuesto basado en el ensayo de absorción, usando geotextil como material absorbente.

1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.8.1. Selección de métodos y técnicas

El método que se realizará para el análisis del ensayo de control o medición del riego de adherencia aplicado (ensayo de absorción) y para la determinación de las dotaciones adecuadas (ensayo de corte LCB), será el método inductivo ya que este es un método que alcanza las conclusiones partiendo de una hipótesis, lográndose estos mediante la realización y observación de las diferentes pruebas de laboratorio y de los resultados que se obtengan se establecerán las conclusiones de la investigación.

1.8.2. Técnicas de muestreo

La técnica que se utilizará será una técnica de muestreo no probabilístico ya que para este caso la selección de los elementos y muestras no depende de la probabilidad sino del criterio del investigador.

1.8.3. Descripción de los equipos e instrumentos utilizados para la obtención de datos

❖ Para la caracterización de los agregados

Horno eléctrico: Utilizado para el secado del material, deberá contar con una temperatura constante de 100 a 110°C.

Balanza: Es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0,1gr.

Juego de tamices: Deberá estar conformada de acuerdo de a la normativa ASTM y AASHTO.

Equipos específicos para cada ensayo de los agregados: Será utilizado para la realización de cada ensayo especificado.

❖ **Para la caracterización del cemento asfáltico**

Ensayo de penetración: Se utilizará el penetrómetro para asfalto, con el cual se medirá la penetración del cemento asfáltico en estudio.

Ensayo de viscosidad: Se utilizará el viscosímetro saybolt o el viscosímetro para medir la viscosidad cinemática.

Equipo para el ensayo del punto de inflamación: Que sirve para determinar el punto de ignición o punto de llama.

Equipo para medir la ductilidad: Sirve para medir el alargamiento máximo de los betunes asfálticos a una temperatura de 25°C.

Picnómetros: Con los cuales se determinan el peso específico.

Para el ensayo de punto de ablandamiento: Se utilizará un envase con dos anillos y esferas metálicas con los cuales se determina la temperatura del punto de ablandamiento.

❖ **Elaboración de briquetas Marshall y la elaboración de probetas prismáticas**

Moldes de compactación: En estos moldes se vacía las distintas mezclas asfálticas para elaborar tanto las briquetas normalizadas siguiendo el método Marshall, como también se elaborarán las probetas prismáticas en un respectivo molde cuadrado.

Compactadores para moldes: Con estos compactadores se compactará las respectivas muestras colocadas en los moldes.

❖ **Para la determinación de los rangos óptimos de dotación de ligante (ensayo de resistencia a corte LCB)**

Equipo para la medición de la resistencia a corte LCB: Se utilizará para la medición de la adherencia entre capas asfálticas (briquetas bicapa unidas con la aplicación de riego de liga) con la finalidad de determinar los rangos óptimos de

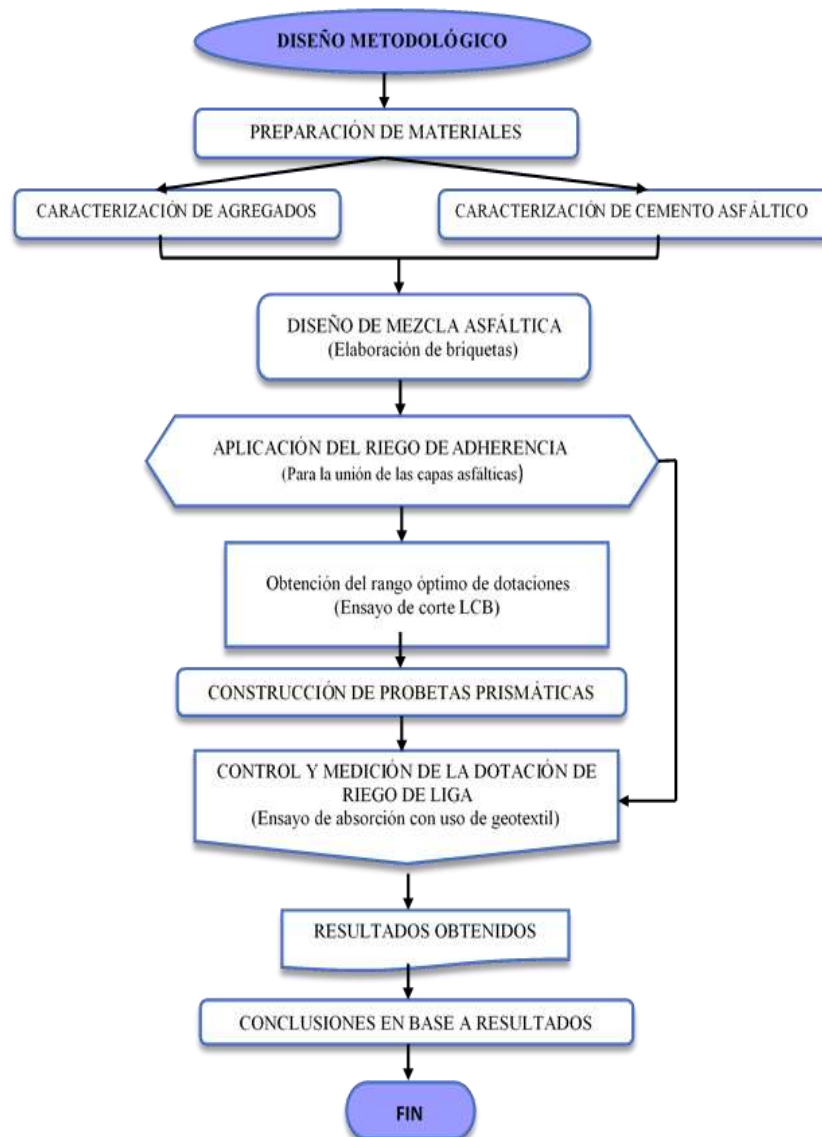
riego de liga, los mismos que serán utilizados para los diferentes ensayos de control de dotación.

❖ **Para el ensayo del control o medición de la dotación de riego de liga**

Instrumento para la medición del riego de liga aplicado: Se usará para medir la cantidad de ligante aplicado.

1.8.4. Procedimiento de aplicación

Figura 1.1. Esquema del procedimiento de aplicación practica



Fuente: Elaboración propia

❖ **Caracterización de los materiales a utilizar**

Para caracterizar los materiales (agregados y el cemento asfáltico) se realizarán los distintos ensayos especificados para la elaboración de una mezcla asfáltica convencional.

❖ **Dosificación y diseño de las briquetas**

Para la dosificación y elaboración de las briquetas se realizara según el método Marshall, primero se realizará las pruebas para obtener el contenido óptimo de asfalto en la mezcla para posteriormente elaborar briquetas bicapas unidas por una aplicación de riego de adherencia o riego de liga en distintas cantidades.

❖ **Determinación de los rangos óptimos de ligante**

Se realiza por el ensayo de corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona) metodología propuesta por la Universidad de Cataluña, España. Con el cual se determinará el esfuerzo necesario para separar las capas, con lo cual se podrá evaluar la calidad de la adherencia de las briquetas bicapa y de esta forma se pueda determinar los rangos óptimos de dotación del ligante.

❖ **Diseño de las probetas prismáticas para la medición del riego de adherencia aplicado**

Se realizarán probetas prismáticas los cuales simularán una conformación de carpeta asfáltica, para el control de la dotación de ligante.

❖ **Ensayo de control de dotación de ligante**

Para el control y medición de la dotación de riego de adherencia aplicado, será mediante el ensayo de absorción, para ello se hará uso de geotextil como material absorbente.

❖ **Numero de ensayos a realizar**

Para la realización de este trabajo se realizarán los ensayos requeridos y necesarios, tanto de los agregados como del cemento asfáltico, así también se procederá a la elaboración de las briquetas bicapa con el fin de determinar el rango óptimo de dotaciones de ligante que garanticen una adecuada adherencia entre capas, mediante el ensayo de corte LCB, se usara como riego

de liga, el asfalto líquido o diluido de curado rápido (RC-70) y de curado medio (MC-70) con una dosificación propuesta de 0,3 lt/m² a 0,7 lt/m² con intervalos de 0,1 lt/m², de los cuales se utilizara las dotaciones más adecuadas para el control de la dotación usando la metodología alternativa, basada en la absorción de ligante.

Tabla 1.2. Número de ensayos a realizar para la elaboración de la mezcla asfáltica

	Ensayos a realizar	Cant.
Agregados	Granulometría	3
	Peso específico del agregado grueso (grava)	3
	Peso específico del agregado grueso (gravilla)	3
	Peso específico de agregado fino (arena)	3
	Peso unitario de agregado grueso (grava)	3
	Peso unitario de agregado grueso (gravilla)	3
	Peso unitario de agregado fino (arena)	3
	Equivalente de arena	3
	Desgaste de los ángeles	2
	Porcentaje de caras fracturadas	3
	Índice de lajas	1
	Resistencia a los sulfatos	1
	Cemento asfáltico	Penetración
Ductilidad		3
Punto de inflamación		3
Punto de ablandamiento		3
Peso específico		3
Viscosidad		3
Total		49

Fuente: Elaboración propia

Se elaborara mezclas asfálticas (briquetas) para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico, la dosificación se realiza con la combinación de granulometría en función del porcentaje de C.A. adoptado.

Tabla 1.3. Elaboración de briquetas para obtener la cantidad óptima de C.A.

Porcentajes de cemento asfáltico	Número de briquetas
4,50%	3
5,00%	3
5,50%	3
6,00%	3
6,50%	3
Total briquetas	15

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de briquetas a construir para obtener los rangos óptimos de dotación de ligante (analizando el valor de adherencia entre capas mediante el ensayo de corte LCB) y el control de la dotación de riego de liga aplicado mediante el ensayo de absorción de ligante

Para la valoración del sistema de control de dotación que se propone en esta investigación, primeramente se elaboraran briquetas bicapa con el fin de determinar el rango de dotaciones óptimas que garanticen una buena adherencia entre capas, para ello se realizara el ensayo de corte, y también se construirán probetas prismáticas para el propósito de control en la dotación de riego de liga. Lo cual se detalla mas adelante.

La cantidad de aplicación para riegos de liga según el Instituto de Asfalto varía normalmente de 0,25 a 0,70 litros por metro cuadrado, esta variación está de acuerdo al estado de la superficie a regar (Asphalt Institute. MS-22). Para esta investigación el rango de dotaciones que se adoptara será de 0,3 lts/m² a 0,7 lts/m², con intervalos de 0,1 lts/m², teniendo así 5 dosificaciones de riego (0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,6 – 0,7 lts/m²).

Para la obtención del rango de dotaciones óptimas de riego de liga

El riego de liga será aplicado entre dos carpetas asfálticas elaboradas en caliente (mezcla asfáltica densa), cada espécimen estará conformado por una capa inferior y una capa superior haciendo un total de 2 briquetas (briqueta bicapa). Para el riego de adherencia o riego de liga se utilizarán asfalto líquido de curado rápido (RC-70) y de curado medio (MC-70), para lo cual se elaboraran 6 briquetas por cada tasa y tipo de ligante aplicado.

La cantidad de briquetas a construir será:

$$N = A * B * C$$

$$N = 5 * 2 * (6 * 2) = 120 \text{ briquetas a construir}$$

Donde:

N = Cantidad de briquetas.

A = Número de tasas de aplicación de ligante.

B = Número de ligantes a utilizar.

C = Número de briquetas por cada dosis de ligante.

Las 120 briquetas son tanto para la capa superior e inferior, si se toma en cuenta que dos briquetas conforman una briqueta bicapa, entonces da como resultado un total de 30 briquetas bicapa a construir para cada tipo de ligante utilizado.

Para el control de la dotación de riego de liga aplicado

Se construirán probetas prismáticas de 27 x 27 cm, los cuales servirán para los ensayos de medición de ligante aplicado, para esto se seleccionarán tres dotaciones más adecuadas que obtengan resultados óptimos de adherencia. Este ensayo se realizará con una nueva metodología propuesta el cual se basa en la absorción de ligante, usando el geotextil como material absorbente.

$$N = D * E * F * G$$

$$N = 2 * 3 * 2 * 3 = 36 \text{ probetas a construir}$$

Donde:

N = Número de probetas prismáticas.

D = Tipo de geotextil utilizado.

E = Cantidad de probetas por cada dosis de riego.

F = Tipos de ligante a usar.

G = Dosis de riego de liga.

1.9. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis e interpretación de los datos que se obtengan se aplicará el método estadístico descriptivo el cual nos permitirá evaluar los datos y resultados obtenidos de los ensayos realizados en esta investigación.

Se utilizan generalmente ciertas mediciones estadísticas, que nos ayudan a establecer si los resultados se encuentran dentro de un parámetro aceptable, normalmente de determinan las siguientes:

Media: Conocida también como media aritmética o promedio, es la cantidad total de la variable (muestra o medida) distribuida a partes iguales entre cada observación. En términos matemáticos, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$X = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

X = Valor medio.

n = Número de muestra

Mediana: Valor medio de los resultados

Desviación estándar (S): Es el promedio de lejanía de los valores obtenidos (lecturas) respecto del promedio.

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

Donde:

S= Desviación estándar

Coefficiente de variación (C.V.): Desviación estándar dividida por la media. También es conocida como desviación estándar relativa (R.S.D.). El coeficiente de variación puede ser expresado en porcentaje

$$C.V. = \frac{S}{X}$$

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación.

S = Desviación estándar.

X = Valor medio.

1.10. ALCANCE

Como alcance general el presente trabajo de investigación a realizar “VALORACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA DOTACIÓN DE RIEGO DE LIGA APLICADO EN OBRA” tiene como fin el establecer una solución apropiada para la obtención de resultados o valores óptimos de control y medición de la dotación de ligante para su correcta extensión con la cantidad apropiada previamente calculada, mediante los diferentes ensayos de laboratorio, para que la misma pueda ser utilizado como una metodología alternativa para la medición y el control de dotación de riego de liga, en la elaboración de proyectos de nuestro departamento.

El alcance de esta investigación se detalla a continuación por capítulos:

En el primer capítulo, se describe en forma general de que trata la investigación de la valoración de un sistema de control en la dotación de riego de liga aplicado en obra, en la cual se da a conocer la introducción al trabajo, la justificación, los objetivos general y específicos a los cual se pretende alcanzar. Se describe también el diseño metodológico para la realización de esta tesis.

El segundo capítulo, comprenderá todo la parte del fundamento teórico, donde se detalla toda la información base necesaria para la esta investigación, en la cual se describirán lo referente a las características y efectos del riego de liga en la adherencia entre capas asfálticas de los pavimentos flexibles, también se describirán las metodologías que se seguirá para la medición de la dotación de ligante aplicado y el procedimiento para la determinación de las dotaciones óptimas.

En el tercer capítulo, se desarrolla la aplicación práctica, en la cual se realizará la descripción de los materiales de aporte (agregados y cemento asfáltico), su procedencia y características, mediante la realización de los diferentes ensayos de laboratorio para la caracterización de los mismos.

En este capítulo también se procederá al diseño y la metodología seguida para la elaboración de la mezcla asfáltica convencional (briquetas) y el análisis de los rangos óptimos de dotación de ligante, con el control de la adherencia mediante ensayos de corte LCB y la medición de la dotación de riego de adherencia aplicado, utilizando el instrumento de medición de ligante propuesto en esta investigación el cual se basa en el uso de geotextil como material absorbente. Se describe también el proceso de fabricación y acondicionamiento de las probetas para cada ensayo. También se realiza el análisis y los criterios de aceptación de los resultados obtenidos

Finalmente en el cuarto capítulo, se establecerán las conclusiones a las que se llegó una vez concluido el trabajo investigación y además se dan las recomendaciones necesarias para la correcta ejecución de este proyecto.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES GENERALES SOBRE PAVIMENTOS

2.1.1. Generalidades

El firme de una carretera está formado por varias capas de diferentes materiales, mezclas asfálticas o bituminosas, hormigones y capas tratadas con el fin de resistir las cargas a las cuales está sometida, creando una superficie segura y cómoda. Su construcción se realiza en varias fases, asegurando las mejores características respecto a la resistencia al deslizamiento, la regularidad superficial, el ruido de rodadura, la reflexión luminosa y el desgaste superficial.

El diseño de un pavimento consiste en establecer una estructura para una duración dada, bajo las solicitaciones del tránsito y el medio ambiente. En este proceso intervienen varios elementos entre los que se encuentran los materiales, los espesores de las capas, los procedimientos de construcción y las acciones de mantenimiento que son los factores determinantes para que la estructura presente un buen comportamiento.

La capa que está en contacto con los vehículos es la capa de rodadura. Para los pavimentos flexibles y semirígidos, esta capa está formada por una mezcla bituminosa con una combinación de áridos y un ligante asfáltico, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua.

2.1.2. Definición de pavimento

El pavimento es la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodamiento y cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías, distribuyéndolas en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales en ellas. (Osuna, 2008)

2.1.3. Tipos de pavimento

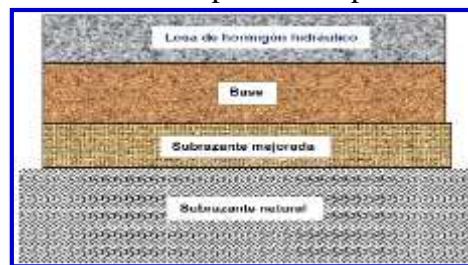
2.1.3.1. Pavimentos con tratamiento superficial

Los tratamientos superficiales dobles o triples pueden ser utilizados como capas de revestimiento en carreteras de tráfico leve a medio. Se construyen mediante la aplicación de capas de ligante bituminoso sobre las cuales se conforman capas de materiales pétreos compactados, cuya granulometría debe ser rigurosamente controlada para satisfacer las exigencias de las especificaciones técnicas adoptadas en el proyecto.

2.1.3.2. Pavimento rígido

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción de bajo la losa producen su fisuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga. La capa inmediatamente inferior a las losas de C.C.P. denominada sub-base, por esta razón, puede ser constituida por materiales cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles.

Figura 2.1. Sección típica de un pavimento rígido



Fuente: Geotechnical Aspects of Pavements, FHA, 2006

2.1.3.3. Pavimento flexible

También llamado pavimento asfáltico, el pavimento flexible está conformado por una carpeta asfáltica en la superficie de rodamiento, la cual permite pequeñas deformaciones en las capas inferiores sin que la estructura falle. Luego, debajo de la carpeta, se encuentran la base granular y la capa de sub-base, destinadas a distribuir y

transmitir las cargas originadas por el tránsito. Finalmente está la subrasante que sirve de soporte a las capas antes mencionadas.

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, tiene un período de vida de entre 10 y 15 años, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento periódico para cumplir con su vida útil.

Figura 2.2. Pavimento flexible



Fuente: <https://preventionworld.com/actualidad/wpcontent/uploads/sites/7/2013/08/road1-769x260.jpg>

Figura 2.3. Sección típica de un pavimento flexible



Fuente: Geotechnical Aspects of Pavements, FHA, 2006

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

- ❖ Resistencia estructural.
- ❖ Deformabilidad.
- ❖ Durabilidad.

Estas características se definen de la siguiente manera:

❖ **Resistencia estructural**

Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura. (Rico y Del Castillo, 1984)

❖ **Deformabilidad**

Una de las propiedades de un pavimento flexible, como su nombre lo indica es la capacidad de deformarse y restituirse a su forma original ante la repetición de las cargas actuantes

❖ **Durabilidad**

La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desea dar al camino, depende de la importancia de este. Hay veces que es más fácil hacer reconstrucciones para no tener que gastar tanto en el costo inicial de un pavimento.

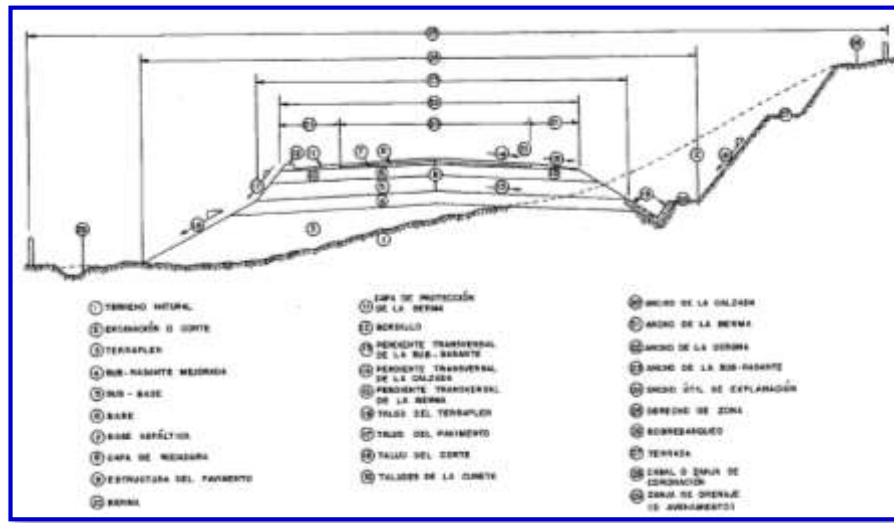
2.2. COMPONENTES ESTRUCTURALES O CAPAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.2.1. Definición de la capa de un pavimento flexible

Las capas de un pavimento están compuestas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

Desde el punto de vista de diseño, los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del sistema.

Figura 2.4. Componentes de un pavimento



Fuente: Ingeniería de pavimentos, Montejo

Los componentes estructurales del pavimento flexible son los siguientes:

- ❖ **Capa sub-base:** Esta es la capa o capas, están bajo la capa base que no siempre es necesaria.
- ❖ **Capa Base:** Esta es la capa que se encuentra directamente debajo de la capa superficial y en general, se compone de agregados (ya sea estabilizado o sin estabilizar).
- ❖ **Capa de rodadura o carpeta asfáltica:** Esta es la capa superior y la capa que entra en contacto con el tráfico. Puede estar compuesta por una o varias capas asfálticas.

Esta capa es la más expuesta al intemperismo y a los efectos abrasivos de los vehículos, por lo que necesita de mantenimientos periódicos para garantizar su adecuada performance.

2.3. CARPETA ASFÁLTICA

2.3.1. Definición de carpeta asfáltica

La Carpeta asfáltica es la capa o conjunto de capas que se colocan sobre la base, constituidas por materiales pétreos y un producto asfáltico. Su función es proporcionar

al tránsito una superficie estable, prácticamente impermeable, uniforme y de textura apropiada.

Olivera (1994), cita que los materiales pétreos son suelos inertes que se consiguen en ríos o depósitos naturales. Para poder ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo, para que el asfalto no se oxide.

2.3.2. Clasificación de las carpetas asfálticas

Es necesario que para construir cada una de las carpetas asfálticas se debe contar de antemano con una base debidamente conformada, compactada, impregnada y seca. Las carpetas asfálticas empleadas en los pavimentos flexibles se pueden clasificar en¹:

a) Tratamientos superficiales

- ❖ Riego con gravilla.
- ❖ Riego sin gravilla.

b) Mezcla en el lugar

- ❖ Elaborado con moto conformadora.
- ❖ Elaborado con mezcladora ambulante.

c) Concreto asfáltico

- ❖ Dosificación por peso en planta, y empleando cemento asfáltico y agregados calientes.

2.4. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Los tratamientos superficiales son aquellos tratamientos de pequeño espesor realizados con riegos o mezclas que logran una superficie de rodadura impermeable, segura y adecuada para la circulación.

¹ Crespo Villalaz C., Vías de comunicación caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos, Cuarta Edición, LIMUSA, México.

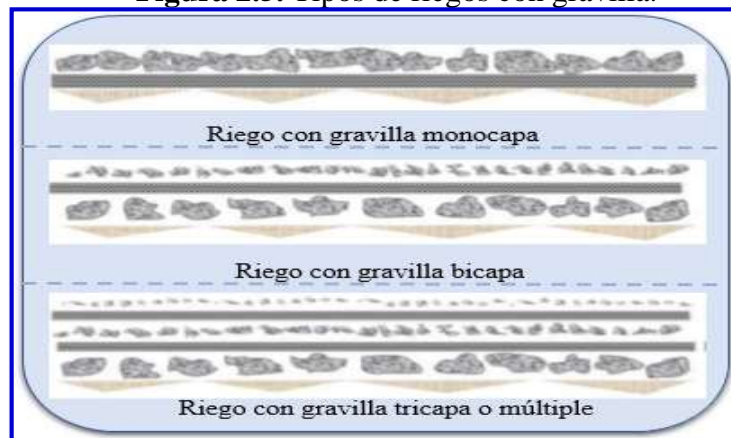
2.4.1. Riegos con gravilla

Los riegos con gravilla consisten en la aplicación de una o varias capas de película de un ligante hidrocarbonado sobre una superficie, complementadas por una o varias capas de árido, con una o dos gravas o gravilla en su espesor con áridos de tamaño uniforme, de manera que el árido quede anclado por su parte inferior en el ligante, y evitando que el ligante fluya a la superficie.²

Se pueden distinguir varios tipos de riego con gravilla:

- ❖ **Riego con gravilla monocapa (tratamiento superficial simple):** Consiste en una aplicación de una capa de material asfáltico seguido de una distribución de agregados pétreos.
- ❖ **Riego con gravilla bicapa (tratamiento superficial doble):** Consiste en dos aplicaciones de material asfáltico, cada una de ellas seguida de una distribución de agregado pétreo, en general el tamaño nominal del primer agregado es el doble del segundo.
- ❖ **Riego con gravilla tricapa o múltiple (tratamiento múltiple):** Consiste en tres o más aplicaciones de material asfáltico, cada una de ellas seguida de una distribución de agregado pétreo de menor tamaño.

Figura 2.5. Tipos de riegos con gravilla.



Fuente: Elaboración propia

² Bustos, G. & Pérez, E. 2004, Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 533: Tratamientos Superficiales mediante Riegos con Gravilla, Madrid.

2.4.2. Riegos sin gravilla

Los riegos sin gravilla pueden diferenciarse principalmente en riegos de imprimación, riegos de adherencia y riegos de curado, existiendo también riegos de negro y riegos antipolvo.

2.4.2.1. Riegos de imprimación

Los riegos de imprimación consisten en la aplicación de un ligante bituminoso sobre una superficie porosa (capa granular) previa a la colocación sobre esta de una capa o tratamiento bituminoso.³

Figura 2.6. Riego de imprimación



Fuente: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZAIO0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW

2.4.2.2. Riegos de curado

Los riegos de curado consisten en la aplicación de capa continua y uniforme de emulsión bituminosa sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, con el fin de impermeabilizar la superficie sobre la que es aplicado.

Mediante este tipo de tratamientos se consigue que la capa tratada con conglomerante hidráulico conserve la humedad necesaria durante su fraguado y primer endurecimiento, evitando las pérdidas de humedad por evaporación.⁴

³ Bustos, G. & Pérez, E. 2004, Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 530: Riegos de Imprimación, Madrid.

⁴ Bustos, G. & Pérez, E. 2004, Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 532: Riegos de curado, Madrid.

Figura 2.7. Riego de curado



Fuente:http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Riego_de_curado_%28construcci%C3%B3n%29

2.4.2.3. Riegos de adherencia

Los riegos de adherencia son aquellos en los que se aplica una emulsión bituminosa o asfalto líquido sobre una capa tratada con ligantes hidrocarbonados o conglomerantes hidráulicos antes de extender sobre ella otra capa bituminosa, a excepción de tratamientos con gravilla o lechadas bituminosas. La función principal de los riegos de adherencia es la perfecta unión entre las capas. Esto provoca que las capas trabajen de forma solidaria con el fin de resistir mejor los esfuerzos del tráfico, reduciendo las deformaciones y el deslizamiento.⁵

Figura 2.8. Riego de liga o de adherencia



Fuente: Departamento de transporte de California, 2009

⁵ Bustos, G. & Pérez, E. 2004, Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 531: Riegos de adherencia, Madrid.

2.4.2.4. Riego en negro (riego niebla)

Se realizan en vías de baja intensidad de tráfico sobre superficies de rodadura pobres en ligante, envejecidas, descarnadas por pérdida de gravilla y faltas de impermeabilidad.

2.4.2.5. Riego antipolvo

Aplicación de un ligante sobre la superficie de un camino no pavimentado con el objeto de eliminar el polvo.

2.5. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.5.1. Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer, 2004).

2.5.2. Diseño de las mezclas asfálticas

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall y el método Hveem.

2.5.3. Características y comportamiento de las mezclas asfálticas

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

2.5.3.1. Densidad

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

2.5.3.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

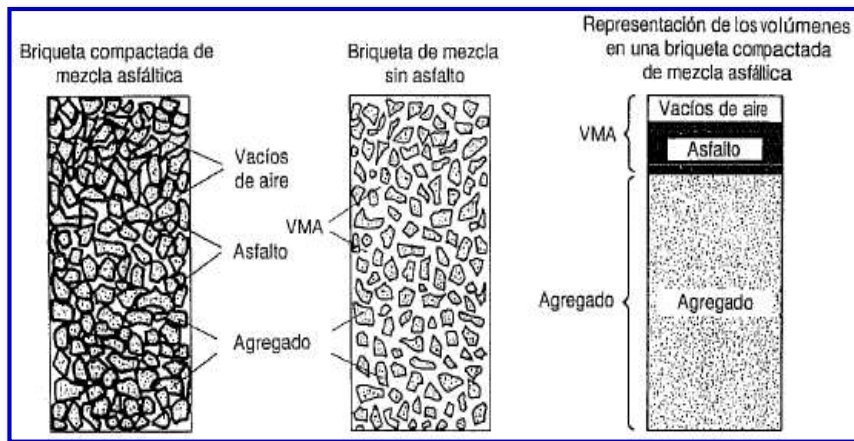
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible de vacíos, preferiblemente menos del 8 por ciento.

2.5.3.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El vacío en el agregado mineral representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto mayor sea el vacíos en el agregado mineral, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

Figura 2.9. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada



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

Asphalt Institute

2.5.3.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

2.5.4. Propiedades consideradas en el diseño de las mezclas asfálticas⁶

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas.

⁶ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt Institute; Cap.3, pág. 60

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente, entre ellas se encuentran las siguientes:

2.5.4.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

2.5.4.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para mantener sus propiedades mecánicas y físicas a lo largo del tiempo, resistiendo factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

2.5.4.3. Impermeabilidad

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

2.5.4.4. Trabajabilidad

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

y compactar. Puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado y la granulometría.

2.5.4.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

2.5.4.6. Resistencia a la fatiga

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

2.5.4.7. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa

2.5.5. Criterios de diseño normalizado

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

Tabla 2.1. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de antemano que clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C131	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica es esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando sulfato de sodio	AASHTO T104 ASTM CSS	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos. El valor del error permisible no debe ser mayor de 0,5%.
Equivalente de arena	AASHTO T176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C-127 ASTM C-128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal. que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso unitario y vacío	AASHTO T19 ASTM C29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: Asphalt Institute MS-22

Tabla 2.2 Ensayos de laboratorio normalizados para asfaltos

Ensayo de laboratorio para asfaltos	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO T201 ASTM D 2170	<p>En el diseño de mezclas asfálticas las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo.</p> <p>Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 60°.</p> <p>Mide la consistencia de los cementos asfálticos.</p>
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	<p>Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en decimas de milímetros. Valores altos de penetración indicaran consistencias suaves.</p>
Punto de inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	<p>Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta de Cleveland.</p>
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	<p>Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.</p>
Punto de reblandecimiento	AASHTO T53. ASTM D 36	<p>La temperatura determinada como de reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzara un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.</p>
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	<p>Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.</p>
Peso específico	AASHTO T228 AASHTO T85	<p>El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen. ❖ Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. <p>Se determina normalmente por el método del picnómetro.</p>
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T51 ASTM D113	<p>Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de planta de mezclado en caliente.</p>

Fuente: Asphalt Institute MS-22

Tabla 2.3. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángulos. %	35,0
Partículas alargadas y lajeadas. % máximo	40,0
Equivalente de arena, % mínimo	50,0
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25,0


Fuente: SCT, 2004

Tabla 2.4. Especificaciones para graduaciones densas

Tamiz	Mezcla densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	N°4	N°8	N°16
Gradación de agregados (grava; fino y filler) si se requiere Porcentaje en peso									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37,5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25,0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19,0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½" (12,5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9,5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
N°4 (4,75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
N°8 (2,36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
N°16 (1,18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
N°30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
N°50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
N°100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
N°200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: Secretaria de comunicaciones y transportes (SCT), Instituto Mexicano del transporte, 2004

Figura 2.10. Requisitos de calidad para cemento asfáltico de penetración 85-100

 BETUNEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA				
CERTIFICADO DE QUALIDADE DE PRODUTO ACABADO (CÓPIA) Nº 663/2014				
PRODUTO: CAP 85/100 (Exportação) DATA DO CARREGAMENTO: 24/10/14 CLIENTE: MERCANTIL LEON SRL DESTINO: SANTA CRUZ LA SIERRA - BOLIVIA VEÍCULO PLACA: HRG-3197/HTE-9641 MUNICÍPIO: CORUMBÁ HORA: TRANSPORTADOR: SAP TRANSPORTES INTERNACIONAIS LTDA OBS: MOT. HELIO NEY SOARES COSTA		QUANTIDADE: 27900 Kg C. PROVA FAB/CLI: 103790 / N. FISCAL Nº: 6356 ESTADO: MS		
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Formulario C-1 (Llenado por la Entidad) - ENSAYOS DE VERIFICACION DE CALIDAD DEL MATERIAL SOLICITADON (ENSAYOS AASHTO)		TQ.: 4 TEMPERATURA: 25°C		
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Formulario C-1 (Llenado por la Entidad) - ENSAYOS DE VERIFICACION DE CALIDAD DEL MATERIAL SOLICITADON (ENSAYOS AASHTO)	LIMITES	MÉTODO	REPRODU- TIBILID.(*)	ENCONTRADAS
Penetración a 25 °C, 100 gr, 0,1 mm (T - 201)	85 a 100	NBR-6576 / ASTM D5 / AASHTO T201	± 4 dmm	91
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C seg. (T - 72)	85 min.	NBR-14950 / ASTM D88 / AASHTO T72	± 2%	120
Ensayo de la Mancha @20% Xilol (T - 102)	Negativo	- / ASTM D2170 / AASHTO T102	ND	negativo
Punto de Ablandamiento °C (T - 53)	43 a 46	NBR-6980 / ASTM D36 / AASHTO T53	± 3°C	45
Ductilidad a 25 °C 5 cm/min, cm (T - 51)	100 min.	NBR-6293 / ASTM D113 / AASHTO T51	consultar NBR	> 100
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 135°C, cP	214 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	290
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 150 °C, cP	97 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	152
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177 °C, cP	28 a 114	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T316	ND	58
TEMPERATURA DE MISTURA, °C (**) (***)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	141 a 147
TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO, °C (**) (***)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	130 a 136
Índice de Penetración de Pfeiffer	-1,5 a 0,5	CÁLCULO / CÁLCULO	ND	-1,1
Punto de Inflamación C.O.C. °C (T - 48)	230 min.	NBR-11341 / ASTM D82 / AASHTO T48	± 18 °C	> 235
Solubilidad en Tricloroetileno (T-44)	99 min.	NBR-14855 / ASTM D2042 / AASHTO T44	± 0,26%	99,9
Densidad a 25 °C c/25 °C (T - 228)	0,99 min.	NBR-6296 / AASHTO T228	± 0,005	1,012
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO PELICULA DELGADA (TFOT), 32 mm, 163°C (AASHTO T240)				
(R)TFOT - Pérdida de Masa (T - 240)	1 máx.	NBR-15235 / ASTM D2872 / AASHTO T240	consultar NBR	0,41
(R)TFOT - Penetración del Residuo, % de la penetración orig	50 min.	CÁLCULO	ND	55
(R)TFOT - Pérdida por Calentamiento (T-179), %	1 máx.	CÁLCULO / AASHTO T-179	± 4 dmm	0,42
Densidad a 25 °C c/25 °C (T - 228)	1 a 1,05	NBR-6296 / AASHTO T228	± 0,005	1

Fuente: Elaboración propia

2.6. SOBRECAPA ASFÁLTICAS (RECAPADOS)

Consiste en la colocación de una capa de mezcla asfáltica en caliente, sobre una capa de rodamiento existente para mejorar las condiciones superficiales del pavimento. Puede sustituir total o parcialmente el espesor de una capa existente.⁷

Este mantenimiento debe emplearse cuando la superficie existente se está deteriorando o se presenten huellas, rugosidad, etc., tomando en cuenta la finalidad de pavimentar cada carretera con superficie asfáltica en forma periódica

⁷ Guía para inspectores, colocación de sobrecapas asfálticas, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales C.P. 11501-2060, San José, Costa Rica. 2015

2.6.1. Consideraciones generales para el diseño de sobrecapa o recapado

La evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos, así como el diseño estructural de la carpeta asfáltica nueva para refuerzo en pavimentos débiles o deteriorados, son bastante importantes a la hora de pavimentar o repavimentar caminos ya que es necesario conocer las condiciones de diseño y ensayos necesarios a través de estudios realizados en laboratorio para su calidad de rodadura brindada, su rápida habilitación al tránsito y su competitividad económica donde se debe de considerar a la adherencia entre las carpetas asfálticas como esencial porque jugara un papel fundamental en la vida útil del pavimento, demostrando que bajos niveles de adherencia repercuten indefectiblemente en grietas prematuras o una disminución significativa en su periodo de vida útil del pavimento que podría prevenirse asegurando la calidad de los materiales, así como con una correcta fase constructiva que garantice una adherencia adecuada y un buen desempeño de las estructuras.

2.7. RIEGO DE ADHERENCIA O RIEGO DE LIGA

2.7.1. Definición

Se define como riego de liga a la aplicación de una emulsión asfáltica sobre una capa asfáltica o una capa granular imprimada, previo a la colocación sobre ésta de una capa asfáltica o tratamiento asfáltico. Esto se realiza con el objetivo de mejorar la adherencia entre las capas ligadas.

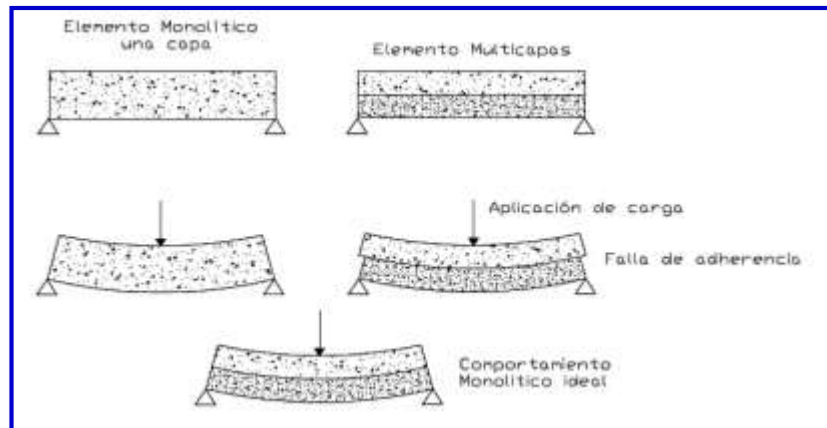
2.7.2. Importancia del riego de liga

En la construcción de una carretera en donde la capa de rodamiento está constituida por dos capas asfálticas que se suponen que van a estar totalmente unidas, trabajando de forma solidaria. Para ello, durante su construcción, se procede a la aplicación de un riego de adherencia o “riego de liga”, la cual es una aplicación ligera de emulsión asfáltica o asfalto líquido sobre un pavimento existente, para asegurar la adherencia entre la superficie de las capas asfálticas que se superpone.

La interfaz de adherencia entre la capa existente y la nueva capa colocada influye considerablemente en la distribución de los esfuerzos y deformaciones en la estructura

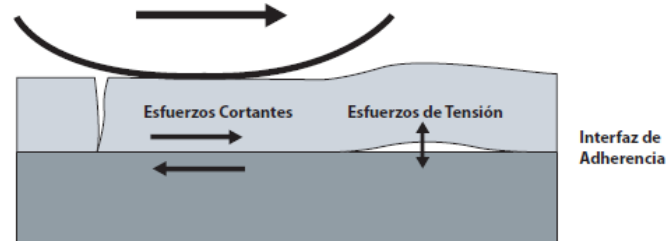
del pavimento. Estudios realizados sobre la interfaz de adherencia del pavimento (Shanin et al., 1987 y Chen, 1992) han indicado que el riego de liga proporciona una adecuada unión entre las capas del pavimento, la cual es crítica para transferir los esfuerzos cortantes y radiales de tensión a la estructura de pavimento.

Figura 2.11. Comparación de una viga monolítica y viga multicapa



Fuente: Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente, Álvarez Calisto. 2007.

Figura 2.12. Estado de esfuerzo en interfaz de adherencia del pavimento bajo cargas de servicios



Fuente: NCHRP, 2012

Por otro lado, si la interfaz de adherencia entre la capa nueva y la existente no puede proveer la suficiente resistencia para soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito, puede ocurrir una falla por cortante (NCHRP, 2012). La insuficiencia de adherencia entre la capa existente y la nueva capa, puede causar además que los esfuerzos de tensión se concentren en la fibra inferior de la nueva capa de rodadura. Esta concentración de esfuerzos acelera la aparición del agrietamiento por fatiga en la

superficie y el deterioro del resto de la estructura del pavimento (Mohammad et al, 2002).

Figura 2.13. Defectos ocurridos durante la dotación del riego [izquierda: Riego de liga uniforme; derecha: Riego no uniforme]



Fuente: Directrices riego de liga del estado de California. Departamento de transporte, división de construcción, abril 2009.

2.7.3. Condición básica del riego de liga o adherencia

Para que el riego de liga o adherencia cumpla con la misión que se encomienda de ser el elemento de unión entre dos capas, deben cumplirse una serie de premisas sobre:

- ❖ Estado de la superficie.
- ❖ Condiciones ambientales.
- ❖ Características y dotación del ligante utilizado como riego de adherencia.
- ❖ Aplicación del riego.
- ❖ Protección del mismo.

2.7.4. Condición que debe tener la superficie del pavimento para recibir el riego de liga

La superficie del pavimento de la recepción de la capa ligante, debe estar limpia y seca para promover la máxima unión, para ello debe de utilizarse barredoras mecánicas o máquinas de aire a presión, utilizando solo escobas de mano para sitios inaccesibles a las mismas.

Igualmente deben eliminarse si las hubiera, zonas exudadas o excesivamente deterioradas y abiertas que impidan tener una dosificación del ligante adecuada y homogénea en toda la superficie.

La aplicación de riego de liga debe resultar en una capa fina y uniforme de material ligante ya se emulsión asfáltica o asfalto rebajado, que cubre aproximadamente el 90% de la superficie del pavimento. Para lograr este resultado, la tasa de aplicación variará sobre la base de la condición del pavimento de la recepción de la capa ligante; Demasiado o poco riego de liga puede dar lugar a la unión inadecuada entre capas; El exceso de riego de liga puede crear un plano de deslizamiento lubricado entre capas, o puede hacer que el material de riego de liga que se introduce en una superposición, lo que afecta negativamente a las propiedades de la mezcla e incluso la creación de un potencial sangrado en las capas delgadas, en la tabla 2,5 muestra las tasas de aplicación recomendadas de pavimentos flexibles de Ohio (2001).⁸

Tabla 2.5. Tasa de aplicación de riego de liga recomendados de emulsión en pavimentos flexibles de Ohio

Pavement condition existente	Tasa de aplicación en litros/m ² (gal/yd ²)		
	Residual	Sin diluir	Se diluyó 1:1 con agua
Nueva HMA	0,14 a 0,18 (0,03 a 0,04)	0,23 a 0,32 (0,05 a 0,07)	0,45 a 0,59 (0,10 a 0,13)
HMA oxidado	0,18 a 0,27 (0,04 a 0,06)	0,32 a 0,45 (0,07 a 0,10)	0,59 a 0,91 (0,13 a 0,20)
Superficie fresada HMA	0,27 a 0,36 (0,06 a 0,08)	0,45 a 0,59 (0,10 a 0,13)	0,91 a 1,22 (0,20 a 0,27)
Superficie fresada PCC	0,27 a 0,36 (0,06 a 0,08)	0,45 a 0,59 (0,10 a 0,13)	0,91 a 1,22 (0,20 a 0,27)
Concreto de cemento portland PCC	0,18 a 0,27 (0,04 a 0,06)	0,32 a 0,45 (0,07 a 0,10)	0,59 a 0,91 (0,13 a 0,20)

Residuos: La tasa de aplicación de sólo el contenido de aglutinante de asfalto de la emulsión.
Sin diluir: La tasa de aplicación de la emulsión sin diluir.
Diluido 1:1 con agua : La tasa de aplicación de una emulsión se diluyo 1:1 con agua

Fuente: Boletín técnico, “Correcta aplicación del riego de liga” (sept 2012)

⁸ Departamento de Transporte de Texas, Estados Unidos de América. Boletín Técnico. Correcta Aplicación del riego de liga. 2011. Capítulo 6 Sección 3. Disponible en: (http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

2.7.5. Aplicación del riego de liga o riego de adherencia

La cantidad de ligante asfáltico residual sobre la superficie del pavimento es el factor más importante en la obtención de un vínculo adecuado entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa de mezcla en caliente de asfalto. En consecuencia, la tasa de aplicación de una emulsión o asfalto diluido utilizada como riego de liga deberá basarse en la cantidad deseada del residuo asfáltico estipulado por las especificaciones particulares de la obra.

La cantidad de aplicación para riegos de liga recomendados por el Instituto de Asfalto es normalmente de 0,25 a 0,70 litros por metro cuadrado, tanto para emulsiones y asfaltos líquidos, generalmente de curado rápido.

Figura 2.14. Aplicación de riego de liga



Fuente: <http://www.arqhys.com/construccion/fotos/construccion/Liga-de-riego.jpg>

La aplicación de riego de liga debe ser uniforme, sobre toda la superficie que quedará en contacto con el refuerzo. La aplicación del riego de liga es generalmente mediante camiones distribuidores. Por lo cual se deberá tener pleno conocimiento del caudal de erogación de la bomba dispersora y un adecuado control de la velocidad de avance del camión regador. El camión regador posee en su parte posterior una barra pulverizadora donde se alojan las boquillas dispersoras. La altura de la barra dispersora debe ser la adecuada para brindar una correcta y uniforme cobertura de la superficie.

❖ **Presión y temperatura de aplicación del riego de liga**

El camión distribuidor deberá tener la capacidad de desarrollar la presión para que el material asfáltico salga expulsado a presión constante y uniforme por cada una de las boquillas de la barra rociadora en forma de abanico hacia la superficie. Otro aspecto a considerar es la velocidad de bombeo del material durante la operación en orden de asegurar el patrón de rocío deseado. Una presión demasiado baja dará como resultado un riego discontinuo por la descarga desigual del material en las boquillas individuales. Mientras que una presión demasiado alta deformará el abanico de riego (Asphalt Institute).

El camión distribuidor debe tener la capacidad de mantener la temperatura del ligante para asegurar una adecuada viscosidad y flujo del material a través de las boquillas de barra rociadora. La temperatura a la que debe mantenerse el riego de liga dependerá del tipo de ligante que se desea aplicar. Un exceso de calentamiento sobre el material bituminoso podría causar el rompimiento de la emulsión estando aún dentro del tanque del camión dosificador (Departamento de transporte del Estado de Ohio, 2012).

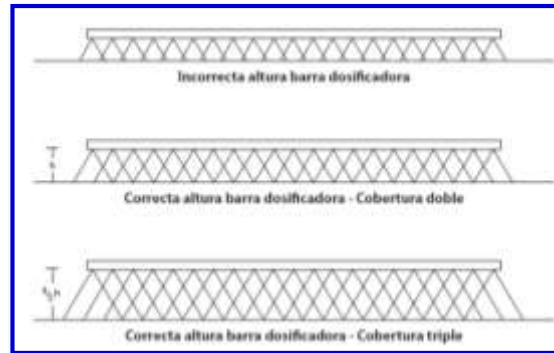
❖ **Altura de la barra de dosificación**

La elevación de la barra rociadora debe ajustarse a la altura suficiente para permitir el adecuado rocío del material bituminoso. Un rocío adecuado provee el traslape del ligante asfáltico colocado a través de las boquillas necesario para alcanzar aplicación uniforme y cobertura de toda la superficie del pavimento a intervenir. Si la barra rociadora está demasiado alta o baja, el riego de liga resultará en forma de líneas o rayas.

Diversos autores recomiendan que para alcanzar una aplicación del riego de liga uniforme con un porcentaje de cobertura total de la superficie, se debe ajustar la barra dosificadora a un patrón de rocío con cubrimiento doble o triple. El cubrimiento doble considera que la base del abanico que se forma al salir el material de la boquilla cubra hasta la mitad de la base del abanico de la boquilla contigua. Por otro lado el

cubrimiento triple considera que la base del abanico de una boquilla cubrirá dos terceras partes de la base del abanico de la boquilla continua.

Figura 2.15. Diagrama de altura de barra rociadora para cobertura deseada



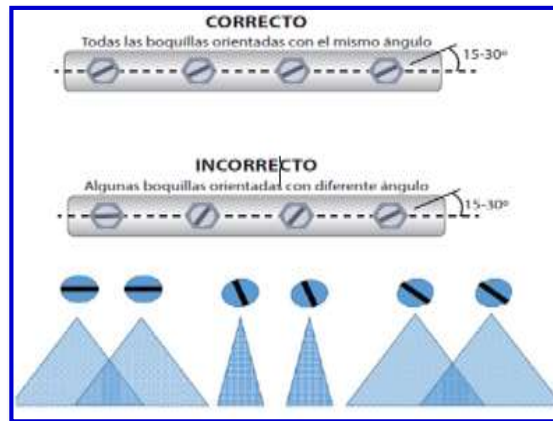
Fuente: Instituto del asfalto, 2014

❖ Boquillas (tamaño, ángulo)

Para asegurar una cobertura uniforme del material sobre la totalidad de la superficie a intervenir, todas las boquillas de la barra rociadora deben mostrar el mismo patrón de rocío por lo que deberán ser del mismo tamaño, estar abiertas, sin obstrucciones y alineadas a un mismo ángulo en el momento de la aplicación.

El ángulo de las boquillas oscila típicamente entre 15° y 30° y es medido con respecto al eje longitudinal de la barra con el fin de que los abanicos no interfieran entre sí. Si el ángulo de las boquillas no está alineado durante la aplicación del riego de liga, el patrón de rocío de uno de los nodos puede interferir con el patrón de rocío de los nodos adyacentes. Esto resultará en un riego no uniforme en la superficie de intervención, lo cual significa que algunas de las áreas de la superficie de la estructura existente recibirán un exceso de emulsión asfáltica mientras la sección continua tendrá insuficiente emulsión para garantizar la adherencia entre la superficie existente y la nueva capa asfáltica a colocar. Así por ejemplo, si se alinea el ángulo de las boquillas a 90° , el patrón de rocío de la barra distribuidora sería un riego de liga en líneas o rayado.

Figura 2.16. Alineamiento y ángulo de las boquillas



Fuente: Elaboración propia

2.7.5.1. Métodos de extensión

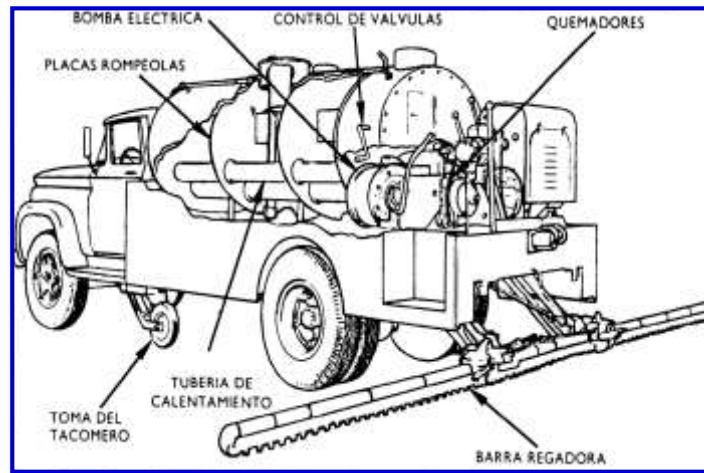
La aplicación del riego de liga habitualmente se realiza mediante cisternas regadoras y también en forma manual (no es recomendable). Suelen tener un sistema de calentamiento y termómetros para el control de temperatura y de indicadores de nivel. El ligante se aplica a través de la rampa de pulverización, con sistemas que pueden ser de presión constante, de volumen constante o de dosificación constante. En las zonas de difícil accesibilidad, se completa la extensión del ligante mediante lanzas manuales.

❖ Equipo distribuidor de asfalto

Es un tanque de asfalto montado sobre un camión o sobre un remolque, adaptado con bombas, barras rociadoras, y controles apropiados para regular la cantidad de asfalto que sale por las boquillas de la barra rociadoras. Un distribuidor incluye, normalmente, un sistema de calentamiento con base en quemadores de combustible o gas, para mantener el asfalto a la temperatura correcta de aplicación.

El sistema de presión constante posee un pequeño compresor para reponer las pérdidas de altura por vaciado del tanque. El sistema de volumen constante realiza la impulsión de la emulsión o asfalto rebajado mediante una bomba volumétrica, pudiendo variar la dosificación cambiando la velocidad de rotación de la bomba o la velocidad de avance del camión.

Figura 2.17. Esquema del camión distribuidor de asfalto



Fuente: Manual de asfalto (Asphalt Institute)

Figura 2.18. Camión distribuidor de asfalto



Fuente: http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm

Figura 2.19. Riego de adherencia manualmente



Fuente: <https://1.bp.blogspot.com/6vW4UK4Eqm4/WQs6G2yoPII/AAAAAAAAfyE/IT43bgt7Oc6CpMg5366u3t7IZM1D43NACLcB/s1600/img5.jpg>

2.7.6. Control de la cantidad de ligante aplicado

Para el control de la cantidad de ligante aplicado existe un método estandarizado para dicho control durante la realización de un riego. Dicho método, estandarizado según la norma ASTM D2995, el cual consiste en colocar una superficie cuadrada de un material que puede ser un geotextil o bandejas metálicas de área conocida previamente pesada sobre la capa inferior del pavimento previo a la extensión del riego de liga. Una vez que el ligante es extendido, mediante un camión regador, la superficie de geotextil o la bandeja es extraída y pesada de nuevo, y por la diferencia de peso se obtiene la dotación de riego aplicada.

Figura 2.20. Colocado del material para la medición de la dotación



Fuente: ASTM D2995, 2009, Standard practice for estimating application rate of bituminous distributors, 4th ed, West Conshohocken, PA, Pensilvania, USA.

Figura 2.21. Método de medición del riego según la norma ASTM D2995



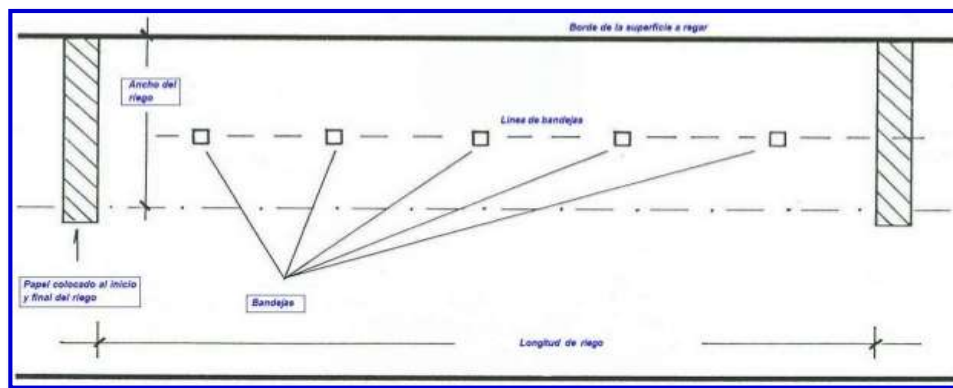
Fuente: Tack coat best practices, FHWA Cooperative Agreement Subtask

Control de dosis de riego de liga mediante uso de bandejas

Este control se lo realiza de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM D2995, para lo cual se usa bandejas metálicas, generalmente de 25 x 25 ó 30 x 30 cm., que se disponen al paso de camión distribuidor, en diferentes puntos del tramo en ejecución.

Las bandejas metálicas son pesadas antes y después de la aplicación del riego de liga. Por diferencia de pesadas y conociendo la densidad del ligante se calcula la dosis aplicada (lt/m^2) para cada punto.

Figura 2.22. Esquema de la aplicación y el control de un riego de liga



Fuente: FHWA 2005.

Otro de los métodos que también son utilizados para el control de la tasa de riego de ligante es:

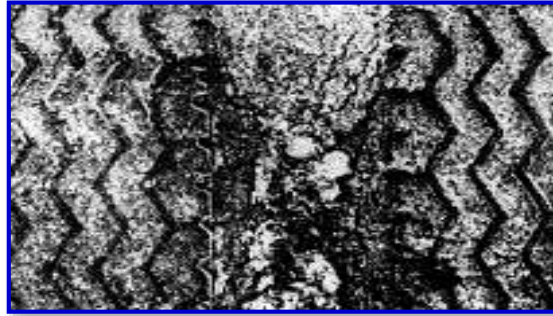
- ❖ El control de la cantidad del material bituminoso se realiza mediante el pesaje del carro distribuidor, antes y después de su aplicación, la diferencia entre la primera y segunda lectura indica la cantidad de ligante aplicado en la superficie.

2.7.7. Fallas causados por una incorrecta dotación y aplicación de riego de liga

- ❖ **Huellas en relieve localizadas en la superficie de rodadura**

Este defecto puede aparecer por un exceso de dotación de riego de adherencia. Aunque también puede aparecer por el uso de una mezcla bituminosa de poca estabilidad. Estas deformaciones pueden ser provocadas por el estacionamiento prolongado de vehículos pesados o por los neumáticos del compactador

Figura 2.23. Huellas en relieve localizadas en la superficie de rodadura



Fuente: M.O.P.U. 1989, Firms damaging catalog (Catálogo de deterioros en firmes)

❖ **Estriado**

Los estriados son franjas de gravilla desprendida paralelas al eje de la calzada. Su aparición está relacionada con una mala puesta en obra del ligante por defectos en la barra pulverizadora, la altura incorrecta de dicha barra, el exceso de viento o una baja temperatura durante la aplicación del riego.

Figura 2.24. Estriado



Fuente: M.O.P.U. 1989, Firms damaging catalog (Catálogo de deterioros en firmes)

Existen dos tipos de exudaciones relacionadas con la aplicación de tratamientos superficiales

❖ **Llorado de ligante**

El llorado de ligante consiste en la presencia de betún sin árido en la superficie. Puede ser causado por un exceso de ligante, por el uso de un ligante de baja viscosidad, por el derrame de solventes pero sobre todo por la utilización de un exceso de riego de adherencia, aunque también puede aparecer por la pérdida de áridos en la superficie,

por una excesiva compactación o por una elevada temperatura de compactación. La aparición del llorado de ligante puede deberse a un tráfico intenso.

Figura 2.25. Llorado de ligante



Fuente: M.O.P.U. 1989, Firms damaging catalog (Catálogo de deterioros en firmes)

❖ Flujo de ligante

El flujo de ligante consiste en el ascenso de ligante a la superficie de rodadura a través de una grieta. La causa principal de este tipo de deterioros es la dosificación excesiva de ligante en los riegos de adherencia o en la dosificación de la mezcla, al realizar un incorrecto dosificado del árido.

Figura 2.26. Flujo de ligante



Fuente: M.O.P.U. 1989, Firms damaging catalog (Catálogo de deterioros en firmes)

2.7.8. Fallos causados por falta de adherencia entre capas

Existen varios tipos de fallos que aparecen debido a una incorrecta unión entre las capas del firme

❖ **Cordón longitudinal**

Los cordones longitudinales son desplazamientos horizontales de material en la superficie de rodadura, creando protuberancias prolongadas en la dirección del tráfico, generalmente en el borde de la calzada. Pueden ser debidos, aparte de por problemas de adherencia, a una falta de contención lateral de la capa de rodadura o a mezclas poco estables. Estos defectos pueden ser provocados por las fuerzas generadas por vehículos pesados en rampas.

❖ **Arrollamiento transversal**

Los arrollamientos transversales son desplazamientos de material en la superficie de rodadura, creando protuberancias prolongadas en sentido perpendicular al tráfico. Además de la unión entre capas, pueden ser debidos a la utilización de mezclas poco estables. En este caso, estas deformaciones pueden aparecer por las fuerzas generadas por los frenazos o aceleraciones de los vehículos.

❖ **Grieta parabólica**

Este tipo de roturas se deben al deslizamiento de la capa de rodadura respecto de la inmediatamente inferior. Al igual que los arrollamientos transversales, estos desperfectos aparecen en zonas sometidas a frenadas y aceleraciones

En recapados asfálticos, el reflejo temprano de las fisuras existentes en la nueva capa de mezcla de refuerzo, denota una baja o nula adherencia entre las capas resistentes.

2.8. CEMENTO ASFÁLTICO

Son asfaltos refinados o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación. Estos pueden proceder de depósitos naturales, que son enormes lagos de asfalto mezclado con un material mineral, agua y otras impurezas. Una vez refinados se puede obtener hasta un 97% de bitumen. Estos asfaltos refinados son muy duros y se les da la consistencia, mezclándolos con aceites o residuos provenientes de la destilación del petróleo de base asfáltica.

Los cementos asfálticos se dividen en grados según su dureza o consistencia, que es medida mediante el ensayo de penetración medido en 1/10 mm, valor que es inverso a la dureza. De acuerdo a esto, los cementos asfálticos más comúnmente usados son los siguientes⁹:

- ❖ CA 40- 50 (En mastic para sellado de juntas de pavimento de hormigón).
- ❖ CA 60 - 70 (En concreto asfáltico).
- ❖ CA 85 - 100 (En concreto asfáltico).
- ❖ CA 120 - 150 (Tratamientos superficiales).

Tabla 2.6. Requisitos para la especificación de un cemento asfáltico

	40 -50		60 -70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25°C. 100g. 5 seg	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación copa abierta de Cleveland °C.	232		232		232		218		177	
Ductilidad a 25°C, 5cm/min, cm.	100		100		100		100			
Solubilidad en tricloroetileno, %	99		99		99		99		99	
Ensayo de película delgada, 3,2mm. 163°C. 5hrs.										
Pérdida por calentamiento. %		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración por residuo. % del original.	58		54		50		46		40	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min. cm			50		75		100		100	
Ensayo de La mancha con: Solvente nafta standard Solvente nafta – xilol, % xilol Solvente heptano – xilol, % xilol	Negativa para todos los grados Negativa para todos los grados Negativa para todos los grados									

Fuente: Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción, UMSA, 2006

2.8.1. Asfaltos diluidos o líquidos

Según la terminología del "Asphalt Institute", asfalto líquido se define como: "Material asfáltico cuya consistencia blanda o fluida hace que se salga del campo en que se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300".

⁹ Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción (guía de las prácticas de campo y normas de calidad), UMSA, 2006

Están compuestos por una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil que puede ser bencina, kerosene, aceite o agua con emulsificador. El fluidificante se agrega con el propósito de dar al asfalto la viscosidad necesaria para poderlo mezclar y trabajar con los áridos a baja temperatura (alrededor de 70°C). Una vez elaborada la mezcla, los solventes o fluidificantes se evaporan (proceso de curado) en un tiempo más o menos largo dependiendo de su naturaleza, dejando como residuo el cemento asfáltico que envuelve y cohesiona las partículas de agregado.

De acuerdo al fluidificante, más o menos volátil, estos asfaltos se dividen en:

a) Asfalto líquido de curado rápido, RC: Cuando el disolvente es del tipo de la nafta o gasolina.

Se utilizan generalmente en:

- ❖ RC-1 / RC-70: Riegos de liga.
- ❖ RC-2 / RC-250: Mezclas asfálticas abiertas.
- ❖ RC-3 / RC-800: Sellos de arena, tratamientos superficiales.
- ❖ RC-5 / RC-3000: Sellos de arena, macadam de penetración.

b) Asfalto líquido de curado medio, MC: Si el disolvente es la parafina o kerosene, lo que da trabajabilidad a temperatura relativamente baja.

Se emplean en:

- ❖ MC-0 / MC-30: Como imprimante en bases estabilizadas.
- ❖ MC-2 / MC-250: Mezclas en sitio de graduación abierta y cerrada.
- ❖ MC-3 / MC-800: Mezclas en sitio de graduación abierta y cerrada.
- ❖ MC-4, MC-5 / MC-3000: En zonas calurosas y agregados absorbentes.

c) Asfalto líquido de curado lento, SC: Su disolvente o fluidificante es aceite liviano, relativamente poco volátil.

2.8.1.1. Especificaciones para asfaltos líquidos

Los asfaltos líquidos se clasifican de acuerdo con la velocidad de curado del solvente y el grado de consistencia del cemento asfáltico utilizado para su elaboración, medida por la viscosidad cinemática en centistokes, las cuales deben cumplir con las especificaciones recomendadas en la norma ASTM para los asfaltos líquidos.

Tabla 2.7. Especificaciones para asfalto diluido de curado rápido (RC)

Características	Método de ensayo AASHTO	Método de ensayo ASTM	Grados					
			RC-0	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5
Punto de inflamación, vaso abierto. °C.	T-79	D-1310	-	-	26.7	26.7	26.7	26.7
Viscosidad furoil a 25 °C, s.	T-72	D-88	75-150	-	-	-	-	-
Viscosidad furoil a 50 °C, s.			-	75-150	-	-	-	-
Viscosidad furoil a 60 °C, s.			-	-	100-200	250-500	-	-
Viscosidad furoil a 82,2 °C, s.			-	-	-	-	125-250	300-600
Destilación: Destilado (porcentaje del total destilado a °C): A 190 °C.	T-78	D-402	15+	10+	-	-	-	-
A 225 °C.			55+	50+	40+	25+	8+	-
A 260 °C.			75+	70+	65+	55+	4+	25+
A 316 °C.			90+	88+	87+	83+	80+	70+
Residuo de destilación a 360 °C. porcentaje en volumen por diferencia			50+	60+	67+	73+	78+	82+
Ensayo sobre el residuo de destilación: Penetración 25 °C, 100 g, 5 s.	T-49	D-5	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120
Ductilidad. 25 °C, cm	T-51	D-113	100+	100+	100+	100+	100+	100+
Solubilidad en C Cl ₄ %	T-44	D-4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Condiciones generales			El material no contendrá agua					

Fuente: The Asphalt Institute, (Manual del asfalto)

Tabla 2.8. Especificaciones para asfalto diluido de curado medio (MC)

Características	Método de ensayo AASHTO	Método de ensayo ASTM	Grados					
			MC-0	MC-1	MC-2	MC-3	MC-4	MC-5
Punto de inflamación, vaso abierto. °C.	T-79	D-1310	37,8	37,8	65,6	65,6	65,6	65,6
Viscosidad furoil a 25 °C, s.	T-72	D-88	75-150	-	-	-	-	-
Viscosidad furoil a 50 °C, s.			-	75-150	-	-	-	-
Viscosidad furoil a 60 °C, s.			-	-	100-200	250-500	-	-
Viscosidad furoil a 82,2 °C, s.			-	-	-	-	125-250	300-600
Destilación: Destilado (porcentaje del total destilado a °C): A 225 °C.	T-78	D-402	25-	20-	10-	5-	0	0
A 260 °C.			40-70	25-65	15-55	5-40	30-	20-
A 316 °C.			75-93	70-90	60-87	55-85	40-80	20-75
Residuo de destilación a 360 °C. porcentaje en volumen por diferencia			50+	60+	67+	73+	78+	82+
Ensayo sobre el residuo de destilación: Penetración 25 °C, 100 g, 5 s.			T-49	D-5	120-300	120-300	120-300	120-300
Ductilidad. 25 °C, cm	T-51	D-113	100+	100+	100+	100+	100+	
Solubilidad en C Cl ₄ %	T-44	D-4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	
Condiciones generales			El material no contendrá agua					

Fuente: The Asphalt Institute, (Manual del asfalto)

2.9. GEOTEXTILES

La utilización de los geotextiles en diversos campos de la ingeniería se ha visto incrementada de una forma considerable en estos últimos años. Es por ello que estos materiales están tomando cada vez un protagonismo importante en la construcción.

Se conoce como geotextil al fieltro o manto fabricado con fibras sintéticas, cuyas funciones se basan en la capacidad de filtración y en sus altas resistencias mecánicas, siendo estas: separar, filtrar, drenar, y proteger. El geotextil es un material textil permeable, a base de polímero (natural o sintético), pudiendo ser no tejido (de fibra cortada o filamento continuo) o tejido, usado en contacto con el suelo o con otros materiales. Pueden fabricarse de diferentes formas y sus aplicaciones abarcan prácticamente todos los campos de la ingeniería civil, el riego y la edificación donde esté en contacto con el terreno.¹⁰

Los geotextiles son telas cuyos componentes individuales son fibras, filamentos, o cintas de polímeros, que siguiendo varios patrones de distribución de sus componentes individuales, se juntan y entrelazan entre sí por medio de diversos métodos que les someten a acciones térmicas, mecánicas, químicas, o la combinación de ellas, dando como resultado, estructuras continuas, relativamente delgadas, permeables y porosas en forma de hojas, que poseen resistencia en su plano.

2.9.1. Características de los geotextiles

Las características principales que debe tener un geotextil son las siguientes:

- ❖ **Resistencia a la tracción:** Es posible que el geotextil absorba esfuerzos producidos en estructuras sometidas a carga.
- ❖ **Elongación:** Permite un acoplamiento en terrenos irregulares, manteniendo su resistencia bajo deformaciones iniciales.
- ❖ **Resistencia química:** Los geotextiles resisten ácidos, álcalis, bacterias, etc., debido a su fabricación en polipropileno.

¹⁰ Luis Agustín Ricci: Evaluación de la adherencia entre carpetas asfálticas.

- ❖ **Resistencia a temperatura:** Resisten altas temperaturas.
- ❖ **Permeabilidad y capacidad de filtración:** Los geotextiles permiten el paso del agua y retienen los materiales finos debido a su porosidad.

2.9.2. Tipos de geotextiles

Los geotextiles forman parte del grupo de los geosintéticos. Estos se pueden definir como productos en los que, al menos, uno de sus componentes está formado por un polímero sintético o natural. De forma plana, como cinta o en estructura tridimensional, son usados en contacto con suelos o/y otros materiales para aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil.

La mayoría de los geotextiles están fabricados con fibras, filamentos o hilos, en base a polímeros de polipropileno o poliéster, los cuales conforman el entramado.

Existen dos tipos de geotextiles, tejidos y no tejidos, cada uno especialmente fabricado y con propiedades específicas que se ajustan a las diferentes aplicaciones dentro de cada proyecto.

Figura 2.27. Clasificación de los geotextiles



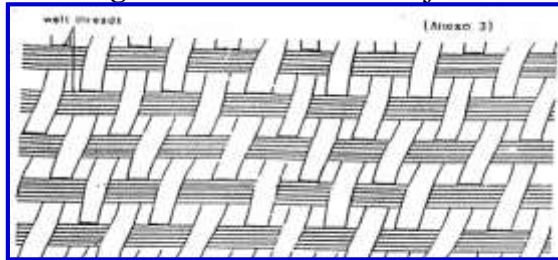
Fuente: Evaluación de la adherencia entre carpetas asfálticas, Luis Agustín Ricci

2.9.2.1. Geotextil tejido

Son aquellos formados por cintas entrecruzadas en una máquina de tejer. Están conformados mediante cintas de polipropileno en sentido de urdimbre (sentido longitudinal) y de trama (sentido transversal), mediante la ejecución de un

procedimiento textil. Es el tejido más simple y eficiente, conocido también como "uno arriba y uno abajo", dando como resultado una estructura plana.

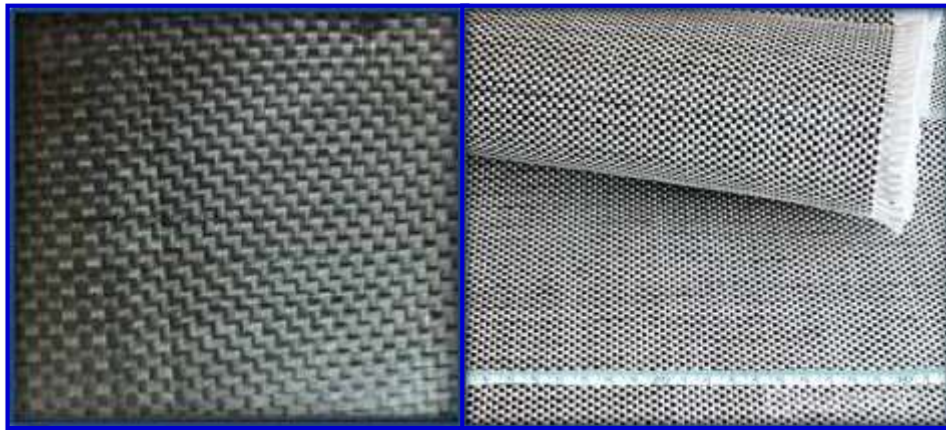
Figura 2.28. Sistema de tejido



Fuente: Rehabilitación de tramos carreteros pavimentados utilizando geotextiles no tejidos, Universidad de San Carlos, Guatemala, 2005

Su resistencia a la tracción es de tipo biaxial (en los dos sentidos de su fabricación). Gracias a su estructura y las características de las cintas empleadas, se caracterizan por tener altas resistencias y bajas deformaciones, por lo que su aplicación está orientada al refuerzo de vías, muros, terraplenes y cimentaciones.

Figura 2.29. Geotextil tejido

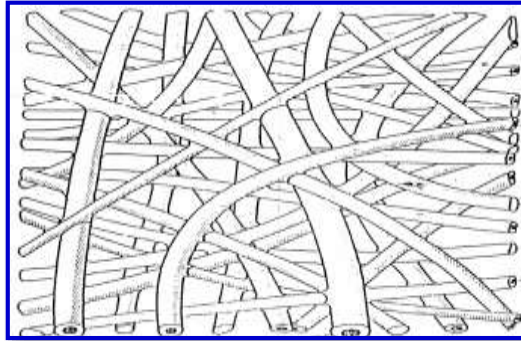


Fuente: Catálogo de productos, Proveedor TDM – Perú

2.9.2.2. Geotextil no tejido

Se forman a partir de un entrelazado de fibras o filamentos de polipropileno mezclados aleatoriamente, conformando una capa textil con altas propiedades de filtración y drenaje.

Figura 2.30. Disposición de las fibras en el geotextil



Fuente: Rehabilitación de tramos carreteros pavimentados utilizando geotextiles no tejidos, Universidad de San Carlos, Guatemala, 2005

Los geotextiles fabricados por este proceso tienen buenas características mecánicas manteniendo en parte el espesor de la napa el cual les confiere mayor estructura tridimensional, gran elongación (pueden estirarse desde un 40% hasta un 120% o más, antes de entrar en carga de rotura) lo que les proporciona muy buena adaptabilidad a las desuniformidades de los terrenos, unas excelentes propiedades para protección, (denominado efecto colchón) y muy buenas funciones de filtración y separación.¹¹

Figura 2.31. Geotextil no tejido



Fuente: http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-m2/66390-2188093.jpg

¹¹ Folleto, Geosistemas "PAVCO" de Mexichem, geotextiles tejidos y no tejidos

2.9.3. Composición y especificaciones de los geotextiles

Los polímeros usados en la elaboración de los geotextiles pueden ser de las siguientes clases de resina:

Tabla 2.9. Listado en orden de uso decreciente en geotextiles

Polímero	Porcentaje
Polipropileno	92%
Poliéster	5 %
Polietileno	2 %
Poliamida (nylon)	1 %

Fuente: Robert M. Koerner. "Designing With Geosynthetics". Quinta Edición. U.S.A.

Tabla 2.10. Características de los geotextiles no tejidos de polipropileno (PP)

Polipropileno	UD	Tolerancia	Norma	120	150	200	300	500
Gramaje	gr/m ²		UNE EN ISO 9864	120	150	200	300	500
Composición	-		-	100% fibras de polipropileno agujetadas				
Resistencia a la tracción DM	KN/m	± 15%	UNE EN ISO 10319	5,6	5,8	9,6	18,2	21,2
Resistencia a la tracción DT	KN/m	± 15%	UNE EN ISO 10319	9,5	11,1	16	23,2	31,6
Alargamiento a la rotura DM	%	± 15%	UNE EN ISO 10319	123	130	133	109	117
Alargamiento a la rotura DT	%	± 15%	UNE EN ISO 10319	97	99	122	98	79
Punzonamiento estático CBR	N	-10%	UNE EN ISO 12236	1300	1600	2700	4200	6200
Perforación dinámica	mm	± 20%	UNE EN ISO 13433	17,3	15,9	5,7	3,7	1,4
Medida de abertura	µm	± 10%	UNE EN ISO 12956	85	80	80	75	63
Permeabilidad al agua	m/s	± 10%	UNE EN ISO 11058	95x10 ⁻³	91 x10 ⁻³	68 x10 ⁻³	57 x10 ⁻³	61 x10 ⁻³
Exposición a la intemperie				a recubrir máximo en 4 meses tras la instalación				
Durabilidad				Mínimo 25 años en suelos naturales con pH [4 - 9] y Ta < 25°C				

Fuente: Geotextiles de polipropileno, Protex, Group projar, España

(Disponible en: <https://www.projar.es>)

2.10. METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS A UTILIZAR

2.10.1. Ensayos sobre la dotación óptima de ligante

En varias investigaciones se ha estudiado el comportamiento de los riegos de adherencia, analizando para ello los factores más influyentes en la variación de propiedades y efectividad de la unión entre capas de un firme.

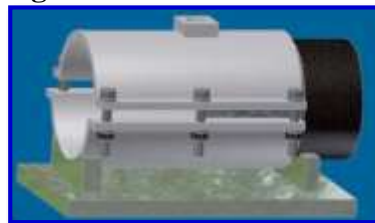
Para realizar los ensayos correspondientes al análisis de las dotaciones más adecuadas de riegos de adherencia en la presente investigación se ha utilizado como base el ensayo de corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), metodología propuesta por la Universidad de Cataluña, España.

2.10.1.1. Ensayo de corte LCB

El ensayo consiste en acoplar el aparato LCB a una máquina de ensayos estáticos que aplica una carga ligera, y que produce un desplazamiento continuo sobre una de las capas de las probetas. Dichas probetas están formadas por dos capas de mezcla asfálticas unidas entre sí por un riego de liga o adherencia. Mediante la aplicación del desplazamiento en una de las capas, quedando la otra fija, se produce la separación de éstas por la zona de unión entre ambas, superando los valores de resistencia al corte de dicha unión.

También se mide la deformación de una de las capas respecto la otra. Este ensayo permite tanto el control de la calidad alcanzada en obra mediante la rotura de testigos, como la evaluación del efecto de diferentes riegos de liga mediante la rotura de probetas fabricadas en el laboratorio.

Figura 2.32. Instrumento LCB



Fuente: Cuaderno tecnológico PTC N° 01/2014, Universidad de Cantabria, España

2.10.1.1.1. Procedimiento de ensayo

Para los ensayos de análisis de la dotación óptima de ligante en la resistencia al corte de la unión entre capas se ha utilizado el instrumento LCB. Una vez fabricadas las probetas de dos capas de mezcla bituminosa, se colocan dentro de la mordaza del instrumento de corte. Dentro de dicha mordaza se coloca una capa de las probetas, dejando la interface a unos 5 mm del borde de la mordaza, quedando a otros 5 mm de la superficie de apoyo de la otra capa de la probeta.

Una vez colocada la probeta se procede a aplicar la carga el cual garantice un desplazamiento constante. Este desplazamiento genera el movimiento de la capa colocada en el interior de la mordaza, permaneciendo inmóvil la otra, provocando la rotura de la probeta por la zona de unión. Durante el ensayo se registran los valores de la carga y del desplazamiento producido, hasta alcanzar la falla o separación de las capas.

Figura 2.33. Falla en una probeta doble capa en el plano de unión



Fuente: Estudio experimental de soluciones de construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas, Patricio A. Vargas

El análisis de cargas estará basado suponiendo que se produce un esfuerzo de corte puro y que no existe esfuerzos de flexión.

El valor de la resistencia en la adherencia estará dada por la siguiente ecuación.

$$T_c = \frac{F_{max}/2}{S}$$

Donde:

S = Superficie de la sección transversal, en mm².

Tc = Resistencia de corte en N/mm² (MPa).

Fmax = Carga máxima de rotura en, N.

2.10.2. Ensayos sobre el control de la dotación de ligante aplicado en obra

Para el control en la dotación del riego de liga aplicado en obra en esta investigación se realizará con la metodología alternativa, la cual será mediante el ensayo de absorción de ligante, para ello se utilizará el dispositivo de medición de ligante, que usa un geotextil como un material absorbente, cuyo objetivo es el de comprobar las dotaciones reales aplicadas.

2.10.2.1. Ensayo de absorción

El ensayo de absorción de ligante consiste en la utilización de un material absorbente (geotextil) del ligante usado como riego de liga, en conjunto con un instrumento diseñado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Santander, Cantabria (España), cuyo instrumento sirve para la medición en obra de la dotación de riego de liga aplicado.

2.10.2.1.1. Realización del ensayo de absorción de ligante

Una vez determinado la metodología a usar y materiales a utilizar se procederá a realizar el ensayo de absorción.

Para ello se realiza la fabricación de probetas prismáticas o losetas bituminosas, para que posteriormente se realice en las mismas, la aplicación de la dotación deseada de riego de liga.

Antes de continuar con el ensayo, se pesan todas las piezas de geotextil, para obtener su peso inicial. Posteriormente se coloca el geotextil y un material plástico impermeable en la placa de acero.

Después se extiende el riego de adherencia, y acto seguido se coloca la probeta sobre una superficie plana y nivelada para evitar que el riego de liga se escurra. Esto debe realizarse inmediatamente después de extender el riego en la superficie de la probeta.

La carga que se aplicará será de 20 kg., durante un periodo recomendado de 5 minutos, transcurrido el tiempo recomendado, se quitara la carga e inmediatamente se pesará el geotextil.

El valor de absorción de ligante o riego de liga se obtendrá mediante la diferencia de peso, entre el peso inicial del geotextil y el peso del geotextil después de realizar el ensayo. Todo el proceso del ensayo será realizado a una temperatura recomendada de 20 °C.

$$\text{Absorción} = P_f - P_i$$

Donde:

P_i = Peso inicial del geotextil, en gr.

P_f = Peso final del geotextil después del ensayo, en gr.

El valor de la diferencia de pesos del geotextil expresado en gramos, relacionado con la dotación que se aplique se obtendrá el porcentaje de absorción del geotextil.

2.10.2.1.2. Descripción del equipo utilizado

El instrumento diseñado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Santander, (España), consta de una placa de acero recubierta de geotextil sobre la que se aplica una carga vertical determinada mediante un anillo dinamométrico como se puede apreciar en la figura 2.34.

Figura 2.34. Instrumento para el control de la dotación con anillo dinamométrico



Fuente: Dto. de transportes y tecnología de proyectos ETS. Ingenieros de caminos, puentes y puertos, Santander, España.

Dicho anillo soporta una carga máxima de 50 kg, con un módulo de deformación de 55,87 kg/mm. Igualmente, para asegurar que el geotextil se amolde a posibles irregularidades de la superficie, entre la placa de acero y el mismo se ha colocado una pieza de espuma de polietileno de las mismas dimensiones de la placa de acero. Para evitar que dicha espuma pueda ensuciarse con emulsión debido a filtraciones, se ha colocado entre dicha espuma y el geotextil una capa de polímero impermeable del mismo tamaño.

El anillo dinamométrico controla la carga aplicada a través del desplazamiento producido en la compresión del mismo. Dicho desplazamiento queda reflejado en un reloj comparador incluido en el anillo.

El instrumento debe evitar la posibilidad de que el geotextil se arrugue o doble con el paso del regador móvil. Dicho instrumento puede colocarse en cualquier parte del pavimento, y así se evita el falseo de resultados que un operario en la aplicación manual del riego de adherencia pudiera provocar.

Con el fin de facilitar el uso y su construcción en la presente investigación se hará uso del instrumento modificado, descrito anteriormente, el cual consiste en la sustitución del anillo de carga por una barra de acero unida a una placa de acero de 250x250 mm en la que se coloca la carga de 3,14 kPa (la carga equivalente será de 20 kg), tal como se muestra en la figura 2.35.

Figura 2.35. Instrumento de medición modificado



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se desarrollará la etapa experimental o aplicación práctica de la investigación, el cual se llevará a cabo en dos etapas. La primera corresponde a la selección y caracterización de los materiales de aporte (agregados y cemento asfáltico), así también se realizará dosificación y caracterización de la mezcla asfáltica a utilizar para la confección de las probetas bicapa y prismáticas. La segunda etapa contemplará el diseño de las distintas probetas, para la realización de los ensayos de corte LCB* (para la determinación del rango de dotaciones óptimas) y el ensayo de absorción (para el control de la dotación de riego de liga aplicado con el sistema propuesto). Se analizará dos tipos de ligantes, de curado rápido y de curado medio.

Del ensayo de corte se seleccionará las tasas de riego más adecuadas que garanticen una alta adherencia entre capas, estas tasas de ligante se utilizará para los ensayos de medición del ligante aplicado, mediante el ensayo de absorción, con el uso del instrumento desarrollado en la “Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Santander, (España)”, planteando con ello una metodología alternativa de medición del riego de adherencia aplicado.

3.2. MATERIALES DE APORTE

Los materiales a ser usados en el presente trabajo deberán cumplir con las especificaciones de las normas ASTM y AASHTO. Para realizar los diferentes ensayos de laboratorio necesarios para elaborar el presente proyecto se hará uso de materiales existentes en el departamento de Tarija, los mismos que se ajustan dentro de las normativas vigentes.

* Metodología de planteada por la Universidad de Cataluña, España, del Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB)

3.2.1. Agregados pétreos

El material pétreo a ser usado en este proyecto, se encuentra ubicada en la comunidad de San Mateo desemboque de rio Sella km. 6, donde se encuentra la planta de áridos (chancadora) “Garzón”.

Figura 3.1. Ubicación de la planta de áridos “Garzón”



Fuente: Google earth

Figura 3.2. Chancadora para la provisión de material




Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Cemento asfáltico

El betún como ligante asfáltico C.A. (85 – 100) con nombre Betunel proveniente del Brasil, fue proporcionado por la Alcaldía Municipal de Tarija.

Figura 3.3. Especificaciones del cemento asfáltico

 BETUNEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA					
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Formulario C-1 (Llenado por la Entidad) - ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE CALIDAD DEL MATERIAL SOLICITADO (ENSAYOS AASHTO)	LIMITES	MÉTODO	REPRODUCIBILIDAD (*)	ENCONTRADAS	
Penetración a 25 °C, 100 gr, 6,1 mm (T – 201)	85 a 100	NBR-6576 / ASTM D5 / AASHTO T201	± 4 dmm	91	
Viscosidad Saybolt Furl a 135 °C seg. (T – 72)	85 min.	NBR-14950 / ASTM D88 / AASHTO T72	± 2%	120	
Ensayo de la Mancha @20% Xilol (T -102)	Negativo	- / ASTM D2170 / AASHTO T102	ND	negativo	
Punto de Ablandamiento °C (T – 53)	43 a 46	NBR-6560 / ASTM D06 / AASHTO T53	± 3°C	45	
Ductilidad a 25 °C 5 cm/min, cm (T – 51)	100 min.	NBR-6293 / ASTM D113 / AASHTO T51	consultar NBR	> 100	
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 135°C, cP	214 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T318	ND	290	
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 150°C, cP	97 min.	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T318	ND	152	
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177°C, cP	28 a 114	NBR-15184 / ASTM D4402 / AASHTO T318	ND	58	
TEMPERATURA DE MISTURA, °C (°) (°°)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	141 a 147	
TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO, °C (°) (°°)	INDICATIVO	CÁLCULO	ND	130 a 136	
Índice de Penetración de Pflöfer	-1,5 a 0,5	CÁLCULO / CÁLCULO	ND	-1,1	
Punto de Inflamación C.O.C. °C (T – 48)	230 min.	NBR-11341 / ASTM D82 / AASHTO T48	± 18°C	> 235	
Solubilidad en Tricloroetileno (T-44)	99 min.	NBR-14855 / ASTM D0042 / AASHTO T44	± 0,20%	99,9	
Densidad a 25 °C a 25 °C (T – 228)	0,99 min.	NBR-6296 / AASHTO T228	± 0,005	1,012	
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO PELICULA DELGADA (TFOT), 32 min, 163°C (AASHTO T240)					
(R)TFOT - Pérdida de Masa (T - 240)	1 máx.	NBR-15225 / ASTM D2672 / AASHTO T240	consultar NBR	0,41	
(R)TFOT - Penetración del Residuo, % de la penetración origi	50 min.	CÁLCULO	ND	55	
(R)TFOT - Pérdida por Calentamiento (T-179), %	1 máx.	CÁLCULO / AASHTO T-179	± 4 dmm	0,42	
Densidad a 25 °C a 25 °C (T – 228)	1 a 1,05	NBR-6296 / AASHTO T228	± 0,005	1	

Fuente: Elaboración propia

Estos materiales a utilizar serán analizados en Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, los cuales serán descritos a continuación.

3.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.3.1. Caracterización de los agregados

3.3.1.1. Análisis granulométrico de los agregados (Documento referencial ASTM E40 C136 AASHTO T27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Objetivo

Tiene por objetivo obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar y graficar su respectiva curva granulométrica para establecer la distribución de tamaños de los agregados, los cuales deben estar dentro de las especificaciones establecidas.

Figura 3.4. Materiales para ser analizados



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5. Tamizado mediante los tamices normalizados ASTM



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

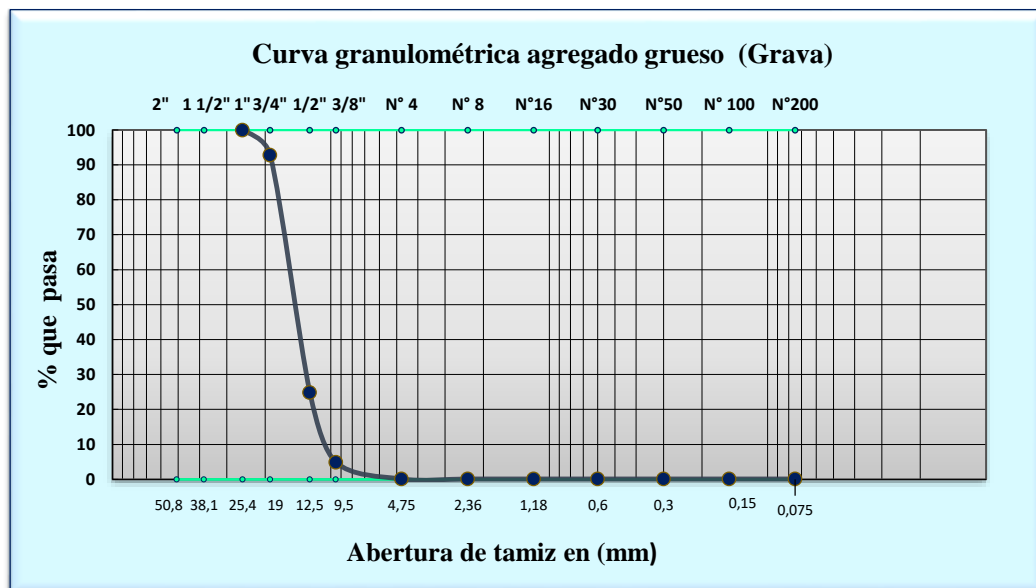
Granulometría agregado grueso (grava)

Tabla 3.1. Resultados de la granulometría del agregado grueso (grava)

Peso total (gr.)		5000,8
Tamices	Tamaño (mm)	% que pasa del total
1"	25,4	100,00
3/4"	19,0	92,81
1/2"	12,5	24,91
3/8"	9,50	4,96
Nº4	4,75	0,12
Nº8	2,36	0,12
Nº16	1,18	0,12
Nº30	0,60	0,12
Nº50	0,30	0,12
Nº100	0,15	0,12
Nº200	0,075	0,12
Base	-	0,05

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Curva granulométrica del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

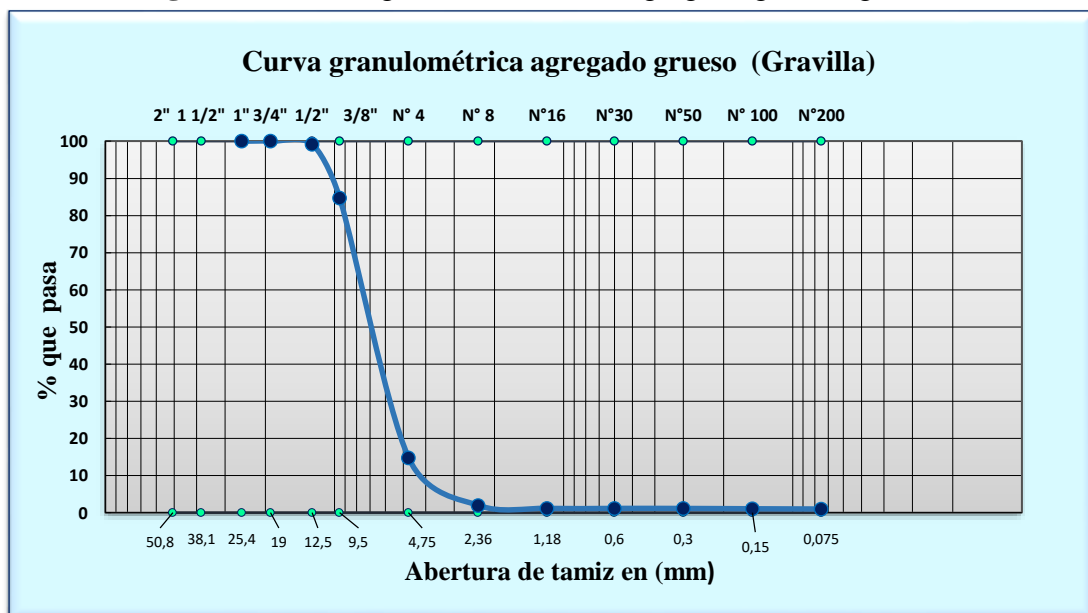
Granulometría agregado grueso (gravilla)

Tabla 3.2. Resultados del análisis granulométrico de la gravilla

Peso total (gr.)		5000,3
Tamices	Tamaño (mm)	% que pasa del total
1"	25,4	100,00
3/4"	19,0	100,00
1/2"	12,5	99,16
3/8"	9,50	84,71
N°4	4,75	14,72
N°8	2,36	1,95
N°16	1,18	1,14
N°30	0,60	1,14
N°50	0,30	1,13
N°100	0,15	1,04
N°200	0,075	0,97
Base	-	0,05

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Curva granulométrica del agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

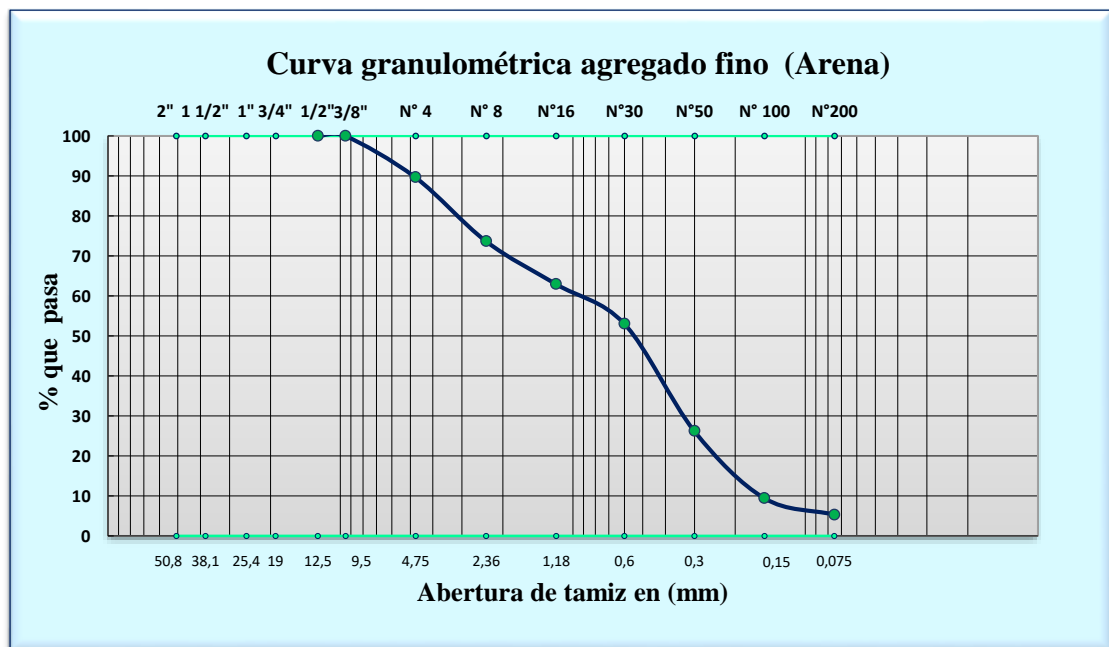
Granulometría agregado fino (arena)

Tabla 3.3. Resultados del análisis granulométrico del agregado fino

Peso total (gr.)		5000,4
Tamices	Tamaño (mm)	% que pasa del total
1/2	12,5	100,00
3/8	9,50	100,00
N°4	4,75	89,64
N°8	2,36	73,67
N°16	1,18	62,96
N°30	0,60	53,03
N°50	0,30	26,21
N°100	0,15	9,44
N°200	0,075	5,31
Base	-	0,05

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Peso específico y absorción del agregado grueso (Documento referencial ASTM C127, AASHTO T85)

Este método de ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico a “granel” y el peso específico aparente, y el porcentaje de absorción del agregado grueso

Resumen del método

Se sumergirá el material retenido en el tamiz N° 4 con la cantidad especificada durante 24 horas, después del periodo de inmersión se secará la muestra con un paño con el fin de eliminar el agua superficial, se pesará y se asignará como B, se vuelve a sumergir y se determina el peso sumergido, se designará como C.

Se seca entonces la muestra en horno a una temperatura de 110°C, y se determina el peso seco, designado como A, con cuyos datos se realizará el cálculo del peso específico.

Figura 3.9. Muestra sumergida por 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10. Muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Obtención del peso sumergido de la muestra

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo**Peso específico agregado grueso (grava)****Tabla 3.4.** Resultados del peso específico del agregado grueso (grava)

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,59	2,63	2,68	1,25

Fuente: Elaboración propia

Peso específico agregado grueso (gravilla)**Tabla 3.5.** Resultados de peso específico del agregado grueso (gravilla)

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,56	2,61	2,71	2,09

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C128, AASHTO T84)

Este método tiene como objetivo determinar el peso específico aparente y peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino.

Resumen del método

Se pesa aproximadamente 1000 gr. de material, y se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, transcurrido ese tiempo se seca el material hasta alcanzar la condición de saturado con superficie seca, el cual se verifica cuando el material se desmorona al quitar el cono en el que la muestra fue colocada y compactada. De esta condición se extrae 500gr de muestra y se coloca en un matraz que se llena con agua y es pesado, luego la misma se seca al horno, y se determina el peso seco.

Figura 3.12. Material sumergido por un tiempo de 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13. Verificación de la condición de saturado con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14. Determinación del peso sumergido

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo**Tabla 3.6.** Resultados del peso específico del agregado fino (arena)

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,76	2,80	2,87	1,32

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Peso unitario de los agregados gruesos y finos (ASTM C 29M-97, AASHTO T-27)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados gruesos y finos.

Resumen del método

En este ensayo se realizará para peso suelto y compactado, el peso suelto se determina llenando el recipiente con el agregado hasta rebosar, se enrasa el excedente y se pesa. Para el peso compactado se realiza en tres capas, para ello se llena la tercera parte del recipiente con el agregado, se apisona con una barra metálica, mediante 25 golpes, esto se realiza con las dos capas faltantes. Finalmente, se llena el recipiente con la última capa hasta rebosar se compacta con 25 golpes y se enrasa el excedente y se procede a pesar determinando con ello el peso unitario compactado.

Figura 3.15. Peso unitario del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Peso unitario del agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Peso unitario del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Peso unitario de agregado grueso (grava)

Tabla 3.7. Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (grava)

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,38	1,51

Fuente: Elaboración propia

Peso unitario de agregado grueso (gravilla)

Tabla 3.8. Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (gravilla)

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,45	1,57

Fuente: Elaboración propia

Peso unitario de agregado fino (arena)

Tabla 3.9. Peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena)

Peso unitario suelto (gr/cm³)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1,67	1,85

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5. Equivalente de arena (ASTM D2419, AASHTO T176)

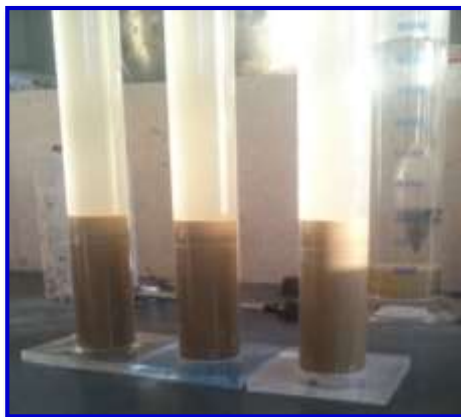
Este método establece un procedimiento rápido para determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

Resumen del método

Se vierte en la probeta de ensayo, la solución química hasta una altura de 4 pulg, luego se vierte en la misma aproximadamente 150 gr de material preparado, y se deja reposar por 10 min, transcurrido ese tiempo se agita la probeta en forma horizontal durante 30 segundos para alcanzar en ese intervalo de tiempo 90 ciclos. A continuación se coloca el irrigador dentro de a probeta y se procede a llenar con la solución química hasta alcanzar un la altura aproximada de 38 cm. Se dejará reposar por un tiempo de 20 min,

al término de ese tiempo se procederá a leer el nivel superior de la suspensión de arcilla (lectura de arcilla), y el nivel de arena (lectura de arena) con el dispositivo que consta de un disco, varilla y sobrepeso.

Figura 3.18. Muestra de arena consolidada en la solución química



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19. Medición del nivel de arena



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.10. Resultados de equivalencia de arena

Equivalente de arena (%)	Norma
89,56	>50%

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.6. Ensayo de desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles (ASTM C131, AASHTO T96)

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

Resumen del método

Se tamizara el material de acuerdo a la Tabla 3.11., y se mezclaran las cantidades de acuerdo al método indicado. La muestra preparada se introducirá a la máquina de los ángeles junto a con las esferas de metálicas, se asegurara la máquina y se procederá a dar 500 revoluciones. Finalizado el tiempo de rotación se saca el material y se tamiza en la malla N°12, el material retenido se lava y se seca al horno a una temperatura constante de 110 ° C, luego se pesa la muestra seca.

Figura 3.20. Material seleccionado para el ensayo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Material pétreo y esferas de acero dentro de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Peso del agregado y número de esferas para agregados gruesos

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

Fuente: Norma ASTM, C131.

Resultados del ensayo**Tabla 3.12.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (grava)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Max
B	5000,4	3667,4	26,66	35% Max
C				35% Max
D				35% Max

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A				35% Max
B				35% Max
C	5000,2	3695,6	26,09	35% Max
D				35% Max

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.7. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D5821-95)

Este ensayo determina el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de la muestra del agregado grueso.

Resumen del método

Se separa una muestra representativa del agregado, el material estará comprendida entre los tamices (1½" y 3/8"). Se esparce la muestra en un área plana, en el cual se inspecciona y se separa la las partículas que tengan una o más caras fracturadas, entonces se determinara sus correspondientes pesos.

Figura 3.22. Separación de caras fracturas del agregado



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de caras fracturadas

Ensayo N°	1	2	3	
Peso inicial (gr)	1000,20	1000,60	1000,30	
Peso fracturadas [F] (gr)	744,50	804,50	797,30	
Peso cuestionables [Q] (gr)	101,20	103,10	102,60	
Peso no fracturadas [N] (gr)	154,50	93,00	100,40	
% caras fracturadas	$P = \left[\frac{F + Q/2}{F + Q + N} \right] \times 100$	79,49	85,55	84,83
Promedio (%)	83,29			

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.8. Método para determinar el índice de lajas (AASHTO C-142)

Este ensayo establece el procedimiento para determinar el índice de lajas de un árido, se define el índice de lajas como el porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor (dimensión mínima) inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de árido considerada.

Resumen del método

- ❖ Obtener por cuarteo una cantidad mínima de ensaye.
- ❖ Hacer pasar cada una de las partículas a través de las aberturas de los tamices.
- ❖ Pesar el total de partículas que pasan por cada tamiz y registre como MP_i
- ❖ Calcule el índice de lajas de cada fracción i (IL_i), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$IL_i = \frac{MP_i}{MT_i} * 100$$

Donde:

IL_i = Índice de lajas de la fracción i (%).

MP_i = Masa de material que pasa por la abertura del pie de metro para fracción i (gr).

MT_i = Masa total de ensaye.

Figura 3.23. Determinación del porcentaje de lajas



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de índice de lajas

Tamaño del tamiz abertura	Ancho de ranura de tamiz	Peso retenido en tamiz ranurado	Peso que pasa tamiz ranurado	Peso total	Índice de lajas
plg.	plg.	gr	gr	gr	%
3/4-1/2	0,375	1098,90	97,30	1196,20	3,21
1/2-3/8	0,273	798,50	62,10	860,60	2,10
3/8-1/4	0,184	887,70	53,60	941,30	1,82
Total		2785,10	213,00	2998,10	7,13

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.9. Método de los sulfatos para determinar la durabilidad del agregado grueso y fino (ASTM E88, AASHTO T104-99)

Objetivo

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración y resistencia de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Resumen del método

Cada fracción de material retenido en los tamices 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, será sumergido en la solución de sulfato de sodio o magnesio por un periodo de 16 a 18 horas, en recipientes separados para cada fracción. Transcurrido el tiempo se secará la muestra y se obtendrá el peso, luego se volverá a sumergir en la solución de sulfato, para continuar con los ciclos que se especifiquen.

Finalizado los ciclos se lavan las muestras hasta eliminar los sulfatos, y se secará en horno a una temperatura constante de 110 °C y se determinará el peso.

Figura 3.24. Fracción de material retenido en los diferentes tamices



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25. Preparación de la solución de sulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26. Inmersión de la muestra en el sulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Durabilidad a los sulfatos del agregado grueso

Tabla 3.16. Resultados de la durabilidad a los sulfatos del agregado grueso

Análisis del agregado grueso (grava, gravilla)							
Tamiz		Peso inicial	Peso final	Pérdidas peso		% retenido de la granulometría inicial	Pérdidas corregidas
Pasa	Retiene	gr	gr	gr	%	%	%
1"	3/4"	500,20	499,60	0,60	0,12	7,20	0,01
3/4"	1/2"	503,10	501,00	2,10	0,42	75,10	0,31
1/2"	3/8"	301,30	299,90	1,40	0,46	95,00	0,44
3/8"	N° 4	100,30	99,70	0,60	0,60	99,90	0,59
Pérdidas totales					1,60		1,36

Fuente: Elaboración propia

Durabilidad a los sulfatos del agregado fino

Tabla 3.17. Resultados de la durabilidad a los sulfatos del agregado fino

Análisis del agregado fino (arena)							
Tamiz		Peso inicial	Peso final	Pérdidas peso		% retenido de la granulometría inicial	Pérdidas corregidas
Pasa	Retiene	gr	gr	gr	%	%	%
3/8"	N° 4	100,30	99,70	0,60	0,60	85,3	0,51
	N° 4	100,20	99,50	0,70	0,70	98,1	0,69
	N° 8	100,00	98,80	1,20	1,20	98,9	1,19
	N° 16	100,10	98,60	1,50	1,50	98,9	1,48
	N° 30	100,00	99,10	0,90	0,90	98,9	0,89
Pérdidas totales					4,90		4,75

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Caracterización del cemento asfáltico

3.3.2.1. Ensayo de penetración de materiales bituminosos (Documento referencial ASTM D5, AASHTO T49-97)

Este ensayo determina la dureza o consistencia relativa, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente a una muestra de asfalto a condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo. Si no se mencionan específicamente otras condiciones, se determina la penetración normal a 25° C.

Resumen del método

Se fundirá la muestra y se enfriará la muestra en un baño hasta una temperatura determinada, la penetración será realizada con una aguja cargada con 100g y la carga se aplica durante 5 segundos. La unidad de penetración es la décima de milímetro.

Figura 3.27. Realización de la penetración de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de penetración

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
93,3	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos (ASTM D113, AASHTO T51-00)

Este método de ensayo determina la ductilidad de un asfalto como la longitud, medida en cm., a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas.

A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%.

Resumen del método

Se calentará la muestra y se verterá en el molde hasta llenarlo, luego se dejara enfriar hasta la temperatura especificada, una vez enfriado se procederá a enrazar con el fin de quitar el material excedente del molde. La ductilidad será la medida en centímetros de la distancia a la cual se alargara antes de romper cuando se tira de un extremo del espécimen a una velocidad constante especificada.

Figura 3.28. Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.19. Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
112,7 cm	100 cm	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3. Ensayo de punto de inflamación mediante el vaso abierto de Cleveland (ASTM D22, AASHTO T48)

Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, creando un destello en presencia de una llama abierta.

Resumen del método

El vaso del ensayo se llena hasta un nivel especificado con la muestra. La temperatura de la muestra es aumentada rápidamente al principio y entonces a una proporción lenta constante a medida que el punto de destello se aproxima, en intervalos especificados una llama pequeña se pasará por encima del vaso. Para determinar el punto de inflamación, se continúa con el ensayo hasta que la aplicación de la llama ocasiona que el aceite se incendie y se queme durante por lo menos 5 segundos.

Figura 3.29. Realización del ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.20. Resultados del ensayo de punto de inflamación

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
284 °C	230 °C	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4. Ensayo de viscosidad cinemática (ASTM D2170, AASHTOT201-01)

Este método de ensayo tiene como finalidad determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación.

Resumen del método

La viscosidad se mide en el ensayo de viscosidad cinemática. El cual se basa en la medida del tiempo necesario para que fluya un volumen constante de material bajo condiciones de ensayo, como temperatura y altura del líquido, rígidamente controladas. Los asfaltos presentan un amplio rango de viscosidades, siendo necesario disponer de diversos viscosímetros que difieren en el tamaño del capilar.

Figura 3.30. Realización del ensayo de viscosidad



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.21. Resultados del ensayo de viscosidad

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
325	170	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.5. Ensayo para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D36-89, AASHTO T53-92)

El punto de ablandamiento es otra medida de consistencia y se determina usualmente con el aparato del anillo y bola. Se establece entonces un punto de ablandamiento, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado y fluidez.

Resumen del método

Este ensayo consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de dimensiones normalizadas, para luego dejar enfriar a la temperatura ambiente por cuatro horas. Sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso específicos. Una vez lista, se suspende la muestra sobre un baño de agua y se calienta el baño de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura es el punto de ablandamiento.

Figura 3.31. Realización del ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.22. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
45 °C	43 °C	53 °C

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.6. Ensayo para determinar la gravedad específica (ASTM D70-76, AASHTO T228-93)

Objetivo de ensayo

Este método de ensayo describe los procedimientos que deben seguirse para la determinación de la gravedad específica o densidad relativa de los materiales bituminosos de consistencia sólida, semisólida o líquida.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas.

Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro.

Calcule la gravedad específica al tercer decimal más cercano como sigue:

$$G = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

A = Masa del picnómetro (más el tapón), en gr.

B = Masa del picnómetro lleno con agua, en gr.

C = Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto, e gr.

D = Masa del picnómetro más el asfalto más agua, en gr.

Figura 3.32. Picnómetros utilizados para determinar el peso específico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33. Determinación del peso del picnómetro + C.A. + agua



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Tabla 3.23. Resultados del ensayo de gravedad específica

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
1,012	1	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.4. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

La mezcla asfáltica que se utilizará será una mezcla asfáltica densa elaborada en caliente. La misma que se construirán siguiendo el método Marshall, dicho método esta descrito a continuación.

3.4.1. Diseño de la mezcla asfáltica siguiendo el método Marshall

El método Marshall, sólo se aplica a mezclas asfálticas elaboradas en caliente, de pavimentación, también usa muestras normalizadas de pruebas (probetas o briquetas) de 63,5mm (2.5in) de espesor por 101,6mm (4in) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes tipos de asfaltos, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas

del método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.¹²

3.4.2. Procedimiento para la realización del diseño Marshall de la mezcla asfáltica

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente para calcular en contenido óptimo de cemento asfáltico, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2,54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101,6 mm (4 pulg.).

3.4.2.1. Descripción de los instrumentos utilizados

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

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

Extractor de muestras de asfaltos: Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm y 12,7 mm (1/2") de espesor.

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

¹² Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfálticas en caliente, Serie de manuales No. 22 (MS-22), Asphalt Institute, 1982. Pag. 70

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

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

Prensa: Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50,8 mm/min.

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

Discos de Papel Filtrante: De 4 pulg., colocada en la base interior del molde para evitar que la mezcla se adhiera a la base del molde.

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

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

Recipientes: Para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

Tamices: 25 mm (1"), 19,0 mm (3/4"), 12,5 mm (1/2"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (N° 4), 2,36 mm (N° 8), 1,18 mm (N° 16), 0,60 mm (N° 30), 0,3 mm (N° 50), 0,15 mm (N° 100) y 0,075 mm (N° 200).

Termómetros blindados: De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0.2°C (68°F a 158°F + 0.4°F).

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

3.4.2.2. Preparación de la mezcla asfáltica (construcción de las briquetas)

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- ❖ El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- ❖ Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- ❖ Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75 golpes) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briketa reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

3.4.3. Gradación de los agregados para el diseño de mezclas asfálticas densas siguiendo el método Marshall

Para la elaboración de una mezcla densa o cerrada, la granulometría de las distintas fracciones de árido constituyentes de la mezcla (incluyendo el filler de aporte) deben estar comprendidas en función de dos parámetros: El tamaño máximo nominal del agregado y el de las franjas granulométricas de control (superior e inferior). Estas franjas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

Tabla 3.24. Graduación de los agregados y franjas granulométricas de control para mezclas asfálticas densas

Tamiz	Mezcla densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; fino y filler) si se requiere Porcentaje en peso									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37,5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25,0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19,0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½" (12,5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9,5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4,75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2,36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1,18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: Secretaria de comunicaciones y transportes (SCT), Instituto Mexicano del transporte, 2004

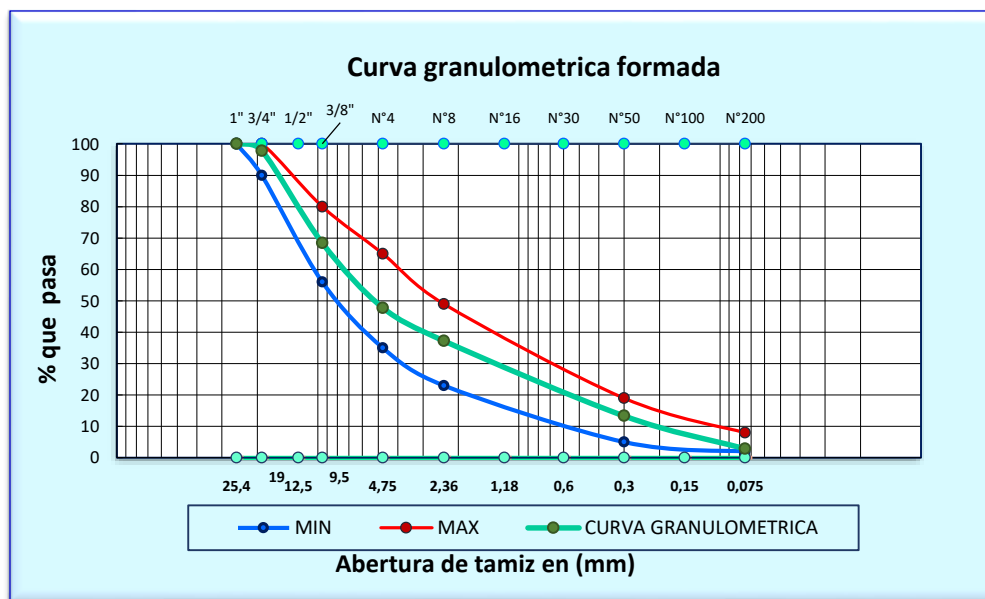
En base a los parámetros de granulometría exigidos en la tabla 3.24., con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de agregados (grava, gravilla, arena) para cumplir con los requisitos planteadas, ya que casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con estos requisitos granulométricos.

Tabla 3.25. Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas

Tamiz	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	Total peso ret 1	Ret. acum. (gr)	% Retenido	% que pasa del total	Especificaciones	
		Peso ret. a 5000 (gr)	Peso ret. a 5000 (gr)	Peso ret. a 5000 (gr)	al 0,3 %	al 0,2 %	al 0,5 %					Min	Max
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,0	100,00	100,00	100,00
3/4"	19	359,60	0,00	0,00	107,88	0,00	0,00	107,88	107,88	2,2	97,84	90,00	100,00
1/2"	12,50	3395,50	42,20	0,00	1018,65	8,44	0,00	1027,09	1134,97	22,7	77,30		
3/8"	9,50	997,80	722,20	0,00	299,34	144,44	0,00	443,78	1578,75	31,6	68,43	56,00	80,00
N°4	4,75	242,10	3499,70	517,90	72,63	699,94	258,95	1031,52	2610,27	52,2	47,79	35,00	65,00
N°8	2,36	0,00	638,50	798,80	0,00	127,70	399,40	527,10	3137,37	62,7	37,25	23,00	49,00
N°16	1,18	0,00	40,50	535,50	0,00	8,10	267,75	275,85	3413,22	68,3	31,74		
N°30	0,60	0,00	0,10	496,50	0,00	0,02	248,25	248,27	3661,49	73,2	26,77		
N°50	0,30	0,00	0,60	1341,20	0,00	0,12	670,60	670,72	4332,21	86,6	13,36	5,00	19,00
N°100	0,15	0,00	4,60	838,70	0,00	0,92	419,35	420,27	4752,48	95,0	4,95		
N°200	0,075	0,00	3,20	206,10	0,00	0,64	103,05	103,69	4856,17	97,1	2,88	2,00	8,00
Base	-	3,50	46,20	263,20	1,05	9,24	131,60	141,89	4998,06	100,0	0,04		
Suma		4998,50	4997,80	4997,90	1499,55	999,56	2498,95	4998,06					
Pérdidas		1,50	2,20	2,10									

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34. Curva granulométrica formada y fajas de control



Fuente: Elaboración propia

3.5. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO REALIZADO EN LABORATORIO

3.5.1. Dosificación de la mezcla en función a la cantidad de cemento asfáltico

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizara el análisis de 5 porcentajes de asfalto con incrementos de 0,5%, para la mezcla con los agregados. Para ello se elaboraran 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto.

La experiencia ha demostrado que las mezclas de agregados y cemento asfáltico de 1200 gramos de peso, permiten obtener muestras compactadas de $2,5 \pm 0,01$ pulgadas de altura. Por lo tanto para elaborar cada probeta se mezclarán las cantidades necesarias de cada fracción de agregado y asfalto para alcanzar dicho peso.

Tabla 3.26. Cantidad de agregados y cemento asfáltico para la preparación de la mezcla

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de agregado (%)	95,5%	95,0%	94,5%	94,0%	93,5%
Peso de grava (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de gravilla (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40
Peso de arena (gr)	573,00	570,00	567,00	564,00	561,00
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso total de la briketa (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinada las cantidades necesarias de agregado para cada porcentaje de cemento asfáltico se procede a realizar la mezcla como se indica a continuación:

En una bandeja deberá colocarse la cantidad indicada de cada fracción de agregado a una temperatura especificada (de 110 a 120 °C), seguidamente se añade la cantidad calculada de cemento asfáltico previamente calentada a una temperatura especificada, hasta completar el peso total de una briketa para un porcentaje determinado.

Seguidamente se realiza el mezclado hasta obtener una mezcla homogénea, a una temperatura no inferior de 140°C.

Figura 3.35. Colocación de cantidades de agregados y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.36. Mezcla preparada



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1. Proceso de compactación de las muestras

Para la compactación, primeramente se calienta los moldes colocándolos en un horno de 100 a 150 °C por unos 30 minutos. Una vez retiradas los moldes del horno se vierte la mezcla en los moldes Marshall, en tres capas, dando ciertas varilladas para el acomodo de la mezcla y se procede a la compactación dando 75 golpes con el martillo, en la cara superior, luego se le da la vuelta y se aplica otros 75 golpes, dando como resultado un total de 150 golpes.

Figura 3.37. Martillo para compactación



Fuente: Elaboración propia

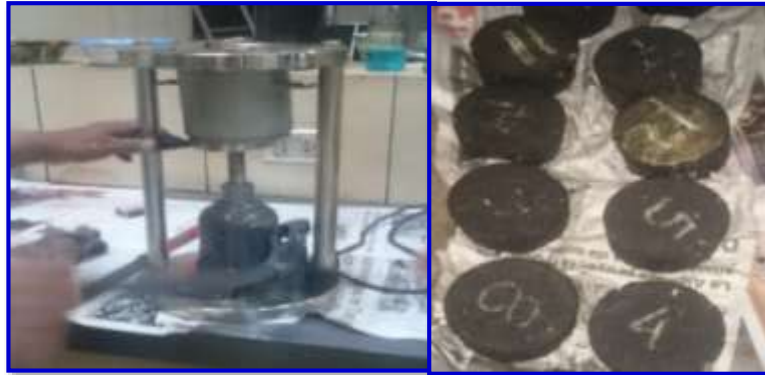
Figura 3.38. Compactación de la muestra, dando 75 golpes por cara



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la compactación, se deja reposar el espécimen por un tiempo aproximado de 1 a 2 horas, para luego ser extraídas del molde.

Figura 3.39. Extracción de las briquetas de los moldes



Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Caracterización de las mezclas compactas para la determinación del contenido óptimo de asfalto

La máquina de ensayo Marshall, está diseñada para aplicar cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de un anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para ensayo de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo.

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de 4 alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

Figura 3.40. Determinación de las dimensiones de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.1. Determinación de la densidad de los especímenes

Para la determinación de la densidad, se determina la masa en el aire del espécimen compactado (W_s), enseguida se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 3 minutos una temperatura de 25°C , y se determina la masa en el agua (W_h), se saca del agua, se seca con la ayuda de una toalla, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seco (W_{sss}), y se determina la masa para esta condición.

Figura 3.41. Determinación del peso de la briqueta en estado seco



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42. Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.43. Determinación del peso saturado superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. Determinación de la Estabilidad y Fluencia

Antes del ensayo para determinar la estabilidad y fluencia, se sumerge las briquetas en baño de agua a $60\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ ($140 \pm 1.8\text{ °F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos. Transcurrido el tiempo se retiran del baño de agua, se secan y se colocan a entre las mordazas del equipo para la aplicación de la carga y determinar la estabilidad y la fluencia de cada briqueta.

Figura 3.44. Briquetas sumergidas en baño maría a 60 °C



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.45. Determinación de la estabilidad y fluencia de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo Marshall

Tabla 3.27. Pesos específicos de los materiales

Pesos específicos			
	Material	P.E. (gr/cm ³)	%
Agregados	Grava	2,68	30
	Gravilla	2,71	20
	Arena	2,87	50
	Filler	0	0
C.A. Betunel 85-100	Numero de golpes 75		
	P.E. Cemento asfaltico (gr/cm ³)	1,012	
Peso específico total			
		P.E. (gr/cm ³)	% de agregado
	Mat retenido tamiz N° 4	2,695	50
	Mat. pasa tamiz N° 4	2,87	50
	Peso específico total	2,78	100

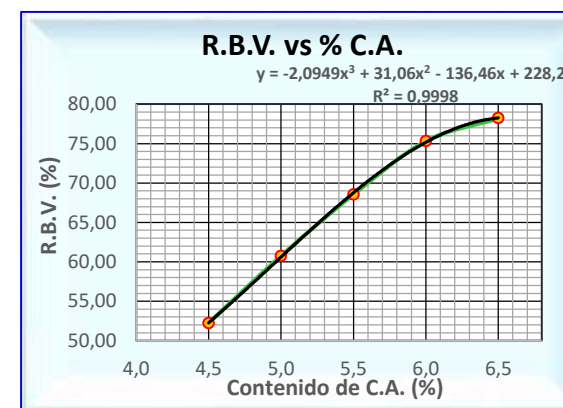
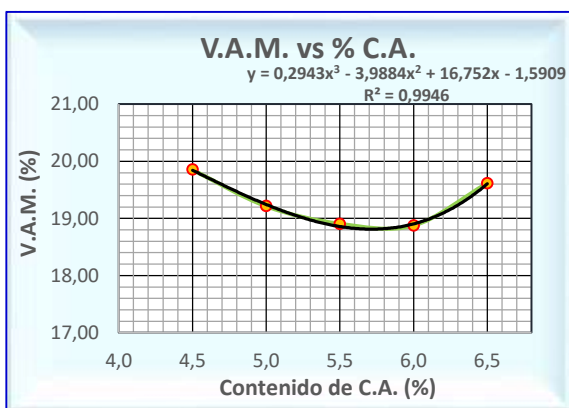
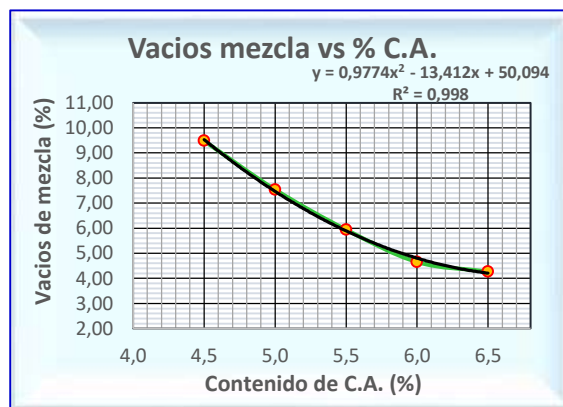
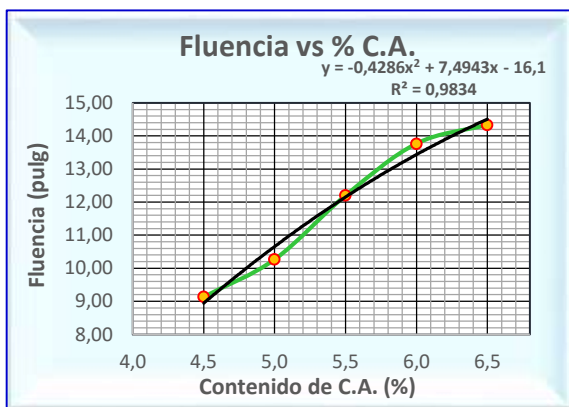
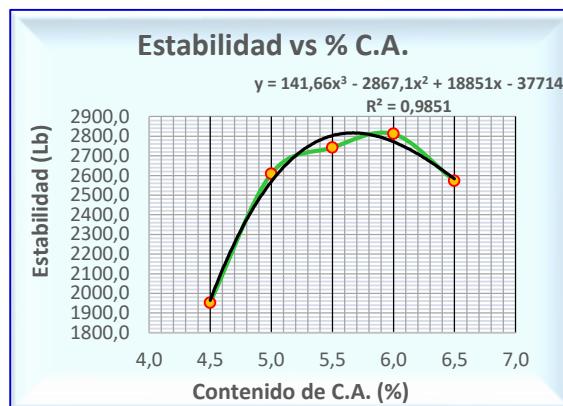
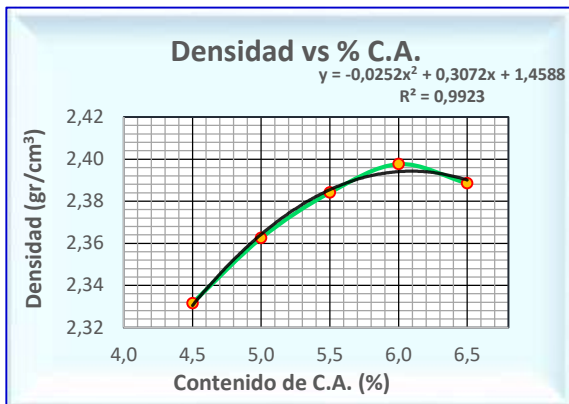
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28. Resultados obtenidos del ensayo por el método Marshall

Ensayo realizado por el método Marshall																				
N° probeta	Altura de probeta	% de asfalto		Peso briqueta		Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia			
		Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación bitumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura del dial	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	0,01 pulg
1	6,45	4,50	4,71	1201,1	1202,5	687	515,5	2,33	2,33	2,58	9,48	19,85	52,22	726	1936,8	0,975	1888,3	1953,4	8,00	9,13
2	6,54			1194,2	1205,4	701	504,4	2,37						689	1837,1	0,954	1753,3		10,00	
3	6,51			1169,7	1171,2	662	509,2	2,30						865	2311,1	0,960	2218,6		9,40	
4	6,53	5,00	5,26	1194,7	1195,2	687	508,2	2,35	2,36	2,56	7,54	19,21	60,75	1037,5	2775,6	0,956	2654,3	2608,5	9,80	10,27
5	6,48			1201,1	1201,6	698	503,6	2,39						1001	2677,3	0,968	2590,3		10,00	
6	6,54			1173,9	1174,2	675	499,2	2,35						1011	2704,2	0,954	2580,9		11,00	
7	6,61	5,50	5,82	1179,0	1181,2	686	495,2	2,38	2,38	2,53	5,95	18,90	68,54	997	2666,5	0,941	2510,0	2743,0	13,00	12,20
8	6,52			1183,7	1184,4	688	496,4	2,38						1008	2696,1	0,958	2583,2		10,00	
9	6,40			1189,4	1190,3	692	498,3	2,39						1186	3175,4	0,988	3135,7		13,60	
10	6,51	6,00	6,38	1186,6	1188,3	701	487,3	2,44	2,40	2,51	4,66	18,87	75,32	1111	2973,5	0,960	2854,5	2811,9	15,20	13,77
11	6,47			1185,7	1186,9	689	497,9	2,38						1095	2930,4	0,970	2842,5		14,00	
12	6,60			1185,4	1185,8	687	498,8	2,38						1085	2903,5	0,943	2738,5		12,10	
13	6,53	6,50	6,95	1175,2	1172,5	685	486,7	2,41	2,39	2,50	4,27	19,61	78,22	1029	2752,7	0,956	2632,4	2572,7	13,20	14,33
14	6,61			1189,6	1190,3	691	499,3	2,38						998	2669,2	0,941	2512,5		16,20	
15	6,55			1186,3	1186,9	686	500,9	2,37						1010	2701,5	0,953	2573,2		13,60	
Especificaciones				Mínimo							3	13	75					1800 lb		8
				Máximo							5	-	82					-		14

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.46. Gráficas del método Marshall para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.3. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

Tabla 3.29. Resumen de resultados para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libras)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,33	1953,43	9,13	9,48	52,22	19,85
5,0	2,36	2608,47	10,27	7,54	60,75	19,21
5,5	2,38	2742,96	12,20	5,95	68,54	18,90
6,0	2,40	2811,86	13,77	4,66	75,32	18,87
6,5	2,39	2572,69	14,33	4,27	78,22	19,61
Obtenido del gráfico	2,40	2799,87	11,00	4,09	75,05	18,81
Porcentaje de cemento asfáltico para cada valor (%)	6,10	5,47	5,11	6,80	5,99	5,70
Promedio final (%)	5,93					

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos de densidad, estabilidad, fluencia, % de vacíos, relación de betún-vacíos y vacíos de agregado mineral, se realizó los diagramas de cada uno de ellos con relación al porcentaje de cemento asfáltico, de los cuales se obtienen valores que se utilizarán para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico con el que se trabajará para esta investigación será igual al 5,93 %.

3.6. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ASFALTOS LÍQUIDOS O CORTADOS A UTILIZAR COMO RIEGO DE LIGA

En esta investigación se estudiarán dos tipos de asfalto líquido utilizados como riego de liga, estos son asfalto líquido o rebajado de curado rápido (RC) y el asfalto líquido de curado medio (MC), los cuales tienen como solvente a la gasolina del primero y kerosene del segundo.

Tabla 3.30. Cantidades de cemento asfáltico y solvente para fabricación del asfalto líquido

TIPO RC , MC	Asfalto (%)	Solvente (%)
30	52	48
70	63	37
250	70	30
800	82	18
3000	86	14

Fuente: Asfaltos Chilenos S.A.

La cantidad de aplicación para riegos de liga según el Instituto de Asfalto varía normalmente de 0,25 a 0,70 litros por metro cuadrado, esta variación está de acuerdo al estado de la superficie a regar (Asphalt Institute. MS-22). El riego de liga a utilizar para esta investigación serán el de curado rápido RC-70 y curado medio MC-70, con una tasa de aplicación adoptada que varía de 0,3 lt/m² a 0,7 lt/m² con incrementos de 0,1 lt/m².

3.6.1. Asfalto líquido de curado rápido (RC)

El fluidificante utilizado para su fabricación es la bencina o gasolina, que tiene como característica la de ser un diluyente liviano de alta volatilidad y un punto de ebullición bajo. Se designa con las letras RC (rapid curing) seguidas por un número que indica su grado de viscosidad en centistokes.

Tabla 3.31. Especificaciones para asfaltos líquidos de curado rápido (RC)

Características	Método de ensayo AASHTO	Método de ensayo ASTM	Grados					
			RC-0	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5
Punto de inflamación, vaso abierto. °C.	T-79	D-1310	-	-	26.7	26.7	26.7	26.7
Viscosidad furol a 25 °C, s.	T-72	D-88	75-150	-	-	-	-	-
Viscosidad furol a 50 °C, s.			-	75-150	-	-	-	-
Viscosidad furol a 60 °C, s.			-	-	100-200	250-500	-	-
Viscosidad furol a 82,2 °C, s.			-	-	-	-	125-250	300-600
Destilación: Destilado (porcentaje del total destilado a °C): A 190 °C.	T-78	D-402	15+	10+	-	-	-	-
A 225 °C.			55+	50+	40+	25+	8+	-
A 260 °C.			75+	70+	65+	55+	4+	25+
A 316 °C.			90+	88+	87+	83+	80+	70+
Residuo de destilación a 360 °C. porcentaje en volumen por diferencia			50+	60+	67+	73+	78+	82+
Ensayo sobre el residuo de destilación: Penetración 25 °C, 100 g. 5 s.	T-49	D-5	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120
Ductilidad. 25 °C, cm	T-51	D-113	100+	100+	100+	100+	100+	100+
Solubilidad en C Cl ₄ %	T-44	D-4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Condiciones generales			El material no contendrá agua					

Fuente: The Asphalt Institute, Manual de asfaltos

3.6.2. Asfalto líquido de curado medio (MC)

Su fluidificante es un diluyente de grado de volatilidad media y punto de ebullición del keroseno. Se designa con las letras MC (médium curing) seguidas por un número que indica su grado de viscosidad.

Tabla 3.32. Especificaciones para asfaltos líquidos de curado medio (MC)

Características	Método de ensayo AASHTO	Método de ensayo ASTM	Grados					
			MC-0	MC-1	MC-2	MC-3	MC-4	MC-5
Punto de inflamación, vaso abierto. °C.	T-79	D-1310	37.8	37.8	65.6	65.6	65.6	65.6
Viscosidad furol a 25 °C, s.	T-72	D-88	75-150	-	-	-	-	-
Viscosidad furol a 50 °C, s.			-	75-150	-	-	-	-
Viscosidad furol a 60 °C, s.			-	-	100-200	250-500	-	-
Viscosidad furol a 82,2 °C, s.			-	-	-	-	125-250	300-600
Destilación: Destilado (porcentaje del total destilado a °C): A 225 °C.	T-78	D-402	25-	20-	10-	5-	0	0
A 260 °C.			40-70	25-65	15-55	5-40	30-	20-
A 316 °C.			75-93	70-90	60-87	55-85	40-80	20-75
Residuo de destilación a 360 °C. porcentaje en volumen por diferencia			50+	60+	67+	73+	78+	82+
Ensayo sobre el residuo de destilación: Penetración 25 °C, 100 g. 5 s.			T-49	D-5	120-300	120-300	120-300	120-300
Ductilidad. 25 °C, cm	T-51	D-113	100+	100+	100+	100+	100+	
Solubilidad en C Cl ₄ %	T-44	D-4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	
Condiciones generales			El material no contendrá agua					

Fuente: The Asphalt Institute, Manual de asfaltos

3.6.3. Dosificación del riego de liga

La dosificación seleccionada para el riego de adherencia o riego de liga será del tipo RC-70, ya que este tipo de dosificación es utilizada generalmente para riegos de adherencia (Asphalt Institute. MS-22) de igual forma se utilizará el tipo MC-70, cuyo ligante de curado medio también es utilizado en nuestro medio.

Tabla 3.33. Dosificación seleccionada para riego de liga

Tipo	Asfalto (%)	Solvente (%)	Temperatura de riego (°C)
RC – 70	63	37	70 – 80
MC – 70			

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.1. Determinación de las cantidades de cemento asfáltico y solvente para riego de liga

❖ Cantidades de cemento asfáltico y solvente para una dotación de riego de 0,3 lt/m², en litros

Para determinar las cantidades de asfalto y solvente para una dotación de 0,3 lt/m² será de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \text{Cemento asfáltico (63 \%)} \\ \text{Solvente (37 \%)} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Cemento asfáltico (63 \%)} \\ \text{Solvente (37 \%)} \end{array}} \right\} 100 \% = 0,3 \text{ lt/m}^2$$

Para cemento asfáltico

$$\text{litros de C. A.} = 0,3 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} * 0,63$$

$$\text{C. A.} = 0,19 \text{ litros}$$

Para solvente

$$\text{solvente} = 0,3 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} * 0,37$$

$$\text{solvente} = 0,11 \text{ litros}$$

Entonces para un dosaje de $0,3 \text{ lt/m}^2$ se tiene las siguientes cantidades:

$$\text{Cemento asfáltico (63 \%)} = 0,19 \text{ litros}$$

$$\text{Solvente (37 \%)} = 0,11 \text{ litros}$$

❖ **Cantidades de cemento asfáltico y solvente para una dotación de riego de $0,3 \text{ lt/m}^2$, en gramos**

El cálculo se realizará de la siguiente manera:

Para cemento asfáltico

Densidad del cemento asfáltico: $1,012 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ (determinado en laboratorio)

Es decir que cada 1 centímetro cúbico de C.A. se tiene un peso equivalente a 1,012 gramos. Y como $1\text{cm}^3 = 0,001 \text{ litros}$, la relación que se tiene será la siguiente:

$$1,012\text{gr} \text{-----} 0,001\text{ts}$$

$$x \text{-----} 0,189\text{ts}$$

$$x = \frac{1,012 \text{ gr} * 0,189 \text{ ts}}{0,001 \text{ ts}}$$

$$\text{Cemento asfáltico} = 191,27 \text{ gramos}$$

Para el solvente

Los mismos pasos de cálculo se seguirán para determinar la cantidad de ambos solventes analizados (gasolina para curado rápido y kerosene para curado medio).

Para este ejemplo de cálculo el solvente a calcular será la gasolina.

Densidad de la gasolina = $0,68 \frac{gr}{cm^3}$

Se seguirá el mismo análisis que del cemento asfáltico, por lo tanto se tiene la siguiente relación:

$$\begin{array}{l} 0,68gr \text{-----} 0,001lts \\ x \text{-----} 0,111lts \end{array}$$

$$x = \frac{0,68 gr * 0,111 lts}{0,001 lts}$$

Gasolina = 75,48 gramos

3.6.3.2. Resultados de las cantidades de cemento asfáltico y solvente para las diferentes dosis de riego de liga

Tabla 3.34. Cantidades de asfalto y solvente para riego de liga de curado rápido (RC-70)

Riego de liga de curado rápido (RC-70)				
Tasa de aplicación lt/m ²	Cemento asfáltico (63 %)		Gasolina (37 %)	
	lts	gr	lts	gr
0,3	0,18	191,27	0,11	75,48
0,4	0,25	255,02	0,15	100,64
0,5	0,32	318,78	0,18	125,80
0,6	0,38	382,54	0,22	150,96
0,7	0,44	446,29	0,26	176,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35. Cantidades de asfalto y solvente para riego de liga de curado medio (MC-70)

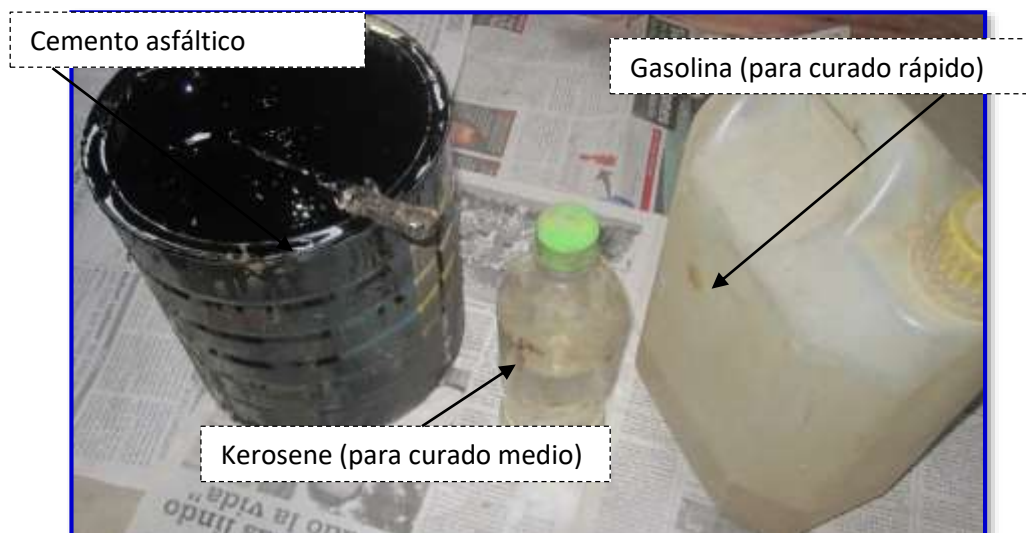
Riego de liga de curado medio (MC-70)				
Tasa de aplicación lt/m ²	Cemento asfáltico (63 %)		Kerosene (37 %)	
	lts	gr	lts	gr
0,3	0,18	191,27	0,11	88,80
0,4	0,25	255,02	0,15	118,40
0,5	0,32	318,78	0,18	148,00
0,6	0,38	382,54	0,22	177,60
0,7	0,44	446,29	0,26	207,20

Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Metodología de aplicación del riego de liga

Para la aplicación del riego de liga en la superficie de las probetas tanto para el ensayo de corte y el control de dotación de ligante se realizará en forma manual utilizando una brocha para la extensión del riego de liga sobre la superficie de las probetas, hasta alcanzar la cantidad de ligante calculado.

Figura 3.47. Materiales para la preparación del riego de liga



Fuente: Elaboración propia

3.6.4.1. Determinación de la cantidad de ligante a aplicar

El cálculo de la cantidad de ligante para cada una de las briquetas a adherir se realizará de la siguiente manera:

Área superficial de las briquetas construidas

El diámetro de cada briketa construida será de 4 pulgadas (10,16 cm).

$$A = \frac{\pi * 0,1016^2}{4} = 0,0081 m^2$$

Cantidad de riego de liga en gramos para cada muestra según la tasa de aplicación

Tasa de aplicación: 0,3 litros por cada metro cuadrado.

Para este ejemplo de cálculo se utilizará riego de curado rápido RC-70.

En base a los resultados de las cantidades por metro cuadrado de cemento asfáltico y solvente mostrado en la tabla 3.34., se tiene las siguientes cantidades por cada metro cuadrado:

Cemento asfáltico 63 % = 191,27 gramos

Solvente (Gasolina) 37 % = 75,48 gramos

Cantidad de cemento asfáltico

$$191,27 \text{ gr} \text{ --- } 1 m^2$$

$$x \text{ --- } 0,0081 m^2$$

$$x = \frac{191,27 \text{ gr} * 0,0081 m^2}{1 m^2}$$

$$x = 1,55 \text{ gramos de C. A.}$$

Cantidad de solvente (gasolina)

$$75,48 \text{ gr} \text{ --- } 1 \text{ m}^2$$

$$x \text{ --- } 0,0081 \text{ m}^2$$

$$x = \frac{75,48 \text{ gr} * 0,0081 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2}$$

$$x = 0,61 \text{ gramos de solvente}$$

Cantidad total en gramos de riego de liga a aplicar en cada briqueta

$$\text{Total} = 1,55 \text{ gr} + 0,61 \text{ gr}$$

$$\text{Total} = 2,16 \text{ gramos de riego de liga}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las cantidades de ligante a aplicar según la dosis y el tipo de riego de adherencia a utilizar.

Tabla 3.36. Cantidad de riego de liga de curado rápido para cada briqueta

Riego de liga de curado rápido (RC-70)						
Tasa de aplicación	Área briqueta	Cemento asfáltico (63 %)		Solvente [gasolina] (37 %)		Total de riego a aplicar
lt/m ²	m ²	lt	gr	lt	gr	gr
0,3	0,0081	0,00153	1,55	0,00090	0,61	2,16
0,4	0,0081	0,00204	2,07	0,00120	0,82	2,88
0,5	0,0081	0,00255	2,58	0,00150	1,02	3,60
0,6	0,0081	0,00306	3,10	0,00180	1,22	4,32
0,7	0,0081	0,00357	3,61	0,00210	1,43	5,04

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Cantidad de riego de liga de curado medio para cada briqueta

Riego de liga de curado medio (MC-70)						
Tasa de aplicación	Área briqueta	Cemento asfáltico (63 %)		Solvente [kerosene] (37 %)		Total de riego a aplicar
lt/m²	m²	lt	gr	lt	gr	gr
0,3	0,0081	0,00153	1,55	0,00090	0,72	2,27
0,4	0,0081	0,00204	2,07	0,00120	0,96	3,02
0,5	0,0081	0,00255	2,58	0,00150	1,20	3,78
0,6	0,0081	0,00306	3,10	0,00180	1,44	4,54
0,7	0,0081	0,00357	3,61	0,00210	1,68	5,29

Fuente: Elaboración propia

3.7. CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS

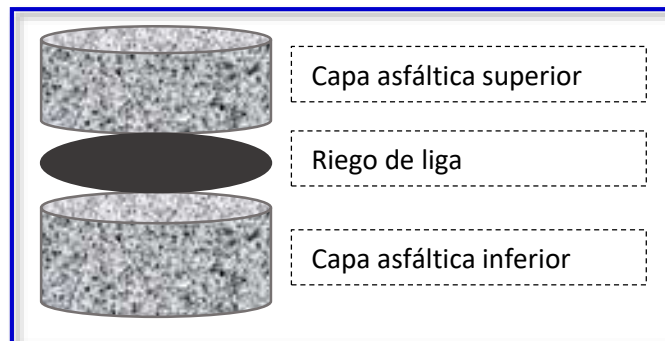
La construcción de las probetas tanto cilíndricas como prismáticas se realizará usando la metodología y parámetros Marshall.

Para ello se utilizará el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, el cual fue calculado fabricando probetas con diferentes porcentajes de asfalto para luego someterlas a la prensa Marshall y obtener la resistencia a deformaciones y los vacíos de la mezcla, para así determinar una dosificación óptima para una mezcla asfáltica densa.

Para esta investigación el porcentaje óptimo de asfalto calculado anteriormente fue de 5,93 %.

3.7.1. Elaboración de la briquetas para el ensayo de corte

Para este ensayo de corte con la cual se pretende obtener dotaciones más adecuadas que garanticen una buena adherencia entre capas, se elaboraron briquetas cilíndricas de 4 pulg. (101,6 mm) de diámetro. Estas briquetas estarán conformadas por dos capas de mezcla asfáltica densa unidas por el riego de liga. Cada briqueta tendrá una altura aproximada de 60 ± 5 mm. Para ello se utilizaron moldes cilíndricos de 101,6 mm de diámetro y una altura aproximada de 180 milímetros.

Figura 3.48. Estructura de la briqueta bicapa

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.1. Metodología de fabricación de las briquetas (bicapa)

La construcción de la capa asfáltica superior e inferior se realizará con la cantidad óptima de cemento asfáltico obtenido según el diseño Marshall. Con este contenido óptimo se realiza el cálculo de las cantidades de los agregados grueso y fino.

Se calculará la cantidad de agregados para un peso de 1200 gr para ambas capas (superior e inferior).

Tabla 3.38. Cantidad de material para cada capa de la briqueta bicapa en función al porcentaje óptimo de asfalto

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico				5,93 %
Material	grava	gravilla	arena	al 94,07 %
Porcentaje	30%	20%	50%	
Cantidades de material para un peso de 1200 gr				
Peso de material		Capa inferior	Capa superior	
Cemento asfáltico (gr)		70,92	70,92	
Grava (gr)		338,72	338,72	
Gravilla (gr)		225,82	225,82	
Arena (gr)		564,54	564,54	
Peso de la briqueta (gr)		1200	1200	

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento para realizar la mezcla asfáltica

Con las cantidades determinadas de los agregados y el porcentaje óptimo de asfalto se procede a la realización de las mezclas asfálticas para las briquetas de 2 capas.

Primeramente se realiza el calentamiento previo de los agregados y del cemento asfáltico para luego mezclarlos con las cantidades calculadas. El mezclado de los materiales se lo realizará manualmente hasta lograr una mezcla homogénea. Durante el proceso de mezclado se debe verificar la temperatura la cual debe oscilar entre 140°C a 150°C, en la cual se tendrá la mezcla lista para el proceso de compactación.

Este procedimiento se seguirá para la fabricación de las dos capas asfálticas.

Figura 3.49. Preparado de la muestra previo al mezclado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.50. Proceso de mezclado



a) Mezclado manual



b) Mezcla homogénea terminada

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.2. Compactación de las muestras

Antes de realizar la compactación de las muestras, los moldes utilizados para este proceso deben ser precalentados a una temperatura de 150 °C.

Se colocará papel filtro en la base del molde, en donde se verterá la mezcla a la temperatura especificada. El compactado se realizará a una temperatura de 140 °C a 150 °C por una sola cara con 150 golpes, conformando así la capa inferior de la briqueta bicapa.

Terminada la aplicación de los 150 golpes, se dejara enfriar un aproximando de 1 hora para su extracción del molde. Luego se dejará reposar la briqueta durante al menos 24 horas después de construida.

Figura 3.51. Compactado de la muestra con 150 golpes



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.3. Aplicación del riego de liga

La aplicación del riego de liga será manualmente utilizando una brocha. Se utilizarán cinco dotaciones de riego de liga, de 0,3 lt/m²; 0,4 lt/m²; 0,5 lt/m², 0,6 lt/m², 0,7 lt/m², además se usara dos tipos de ligantes, de curado rápido (RC-70) y de curado medio (MC-70).

Las cantidades a aplicar para cada dosis de riego serán de acuerdo a lo presentado en las tablas 3.34 y 3.35 (de curado rápido y de curado medio respectivamente).

Figura 3.52. Aplicación del riego de liga con la cantidad calculada



Fuente: Elaboración propia

Una vez aplicado el riego de liga se dejará reposar durante un tiempo de 12 horas para el riego de curado rápido y un tiempo de 24 horas para el riego de curado medio.

Transcurrido el tiempo se colocarán las briquetas dentro de los moldes para la conformación de la segunda capa asfáltica (capa superior), el cual estará adherida por el riego de liga aplicado.

Figura 3.53. Colocado de la briqueta con riego dentro del molde después de un tiempo de reposo especificado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.54. Construcción de la segunda capa asfáltica



a) Preparación de mezcla



b) Capa superior compactada

Fuente: Elaboración propia

Para la compactación de la segunda capa asfáltica, el molde permanecerá a temperatura ambiente, simulando las condiciones reales de compactación en obra.

Se dejara enfriar entre 1 a 2 horas para proceder a la extracción de toda la briqueta.

Figura 3.55. Briqueta bicapa adherida por un riego de liga



Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Elaboración de las probetas prismáticas para el ensayo del control y medición del riego de liga aplicado (ensayo de absorción de ligante)

Para realizar los ensayos de control y medición de riego de adherencia o riego de liga aplicado se elaborarán probetas prismáticas, los cuales simularán al pavimento sobre el cual se aplica el riego de liga. Estas probetas brindarán una superficie necesaria para el proceso de medición.

Las probetas serán construidas con un tamaño mínimo de 25x25 cm, ya que esta es la dimensión de la placa de carga del aparato de medición propuesto, que será descrito más adelante. La probeta tendrá una altura aproximada de $5 \pm 0,5$ cm, esto con el fin de asegurar la distribución homogénea de los agregados y el cemento asfáltico (mezcla).

Figura 3.56. Estructura de la probeta prismática



Fuente: Elaboración propia

3.7.2.1. Metodología de fabricación de las probetas prismáticas

La construcción de estas probetas al igual que las probetas cilíndricas para el ensayo de corte, se realizará con la cantidad óptima de cemento asfáltico obtenido según el diseño Marshall. Con este contenido óptimo se realiza el cálculo de las cantidades de los agregados grueso y fino.

Tabla 3.39. Cantidad de material para cada probeta prismática en función al porcentaje óptimo de asfalto

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico				5,93 %
Material	Grava	Gravilla	Arena	al 94,07 %
Porcentaje	30%	20%	50%	
Cantidades de material para cada probeta prismática				
Peso de material				6950 gr
Cemento asfáltico (gr)				410,75
Grava (gr)				1961,78
Gravilla (gr)				1307,85
Arena (gr)				3269,63
Peso de la probeta (gr)				6950,00

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento para realizar la mezcla asfáltica

Con las cantidades ya calculados de agregados y el porcentaje óptimo de asfalto se procede a la realización de la mezcla asfáltica.

Al igual que para el ensayo de corte, se calientan previamente los agregados y cemento asfáltico para posteriormente mezclarlos y realizar el amasado de la mezcla. El proceso de mezclado deberá estar a una temperatura entre 140°C a 150°C, para asegurar la óptima envuelta de los agregados por el asfalto.

Figura 3.57. Cantidades de agregado para cada probeta



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.58. Compactador manual casero y molde para la construcción de probetas



Fuente: Elaboración propia

3.7.2.2. Compactación de las muestras

Con la mezcla asfáltica lista se procede a colocar en los moldes para su posterior compactación, para este caso los moldes estarán a temperatura ambiente, con el fin de simular las condiciones reales de compactación en obra.

Para lograr aproximarse a las características de las probetas cilíndricas, en cuanto a la resistencia y el porcentaje de vacíos exigidos por el método Marshall, se hizo una relación del peso del martillo utilizado para compactar un briqueta cilíndrica, con el peso necesario para compactar una probeta prismática, determinando así un peso de 30,5 Kg, que deberá tener el compactador, para lograr una compactación adecuada.

El compactador casero se lo elaboró de cemento portland, logrando el peso calculado para dicho compactador.

Los moldes que se utilizarán para la compactación tendrán una dimensión de 27×27 cm², en la cual se vierte la mezcla preparada a la temperatura especificada, y se procederá a compactar dando golpes con la compactadora en forma constante hasta lograr la altura calculada.

Figura 3.59. Probetas prismáticas terminadas



Fuente: Elaboración propia

Finalizado el proceso de compactado, se dejara enfriar dentro del molde por un tiempo de 2 a 3 horas, luego de desmoldar se dejará en reposo de 8 a 10 horas previo a realizar el ensayo de absorción de ligante.

Figura 3.60. Esquema de construcción de las probetas prismáticas



Fuente: Elaboración propia

3.7.2.3. Textura superficial de las probetas prismáticas

Una vez que se finalizó la elaboración de las probetas se procedió a determinar la textura superficial de las probetas mediante el círculo de arena o mancha de arena,

basándose en las recomendaciones de la normativa (NLT-335/00 2000)¹³ y la norma ASTM D1155, con la cual se obtuvo las diferentes macro texturas de las probetas prismáticas.

Esta medición de la textura se lo realizó en ambas caras de las probetas, ya que después del compactado de las probetas se observó que ambas caras presentaban texturas variadas, estas texturas representarán a las distintas texturas que se puede hallar en los pavimentos.

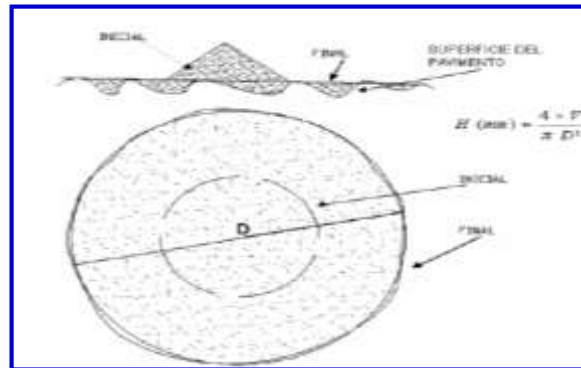
Ensayo del círculo de arena

Es un procedimiento que consiste en la cuidadosa aplicación de un volumen conocido de material sobre la superficie del pavimento y el posterior cálculo de la profundidad de textura a partir de la medición del diámetro promedio formado de la mancha de arena de material esparcido. La arena utilizada tiene una granulometría especificada en el método. El procedimiento del ensayo se realiza de la siguiente manera:

- ❖ Debe limpiarse la superficie del pavimento donde se realizará el ensayo, la limpieza debe realizarse con un cepillo de pelo blando.
- ❖ Se debe verter la arena contenida en el recipiente en el punto donde quiera realizarse el ensayo.
- ❖ Con ayuda de la cara plana de goma del tampón se extiende con movimientos circulares hasta conseguir una superficie enrasada aproximadamente circular y asegurándose de que la arena ocupe todos los vacíos generados por las depresiones.
- ❖ Se mide el diámetro del círculo de arena con una regla.

¹³ Medida de la macrotextura superficial de un pavimento por la técnica volumétrica, 1ª edn, CEDEX Spanish Standard, Madrid.

Figura 3.61. Esquema del ensayo del círculo de arena



Fuente: NLT-335/00 2000, Measurement of surface macro-texture of a pavement by the volumetric method

Figura 3.62. Medición de la textura superficial



Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la textura o rugosidad de la superficie se lo realiza mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4 * V}{\pi * d^2}$$

Donde:

H = Promedio del espesor de la rugosidad de la superficie, en mm.

V = Volumen de la muestra, en cm³.

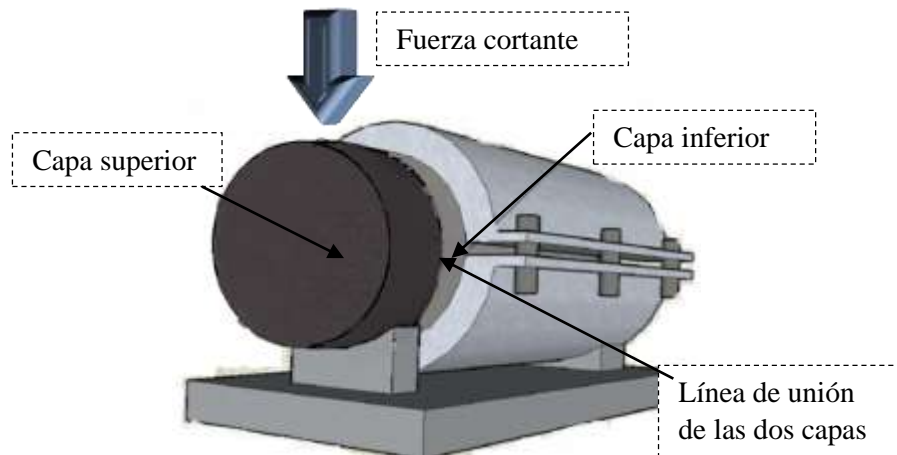
d = Diámetro promedio del área cubierta por el material, en mm.

3.8. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

3.8.1. Ensayo de corte LCB

Este ensayo servirá para el análisis y evaluación del efecto de diferentes riegos de liga mediante la rotura de los especímenes (briquetas) fabricadas en laboratorio, para esto se utilizara el método de corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), ya que esta es una metodología de fácil ejecución, que permite determinar la resistencia a la fuerza cortante aplicada para separar la unión de dos capas asfálticas y las deformaciones producidas hasta llegar a la falla. Con estos resultados se podrá evaluar la adherencia conseguida de cada espécimen construido.

Figura 3.63. Esquema del ensayo de corte LCB



Fuente: Elaboración propia

3.8.1.1. Instrumentos y equipos utilizados

❖ Prensa de carga

Este equipo será una prensa de compresión, de funcionamiento mecánico, el cual proporcione una carga de compresión y una velocidad uniforme de desplazamiento durante la aplicación de carga, además cuente con un dispositivo (dial) el cual registre la deformación en función de la carga aplicada.

Figura 3.64. Dispositivo de carga (prensa)



Fuente: Elaboración propia

❖ **Vernier o calibrador**

Este instrumento servirá para medir con precisión el diámetro de cada briqueta.

❖ **Aparato LCB (dispositivo de corte)**

Este dispositivo consiste en una mordaza desmontable en dos mitades, según un plano que corta a dos generatrices opuestas, en al que se introduce las probetas de ensayo. La mordaza debe tener un diámetro interno de 101,6 mm o 150 mm y esta provista de un sistema de cierre mediante tornillos u otro procedimiento adecuado, que mantenga el testigo o probetas firmemente sujetas en su interior. Dentro de la mordaza se colocara una de las capas que conforman a la probeta bicapa, la otra capa se deja fuera de la mordaza apoyada en la base con el fin de tener una capa fija y otra sobre la cual se aplica el desplazamiento.

La interfaz del testigo debe sobresalir 5 mm del extremo de la mordaza. Una vez dispuesto el testigo dentro de la mordaza y cerrada esta, se coloca el conjunto en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 188 mm. La separación de la interfaz del testigo y el punto de apoyo más cercano a dicha interfaz será también de 5 mm. El punto de aplicación de la carga estará en una posición equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, el cual actúa por tanto como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo, al estar muy próxima al punto de apoyo, solo está sometida a esfuerzo cortante.

Figura 3.65. Dispositivo de ensayo de corte LCB



Fuente: Elaboración propia

3.8.1.2. Procedimiento del ensayo de corte LCB

Una vez que se tienen las briquetas de dos capas listas, se procede a colocar dentro de la mordaza del dispositivo de corte. Dentro de la mordaza se coloca una capa de la briqueta, dejando la capa superior fuera de la mordaza. Posteriormente se coloca el conjunto sobre la base de la prensa y se aplica la carga, y con el dial de la prensa se medirá la deformación ocurrida en función a la carga aplicada, hasta alcanzar la rotura de la unión de las capas.

Figura 3.66. Colocado de la briqueta dentro de la mordaza



Fuente: Elaboración propia

El registro de los valores de carga y desplazamiento producido serán en intervalos de 0,2 mm hasta la falla (separación de las capas asfálticas). Todo el ensayo se realizará a temperatura ambiente.

Con los datos del ensayo se podrá realizar un diagrama de carga vs deformación para cada probeta ensayada, mediante el cual se podrá determinar la carga máxima de rotura

y la resistencia a esfuerzo cortante, que se determina a partir de la carga máxima de rotura, también se informará la deformación a la carga máxima.

Figura 3.67. Realización del ensayo de corte LCB



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a corte:

$$T_c = \frac{(F_{\max}/2)}{S}$$

Donde:

T_c = Resistencia a corte, en N/mm^2 (MPa).

F_{\max} = Carga máxima de rotura, en N.

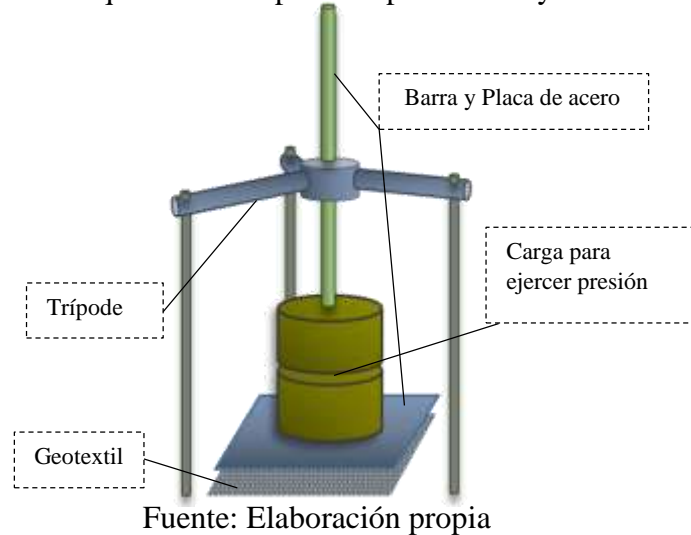
S = Superficie de la sección transversal, en mm^2 .

3.8.2. Ensayo de absorción de ligante

Este ensayo servirá como un parámetro para el control de la dotación de riego de liga en la construcción de proyectos de repavimentación o de la conformación de carpetas asfálticas nuevas, para ello los ensayos se realizarán mediante el instrumento desarrollado en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de Santander, España, para la medición en obra de la cantidad de ligante aplicado. Este dispositivo aplica una presión de 3,14 KPa a través de una placa de acero de 25 x 25 cm, recubierto de

geotextil, el cual absorberá cierto porcentaje del riego de liga aplicado sobre la superficie de la probeta.

Figura 3.68. Esquema del dispositivo para el ensayo de absorción



Fuente: Elaboración propia

3.8.2.1. Instrumentos y equipos utilizados

Se citaran los instrumentos o materiales más importantes, utilizados para la realización de este ensayo.

❖ Geotextil

El geotextil será utilizado como material absorbente de ligante, el cual junto al instrumento de medición de riego descrito a continuación, servirán para la medición de la cantidad de riego de liga aplicado.

Figura 3.69. Geotextil no tejido



Fuente: Elaboración propia

El geotextil utilizado será un geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 200 y 300 gr/m², los cuales fueron proporcionados por la Alcaldía Municipal de Tarija.

Tabla 3.40. Características de los geotextiles no tejidos de polipropileno (PP)

Polipropileno	UD	Tolerancia	Norma	120	150	200	300	500
Gramaje	gr/m ²		UNE EN ISO 9864	120	150	200	300	500
Composición	-		-	100% fibras de polipropileno agujetadas				
Resistencia a la tracción DM	KN/m	± 15%	UNE EN ISO 10319	5,6	5,8	9,6	18,2	21,2
Resistencia a la tracción DT	KN/m	± 15%	UNE EN ISO 10319	9,5	11,1	16	23,2	31,6
Alargamiento a la rotura DM	%	± 15%	UNE EN ISO 10319	123	130	133	109	117
Alargamiento a la rotura DT	%	± 15%	UNE EN ISO 10319	97	99	122	98	79
Punzonamiento estático CBR	N	-10%	UNE EN ISO 12236	1300	1600	2700	4200	6200
Perforación dinámica	mm	± 20%	UNE EN ISO 13433	17,3	15,9	5,7	3,7	1,4
Medida de abertura	µm	± 10%	UNE EN ISO 12956	85	80	80	75	63
Permeabilidad al agua	m/s	± 10%	UNE EN ISO 11058	95x10 ⁻³	91 x10 ⁻³	68 x10 ⁻³	57 x10 ⁻³	61 x10 ⁻³
Exposición a la intemperie				a recubrir máximo en 4 meses tras la instalación				
Durabilidad				mínimo 25 años en suelos naturales con pH [4 - 9] y Ta < 25°C				

Fuente: Geotextiles de polipropileno Protex, Group Projar, España (disponible en: <https://www.projar.es>)

❖ Dispositivo de medición de riego de liga aplicado en obra

El dispositivo de medición de ligante, consta de una placa de acero rígida unida a una barra de forma perpendicular a la placa, en la cual se colocarán la carga deseada a aplicar.

La carga aplicada por las pesas en conjunto con la placa de acero con dimensiones de 25 x 25 cm, tendrán un peso de 20 kg, que corresponderá a una presión de 3,14 KPa.

Figura 3.70. Dispositivo de medición de riego de liga



Fuente: Elaboración propia

3.8.2.2. Procedimiento del ensayo

Descrito los materiales a usar, se procede con la realización del ensayo, para la cual primeramente se pesan todas las piezas de geotextil los cuales tendrán una dimensión de 30×30 cm, y se obtienen los pesos iniciales. Posteriormente se coloca el geotextil a la parte inferior de la placa de acero, previo a eso se colocará una pieza de espuma de polietileno con el fin de que el geotextil se amolde a las posibles irregularidades de la superficie de la probeta, luego se colocará un polímero impermeable (nylon), estos junto al geotextil quedarán unidos a la placa mediante cinta adhesiva.

Figura 3.71. Dispositivo con carga y geotextil en reposo



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se coloca el peso a aplicar en la barra de acero la cual está unida a la placa, y se colocará el trípode. A continuación se nivelan las patas del trípode para que la superficie inferior de la placa este paralela a la superficie de la probeta. Una vez reguladas las patas del trípode, se suspende la placa con el geotextil y la carga a la posición de reposo, luego se procede a la extensión del riego de liga sobre la probeta con la cantidad exacta, usando una brocha.

Figura 3.72. Extensión del riego de adherencia



Fuente: Elaboración propia

Se coloca la probeta con el riego extendido debajo del dispositivo con la placa-carga-geotextil, y transcurrido un tiempo de 5 minutos desde la aplicación del riego, se coloca la placa cubierta con el geotextil junto con las pesas y se aplica una carga de 20 kg durante un tiempo aproximado de 4 ± 1 minutos, pasado ese tiempo especificado se retira la carga colocándolo en posición de reposo, y a continuación se despega el geotextil de la placa e inmediatamente se pesa para determinar el peso del geotextil con el ligante absorbido.

La cantidad de ligante que absorbe el geotextil se determina mediante la ecuación:

$$\text{Absorción} = P_f - P_i$$

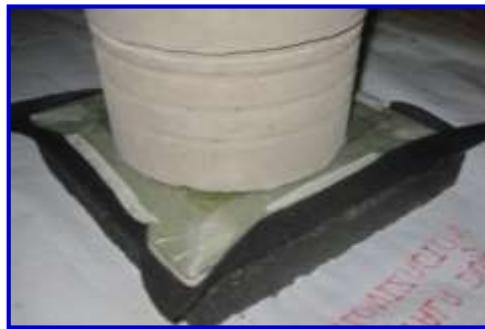
Donde:

Pi = Peso inicial del geotextil, en gr.

Pf = Peso final del geotextil después del ensayo, en gr.

Comparando el peso final con el peso inicial del geotextil se obtiene la cantidad de riego de liga absorbida, y comparando este valor con la cantidad inicial de riego aplicada en la superficie de 25 x 25 cm se obtiene el porcentaje de riego absorbido por el geotextil. Con estos datos se realizarán los distintos diagramas de cantidad absorbida y cantidad aplicada, considerando la rugosidad que presenta la superficie de la probeta.

Figura 3.73. Aplicación de la carga



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.74. Geotextil después de la absorción del ligante



Fuente: Elaboración propia

3.9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este punto se muestran los resultados que se obtuvieron de los ensayos realizados, como son el ensayo de corte LCB (para la determinación del rango de dotaciones más

adecuadas, con alto valor de adherencia entre capas) y el ensayo de absorción (para el control y medición del riego de liga aplicado en obra) para determinar la idoneidad de la metodología propuesta.

3.9.1. Ensayo de corte LCB

Los resultados del ensayo de corte utilizando en método LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona) se muestran a continuación, realizado los cálculos y correcciones necesarias, y diagramas comparativos de las cargas vs deformaciones para las diferentes dosis de riego de liga de los dos tipos de ligante utilizados.

3.9.1.1. Asfalto líquido o rebajado RC-70 (curado rápido)

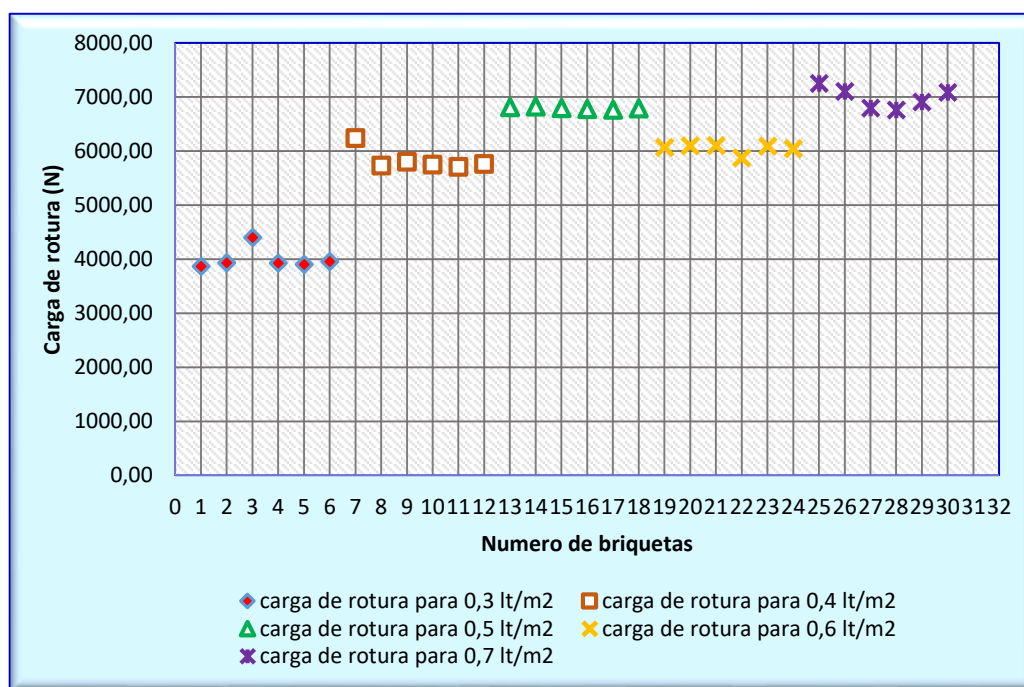
Tabla 3.41. Resultados de cargas de rotura, deformaciones y esfuerzos cortantes máximos de briquetas ligadas con riego de liga de curado rápido

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes máximos)							
Tasa	Briqueta	Peso briqueta	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo
lt/m ²	N°	gr	kg	N	KN	mm	Mpa
0,3	G1	2375,5	394,43	3869,36	3,87	2,62	0,23
	G2	2330,2	401,21	3935,92	3,94	3,06	0,25
	G3	2381,8	448,71	4401,81	4,40	3,10	0,27
	G4	2345,2	400,40	3927,92	3,93	2,71	0,24
	G5	2339,2	397,96	3903,99	3,90	2,99	0,24
	G6	2356,2	403,65	3959,81	3,96	2,87	0,25
0,4	G7	2063,9	636,16	6240,73	6,24	3,35	0,37
	G8	2315,2	584,40	5732,96	5,73	3,06	0,36
	G9	2310,4	591,53	5802,91	5,80	2,75	0,36
	G10	2233,5	586,30	5751,60	5,75	3,05	0,36
	G11	2175,2	582,10	5710,40	5,71	2,87	0,36
	G12	2411,6	587,13	5759,75	5,76	3,02	0,35
0,5	G13	2381,1	694,59	6813,93	6,81	3,23	0,42
	G14	2275,6	695,66	6824,42	6,82	2,61	0,41
	G15	2375,9	692,95	6797,84	6,80	3,11	0,42
	G16	2086,3	690,90	6777,73	6,78	3,10	0,42
	G17	2145,8	689,63	6765,27	6,77	2,57	0,41
	G18	2385,1	692,50	6793,43	6,79	3,01	0,42
0,6	G19	2320,4	618,32	6065,72	6,07	3,78	0,39

	G20	2310,7	621,53	6097,21	6,10	3,02	0,39
	G21	2393,1	622,24	6104,17	6,10	2,86	0,38
	G22	2312,1	598,60	5872,27	5,87	3,08	0,37
	G23	2269,2	621,30	6094,95	6,09	2,78	0,38
	G24	2343,2	616,42	6047,08	6,05	2,81	0,37
0,7	G25	2300,8	739,08	7250,37	7,25	3,21	0,45
	G26	2305,2	724,16	7104,01	7,10	3,07	0,45
	G27	2385,5	692,95	6797,84	6,80	2,83	0,43
	G28	2320,1	689,40	6763,01	6,76	3,21	0,42
	G29	2275,4	704,11	6907,32	6,91	3,07	0,43
	G30	2355,9	722,23	7085,08	7,09	0,44	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.75. Resultados de cargas de rotura en cada briquetas ligadas con distintas tasas de riego de liga de curado rápido RC-70



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las diferentes briquetas bicapa, adheridas con riego de liga de curado rápido RC-70.

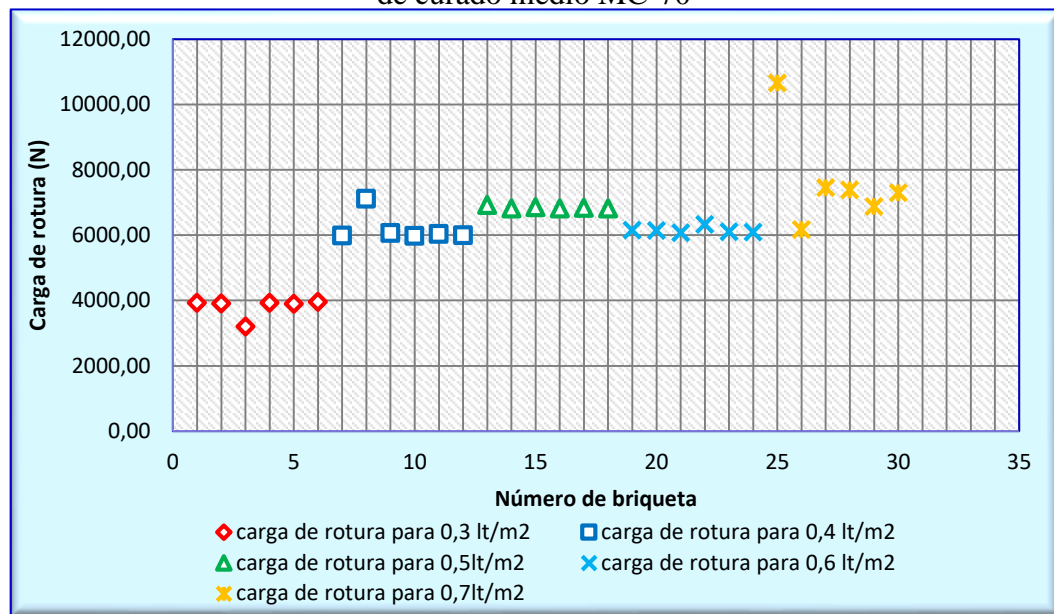
3.9.1.2. Asfalto líquido o rebajado MC-70 (curado medio)

Tabla 3.42. Resultados de cargas de rotura, deformaciones y esfuerzos cortantes máximos de briquetas ligadas riego de liga de curado medio

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes máximos)							
Tasa	Briqueta	Peso briketa	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo
lt/m ²	Nº	gr	kg	N	KN	mm	Mpa
0,3	K1	2296,3	400,50	3928,91	3,93	3,04	0,24
	K2	2318,7	398,50	3909,29	3,91	2,11	0,24
	K3	2286,1	326,59	3203,85	3,20	2,34	0,20
	K4	2239,2	401,17	3935,48	3,94	2,24	0,24
	K5	2240,5	397,92	3903,60	3,90	2,21	0,24
	K6	2341,1	403,90	3962,26	3,96	3,01	0,24
0,4	K7	2275,5	610,18	5985,87	5,99	2,72	0,38
	K8	2280,3	725,51	7117,25	7,12	2,21	0,44
	K9	2341,7	618,52	6067,68	6,07	3,05	0,38
	K10	2275,5	609,80	5982,14	5,98	2,82	0,37
	K11	2280,3	615,53	6038,35	6,04	3,01	0,38
	K12	2341,7	611,26	5996,46	6,00	3,03	0,38
0,5	K13	2245,9	706,52	6930,96	6,93	1,89	0,44
	K14	2270,6	695,81	6825,90	6,83	2,16	0,43
	K15	2298,2	699,73	6864,35	6,86	2,42	0,44
	K16	2245,9	695,76	6825,41	6,83	2,59	0,43
	K17	2270,6	697,10	6838,55	6,84	2,66	0,42
	K18	2298,2	695,59	6823,74	6,82	2,33	0,43
0,6	K19	2299,9	627,24	6153,22	6,15	2,26	0,39
	K20	2324,5	626,17	6142,73	6,14	2,57	0,39
	K21	2319,6	619,61	6078,37	6,08	2,89	0,38
	K22	2299,9	645,12	6328,63	6,33	2,40	0,40
	K23	2324,5	622,22	6103,98	6,10	2,34	0,38
	K24	2319,6	621,04	6092,40	6,09	2,09	0,38
0,7	K25	2293,2	1086,45	10658,07	10,66	1,81	0,66
	K26	2314,4	629,95	6179,81	6,18	1,74	0,39
	K27	2311,9	760,79	7463,35	7,46	2,52	0,46
	K28	2293,2	753,25	7389,38	7,39	1,98	0,46
	K29	2314,4	701,71	6883,78	6,88	2,04	0,43
	K30	2311,9	744,28	7301,39	7,30	2,22	0,46

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.76. Resultados de cargas de rotura en briquetas ligadas con un riego de liga de curado medio MC-70



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los diferentes resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las diferentes briquetas bicapa, adheridas con riego de liga de curado medio MC-70.

3.9.2. Control y medición de la dotación de riego de liga aplicado (ensayo de absorción)

Estos ensayos se realizaron con el dispositivo de medición del riego de adherencia aplicado en obra, desarrollado en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de Santander, España. Proponiendo así un sistema o metodología alternativa de medición del ligante aplicado.

Para realizar este ensayo se seleccionó las dotaciones que obtuvieron los valores más altos de resistencia al corte, determinados mediante el ensayo de corte LCB, utilizando dos tipos de ligante que son el asfalto rebajado de curado rápido (RC-70) y asfalto rebajado de curado medio (MC-70). También se utilizó las dos caras de las probetas prismáticas, con el fin de que estas simulen los diferentes estados o textura superficial que pueden encontrarse en un pavimento.

Los resultados que se obtuvieron en este ensayo utilizando los dos tipos de geotextil de polipropileno no tejidos se muestran a continuación.

3.9.2.1. Resultados de absorción para diferentes dotaciones de asfalto líquido de rotura rápida RC-70, para cada probeta

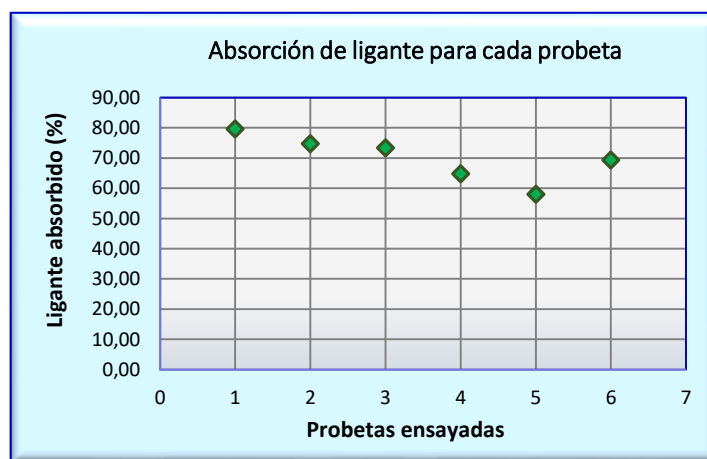
❖ Uso de geotextil no tejido PP-200 (masa media 200gr/m²)

Tabla 3.43. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una tasa de 0,4 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,4
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					22,23
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	27,5	45,2	17,70	79,62	20,38
NT22	25,8	42,4	16,60	74,67	25,33
NT32	23,4	39,7	16,30	73,32	26,68
NT42	26,1	40,5	14,40	64,78	35,22
NT52	26,8	39,7	12,90	58,03	41,97
NT62	26,5	41,9	15,40	69,28	30,72

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.77. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,4 lt/m²

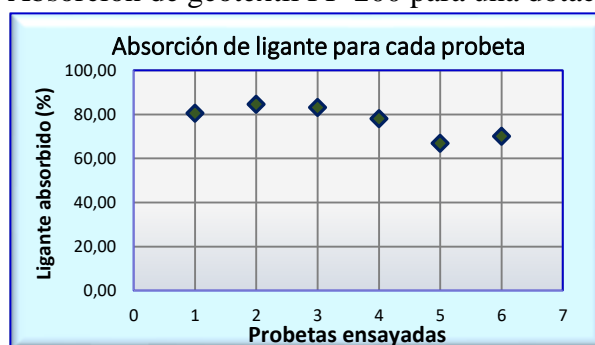


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una tasa de 0,5 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,5
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					27,79
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	29,5	51,9	22,4	80,60	19,40
NT22	26,1	49,6	23,5	84,56	15,44
NT32	28,5	51,6	23,1	83,12	16,88
NT42	26,8	48,5	21,7	78,09	21,91
NT52	27,1	45,7	18,6	66,93	33,07
NT62	26,6	46,1	19,5	70,17	29,83

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.78. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,5 lt/m²

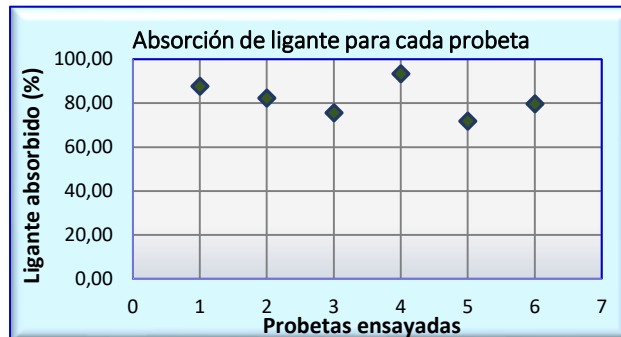
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una tasa de 0,6 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,6
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					33,34
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	28,4	57,6	29,20	87,58	12,42
NT22	27,7	55,1	27,40	82,18	17,82
NT32	28,2	53,4	25,20	75,58	24,42
NT42	27,1	58,2	31,10	93,28	6,72
NT52	26,3	50,2	23,90	71,69	28,31
NT62	26,8	53,3	26,54	79,60	20,40

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.79. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,6 lt/m²



Fuente: Elaboración propia

❖ **Uso de geotextil No tejido PP-300 (masa media 300gr/m²)**

Tabla 3.46. Resultados de absorción de geotextil PP-300 para una tasa de 0,4 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-300
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,4
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					22,23
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	29,7	45,7	16,00	71,97	28,03
NT23	30,1	47,2	17,10	76,92	23,08
NT33	30,7	47,1	16,40	73,77	26,23
NT43	28,4	39,8	11,40	51,28	48,72
NT53	30,3	40,7	10,40	46,78	53,22
NT63	29,5	44,5	15,00	67,48	32,52

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.80. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,4 lt/m²

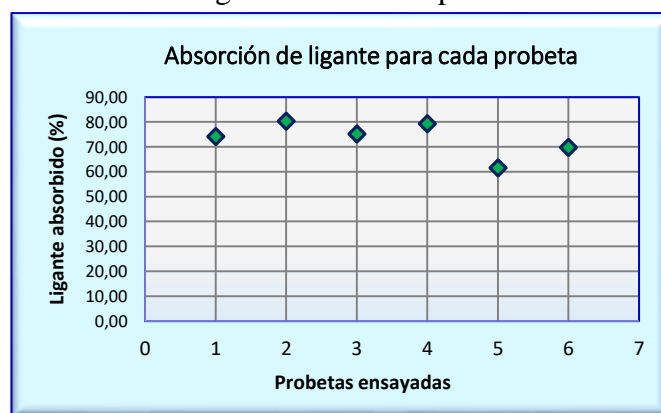


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Resultados de absorción de geotextil PP-300, para una tasa de 0,5 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-300
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,5
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					27,79
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	27,3	47,9	20,6	74,13	25,87
NT23	29,6	51,9	22,3	80,24	19,76
NT33	28,6	49,5	20,9	75,21	24,79
NT43	28,8	50,8	22,02	79,24	20,76
NT53	30,1	47,2	17,1	61,53	38,47
NT63	29,0	48,4	19,4	69,70	30,30

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.81. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,5 lt/m²

Fuente: Elaboración propia

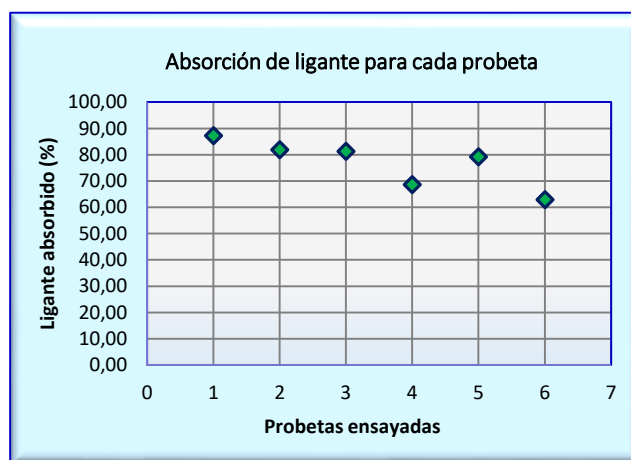
Tabla 3.48. Resultados de absorción de geotextil PP-300, para una tasa de 0,6 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,6
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					33,34
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	29,6	58,7	29,10	87,28	4,24
NT23	29,1	56,4	27,30	81,88	6,04
NT33	30,5	57,6	27,10	81,28	6,24
NT43	27,9	50,8	22,90	68,69	10,44

NT53	28,1	54,5	26,40	79,18	6,94
NT63	28,9	49,9	21,00	62,99	12,34

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.82. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,6 lt/m²



Fuente: Elaboración propia

3.9.2.2. Resultados de absorción para diferentes dotaciones de asfalto líquido de rotura media MC-70, para cada probeta

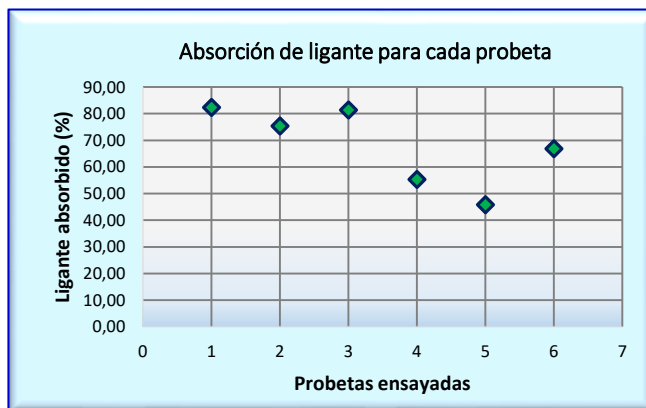
❖ Uso de geotextil No tejido PP-200 (masa media 200gr/m²)

Tabla 3.49. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una tasa de 0,4 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,4
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					23,34
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	26	45,2	19,2	82,26	17,74
NT22	26,8	44,4	17,6	75,41	24,59
NT32	27,3	46,3	19	81,41	18,59
NT42	26,8	39,7	12,9	55,27	44,73
NT52	27,1	37,8	10,7	45,84	54,16
NT62	27,5	43,1	15,6	66,84	33,16

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.83. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,4 lt/m²



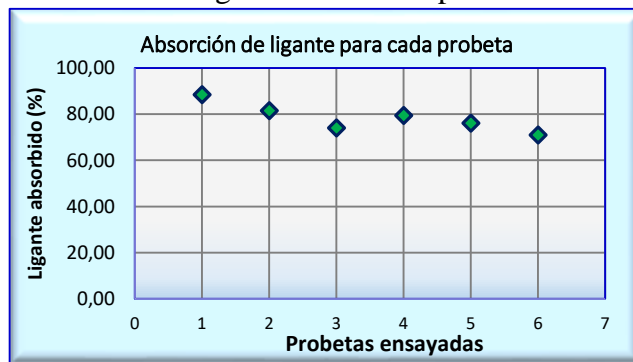
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una dotación de 0,5 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,5
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					29,17
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	29,6	55,4	25,8	88,45	11,55
NT22	28,3	52,1	23,8	81,59	18,41
NT32	27,7	49,3	21,6	74,05	25,95
NT42	27,01	50,2	23,19	79,50	20,50
NT52	26,6	48,8	22,2	76,11	23,89
NT62	26,8	47,5	20,7	70,96	29,04

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.84. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,5 lt/m²



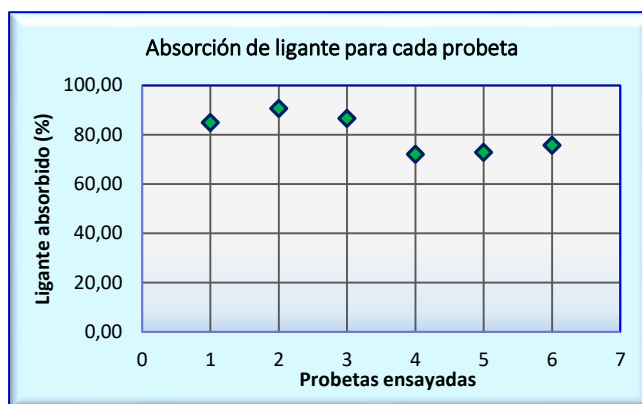
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51. Resultados de absorción de geotextil PP-200, para una tasa de 0,6 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,6
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					35,01
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT12	27,5	57,2	29,7	84,83	15,17
NT22	26,9	58,6	31,7	90,55	9,45
NT32	27,0	57,3	30,3	86,55	13,45
NT42	26,3	51,5	25,2	71,98	28,02
NT52	27,2	52,7	25,5	72,84	27,16
NT62	26,9	53,4	26,5	75,69	24,31

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.85. Absorción de geotextil PP-200 para una dotación de 0,6 lt/m²



Fuente: Elaboración propia

❖ **Uso de geotextil No tejido PP-300 (masa media 300gr/m²)**

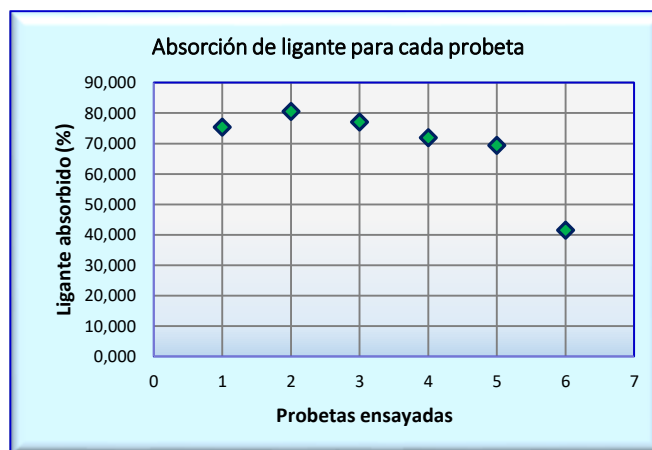
Tabla 3.52. Resultados de absorción de geotextil PP-300, para una tasa de 0,4 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-300
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,4
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					23,34
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	29,6	47,2	17,60	75,41	24,59

NT23	28,6	47,4	18,80	80,55	19,45
NT33	29,3	47,3	18,00	77,12	22,88
NT43	30,3	47,1	16,80	71,98	28,02
NT53	27,9	44,1	16,20	69,41	30,59
NT63	27,5	37,2	9,70	41,56	58,44

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.86. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,4 lt/m²



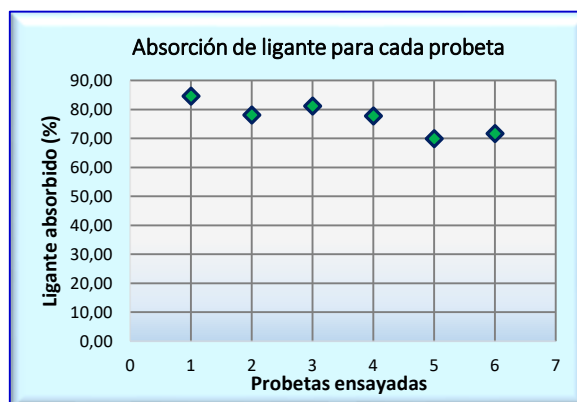
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53. Resultados de absorción de geotextil PP-300, para una tasa de 0,5 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-300
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,5
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					29,17
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	28,9	53,6	24,7	84,68	15,32
NT23	30,1	52,9	22,8	78,16	21,84
NT33	29,6	53,3	23,7	81,25	18,75
NT43	28,4	51,1	22,7	77,82	22,18
NT53	28,8	49,2	20,4	69,93	30,07
NT63	27,6	48,5	20,9	71,65	28,35

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.87. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,5 lt/m²



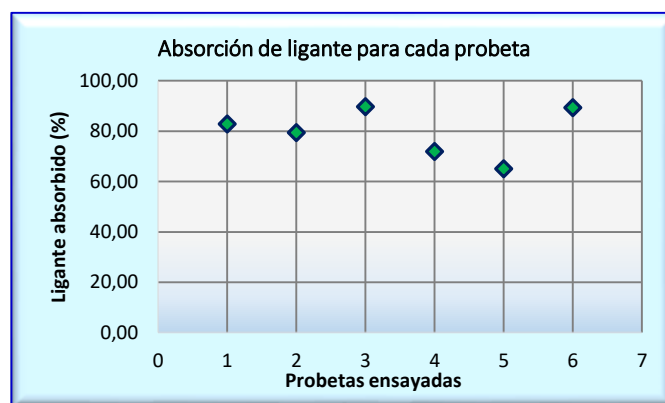
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54. Resultados de absorción de geotextil PP-300, para una tasa de 0,6 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-300
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,6
Cantidad de riego para una superficie de 25x25 cm, en (gr)					35,01
Absorción de ligante					
N°	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Ligante residual sobre la sup.
	gr	gr	gr	%	%
NT13	28,4	57,4	29,00	82,83	17,17
NT23	30,4	58,2	27,80	79,41	20,59
NT33	29,5	60,9	31,40	89,69	10,31
NT43	28,3	53,5	25,20	71,98	28,02
NT53	27,8	50,6	22,80	65,12	34,88
NT63	28,1	59,4	31,30	89,40	10,60

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.88. Absorción de geotextil PP-300 para una dotación de 0,6 lt/m²



Fuente: Elaboración propia

3.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez que se obtienen los resultados de los ensayos realizados los cuales son:

Ensayo de corte, que evaluará la resistencia al corte (medición de la adherencia) para determinar las dotaciones más adecuadas para una mezcla asfáltica densa, y el ensayo de absorción, utilizando para ello el dispositivo de medición de ligante, propuesta en esta investigación como una alternativa metodológica para una correcta medición de la dotación del ligante.

A continuación se realizará el análisis de los resultados obtenidos en dichos ensayos.

3.10.1. Resistencia al corte (LCB)

Estos ensayos se realizaron siguiendo el método de corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), con el cual se realizó la ruptura o separación de las probetas ligadas por diferentes tasas de riego de liga, con una carga cortante en la zona de unión de las dos capas.

Para poder obtener el rango óptimo de tasas de riego de liga necesarias para lograr la una máxima adherencia, se hizo variar las tasas de ligante para cada tipo de ligante utilizado.

3.10.1.1. Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos

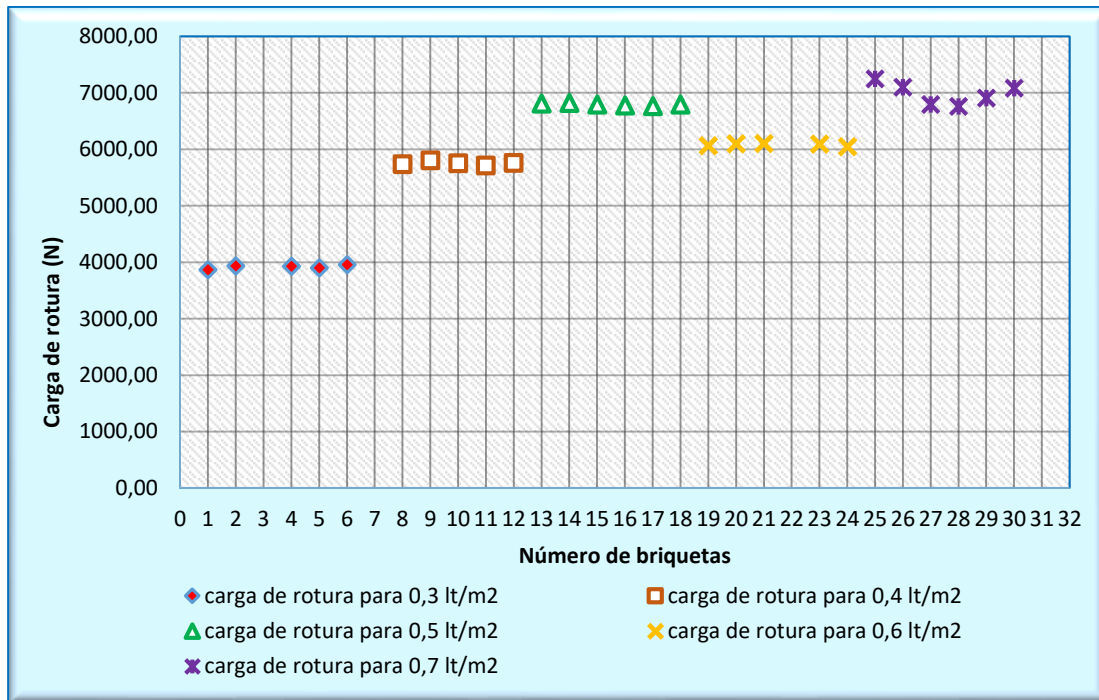
Para obtener los valores representativos de los resultados de corte (esfuerzo máximo), de los datos analizados, se realizó un tratamiento estadístico no probabilístico y el análisis de errores, de los diferentes resultados obtenidos para cada briqueta.

Tabla 3.55. Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el ligante de rotura rápida

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error											
Tasa	Briqueta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv. estándar	Esf. cortante	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	N	N	N	N	Mpa	mm	-	-	-	%
0,3	G1	3869,36	3919,40	3927,92	34,35	0,24	2,85	0,88	50,04	0,013	1,29
	G2	3935,92							16,52	0,004	0,42
	G3	4401,81									
	G4	3927,92							8,52	0,002	0,22
	G5	3903,99							15,41	0,004	0,39
	G6	3959,81							40,41	0,010	1,02
0,4	G7	6240,73	5751,52	5751,60	34,44	0,36	2,95	0,60			
	G8	5732,93							18,59	0,003	0,32
	G9	5802,91							51,39	0,009	0,89
	G10	5751,60							0,09	0,000	0,00
	G11	5710,40							41,12	0,007	0,72
	G12	5759,75							8,23	0,001	0,14
0,5	G13	6813,93	6795,44	6795,62	21,99	0,42	2,94	0,32	18,49	0,003	0,27
	G14	6824,45							29,01	0,004	0,43
	G15	6797,82							2,39	0,000	0,04
	G16	6777,73							17,71	0,003	0,26
	G17	6765,27							30,17	0,004	0,45
	G18	6793,43							2,01	0,000	0,03
0,6	G19	6065,71	6081,82	6094,95	24,37	0,38	3,05	0,40	16,12	0,003	0,27
	G20	6097,21							15,38	0,003	0,25
	G21	6104,17							22,35	0,004	0,37
	G22	5872,27									
	G23	6094,95							13,13	0,002	0,22
	G24	6047,08							34,74	0,006	0,57
0,7	G25	7250,40	6984,60	6996,20	192,33	0,44	3,04	2,75	265,80	0,037	3,67
	G26	7103,98							119,38	0,017	1,68
	G27	6797,82							186,78	0,027	2,75
	G28	6763,01							221,59	0,033	3,28
	G29	6907,32							77,28	0,011	1,12
	G30	7085,08							100,47	0,014	1,42

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.89. Resistencias a corte de cada briqueta, con diferentes dotaciones de ligante de rotura rápida



Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra el análisis estadístico que se realizó a los resultados obtenidos del ensayo de corte, cuyo fin es el de obtener las dotaciones más adecuadas para que las mismas sean aplicadas en las probetas prismáticas para su posterior medición con la metodología propuesta en esta investigación.

De los resultados mostrados en la tabla se puede observar que, para las briquetas ligadas con una dotación de $0,3 \text{ lt/m}^2$ obtuvieron valores de resistencia alrededor de 3 KN. En el cual realizando el análisis se pudo evidenciar de un resultado atípico con un valor de 4401,81 N, el cual fue depurado del análisis de estos resultados. Para esta dotación se obtuvo un valor medio de resistencia a corte de 3919,40 N con una desviación de 34,35 cuyo valor de resistencia sería $(3919,40 \text{ N} \pm 34,35)$, el valor más alejado de la media es 3869,81 N con un error 1,29%. Para una dotación de $0,4 \text{ lt/m}^2$ se obtuvo una resistencia media y una desviación de $(5751,52 \text{ N} \pm 34,44)$, del cual se depuró un valor no

consistente de 6240,73 N, de igual forma el valor más alejado a la media es 5902,91 N con un error de 0,89%.

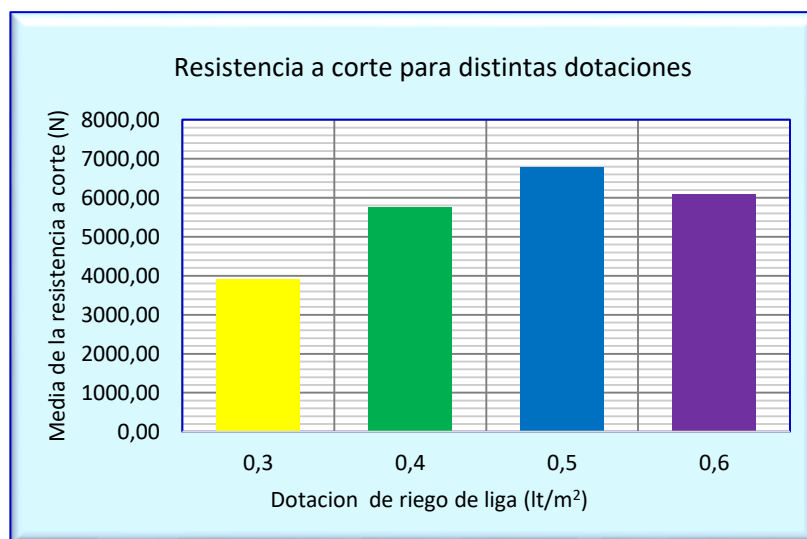
Para una dotación de 0,5 lt/m², los resultados de la media y desviación de las resistencias a corte es (6795,44 N ± 21,99), el valor más alejado a la media es 6765,27N con un error de 0,45%, para la dotación de 0,6 lt/m² se tiene un valor medio de resistencia y su desviación de (6081,82 N ± 24,37), el valor más alejado a la media es 6047,08N con un error de 0,57%, en los resultados de esta dotación se encontró un resultado inconsistente con un valor de 5872,27N, el cual se depuró para realizar el análisis.

Del análisis de resultados se puede observar que para la dotación de 0,7 lt/m², se obtuvo resistencia a corte muy altas cercanas a los 7KN, esto podría deberse a que cuando se realizó la aplicación del riego de liga, la cantidad a aplicar fue muy alta en relación a la superficie de la probeta, dándose el fenómeno de exceso de ligante, y esto hizo en algunas probetas el ligante escurría por las orillas de la probeta, también que durante la compactación de la segunda capa el ligante era expulsado fuera del plano o superficie de unión, cambiando la cantidad de ligante aplicado, dando así resultados engañosos, por tanto los resultados que se obtuvo no son datos confiables, es por eso que esos datos fueron depurados para próximos cálculos.

De la figura 3.89 se observa los resultados de resistencias a corte, obtenidos en las diferentes briquetas ligadas con un riego de adherencia de 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 litros por metro cuadrado, en donde se puede observar la variación de resistencia para cada dotación de ligante de curado rápido.

En la misma se puede apreciar lo que se dijo anteriormente que para una dotación de 0,7 lt/m², presentan resultados inconsistentes con relación a las demás dotaciones.

Figura 3.90. Resultados de la resistencia a corte para las distintas dotaciones de ligante de curado rápido RC-70



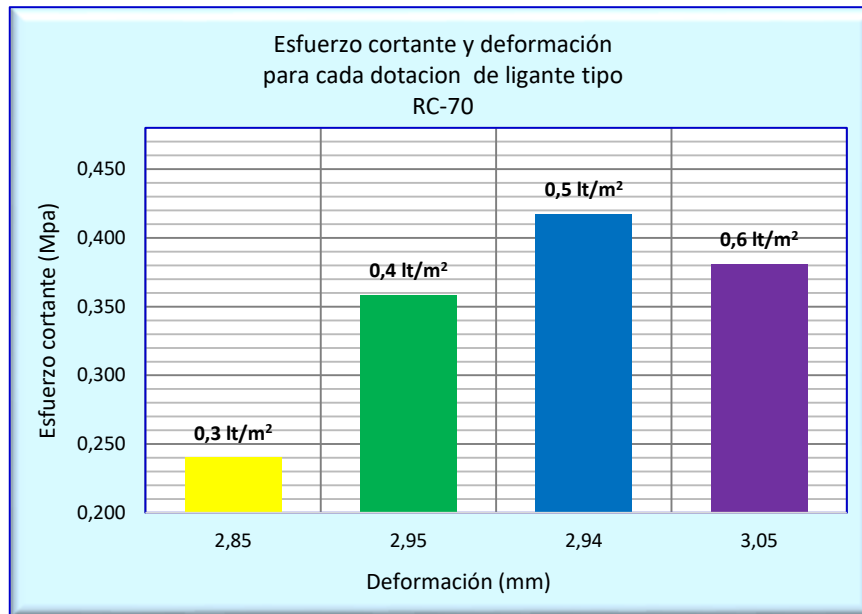
Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se observa la variación de resistencia a corte para una determinada dotación de riego de liga, donde se puede distinguir que el valor de la resistencia va en ascenso con cada aumento en la dotación, pero a partir de una dosis de 0,5 lt/m² la resistencia empieza a decrecer.

También se puede observar que la resistencia mínima conseguida pertenece a la dotación de 0,3 lt/m², con un valor medio de 3919,40 N (3,9KN), y el rango de dotaciones con valores altos de resistencia se encuentra entre 0,4 y 0,6 lt/m², siendo la dotación de 0,5 lt/m² el que mayor valor de resistencia al corte proporciona, con un valor medio de 6795,44 N (6,8 KN), y los valores de resistencia a corte para 0,4 y 0,6 lt/m², son de 5751,52 N (5,7 KN) y 6081,82 N (6,1 KN), con una diferencia entre ellas de un 5% aproximadamente.

De estos resultados se puede identificar que el rango adecuado de la dosis de ligante a aplicar estará entre 0,4 lt/m² y 0,6 lt/m².

Figura 3.91. Diagrama comparativo de esfuerzo y deformación para distintas dosis de ligante de curado rápido



Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se observa la variación del esfuerzo cortante máximo para cada dosis de ligante aplicado y la deformación máxima conseguida antes de la falla.

Para una dosis de ligante de 0,3 lt/m² el valor medio de esfuerzo cortante es 0,24 Mpa con una deformación de 2,85mm, para 0,4 lt/m² se tiene un valor medio de esfuerzo cortante de 0,36 Mpa con una deformación de 2,95mm, para 0,5 lt/m² se tiene un esfuerzo cortante de 0,42 Mpa con una deformación promedio de 2,94 mm, para 0,6 lt/m² se tiene un esfuerzo de 0,38 Mpa y una deformación media de 3,05mm.

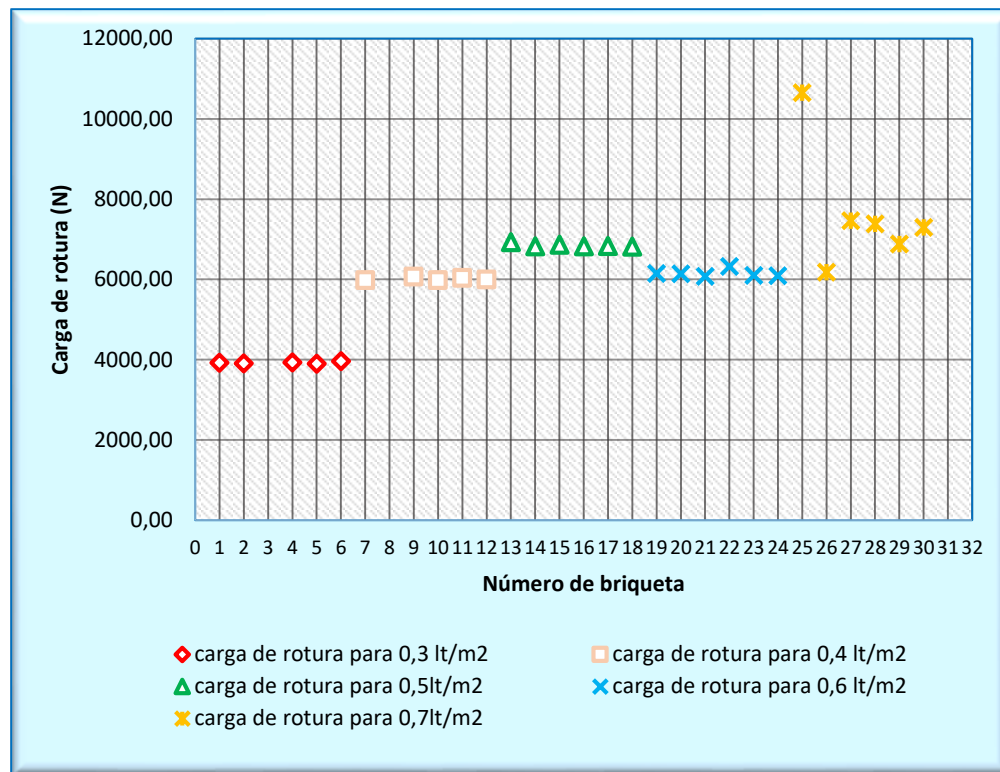
Tabla 3.56. Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el ligante de rotura media

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error											
Tasa	Briqueta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv. estándar	Esf. cortante	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	N	N	N	N	Mpa	mm	-	-	-	%
0,3	K1	3928,91	3927,90	3928,91	23,32	0,24	2,52	0,59	1,00	0,000	0,03
	K2	3909,29							18,62	0,005	0,48
	K3	3203,85									
	K4	3935,48							7,57	0,002	0,19
	K5	3903,60							24,31	0,006	0,62
	K6	3962,26							34,35	0,009	0,87
0,4	K7	5985,87	6014,10	5996,46	37,38	0,38	2,93	0,62	28,23	0,005	0,47
	K8	7117,25									
	K9	6067,68							53,58	0,009	0,88
	K10	5982,14							31,96	0,005	0,53
	K11	6038,35							24,25	0,004	0,40
	K12	5996,46							17,64	0,003	0,29
0,5	K13	2245,9	6835,59	6825,90	17,13	0,43	2,43	0,25			
	K14	6825,90							9,69	0,001	0,14
	K15	6864,35							28,76	0,004	0,42
	K16	6825,41							10,18	0,001	0,15
	K17	6838,55							2,96	0,000	0,04
	K18	6823,74							11,85	0,002	0,17
0,6	K19	6153,22	6114,14	6103,98	32,40	0,38	2,43	0,53	39,08	0,006	0,64
	K20	6142,73							28,59	0,005	0,47
	K21	6078,37							35,77	0,006	0,59
	K22	6328,63									
	K23	6103,98							10,16	0,002	0,17
	K24	6092,40							21,74	0,004	0,36
0,7	K25	1086,45	7043,54	7301,39	532,42	0,48	2,05	7,56			
	K26	6179,81							863,73	0,140	13,98
	K27	7463,35							419,81	0,056	5,62
	K28	7389,38							345,84	0,047	4,68
	K29	6883,78							159,77	0,023	2,32
	K30	7301,39							257,85	0,035	3,53

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra el tratamiento estadístico y el análisis de errores que se realizó a los resultados obtenidos del ensayo de corte LCB, para determinar las dotaciones más adecuadas con un alto valor de resistencia a corte, para ser utilizadas en el ensayo de medición de ligante, siguiendo la metodología propuesta en esta investigación.

Figura 3.92. Resistencias a corte de cada briqueta, a diferentes dotaciones de ligante de rotura media



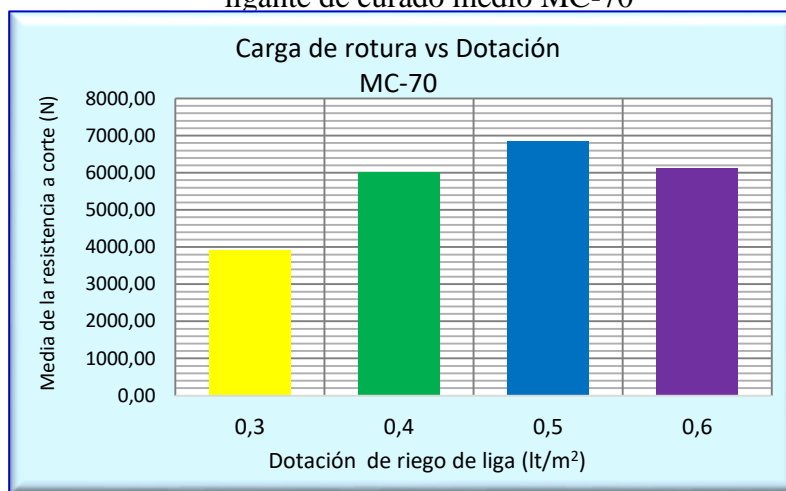
Fuente: Elaboración propia

En la tabla se puede observar que, para las briquetas ligadas con una dosis de 0,3 lt/m² obtuvo un valor medio de resistencia a corte de 3927,90 N con una desviación de 23,32 el cual se expresaría como (3927,90 N ± 23,32), el valor más alejado de la media es 3962,26 N con un error 0,87%, se encontró un resultado inconsistente con un valor de 3203,85 N, el cual fue depurado para el análisis de estos resultados, para 0,4 lt/m² se obtuvo una resistencia media y una desviación de (6014,10 N ± 37,38), del cual se depuro un valor no consistente de 7117,25 N, de igual forma el valor más alejado a la media es 6067,68 N con un error de 0,88%, para 0,5 lt/m², los resultados de la media y desviación de las resistencias a corte es (6835,59 N ± 17,13), el valor más alejado a la media es 6864,35 N con un error de 0,42%, para 0,6 lt/m² se tiene un valor medio de resistencia y su desviación de (6114,14 N ± 32,40), el valor más alejado a la media es 6153,22 con un error de 0,64%.

Al igual que en análisis de los resultados obtenidos con el ligante de curado rápido, en los resultados que se obtuvieron para el ligante de curado medio se observa que para la dotación de $0,7 \text{ lt/m}^2$ los valores son inconsistentes con relación a las demás dotaciones, esto a causa de la existencia de exceso de ligante, por lo cual no se consideró esta dosis para su análisis.

De la figura 3.92 se observa la variación en los resultados de resistencias a corte, obtenidos en las diferentes briquetas ligadas con un riego de adherencia de curado medio con tasas de 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 litros por metro cuadrado, pudiéndose notar el incremento de la resistencia a medida que se aumenta la tasa de aplicación, también se hace notar la variación en los resultados para una tasa de $0,7 \text{ lt/m}^2$, si se compara con los resultados de las demás tasas.

Figura 3.93. Resultados de la resistencia a corte para las distintas dotaciones de ligante de curado medio MC-70

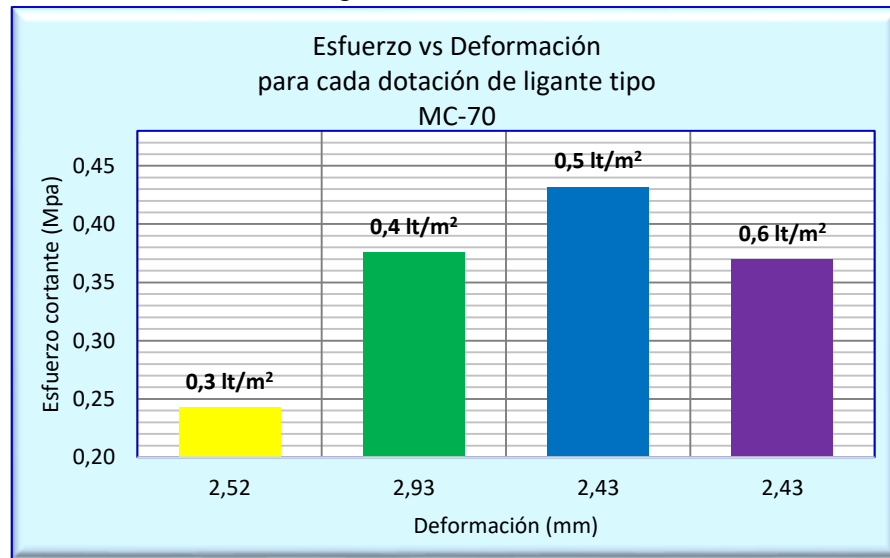


Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa la variación de resistencia a corte para una determinada dotación de riego de liga de curado medio. La resistencia mínima conseguida pertenece a la dotación de $0,3 \text{ lt/m}^2$, con un valor medio de $3927,90 \text{ N}$ ($3,9 \text{ KN}$), se obtuvo resultados similares para $0,4$ y $0,6 \text{ lt/m}^2$, con un valor de resistencia de $6014,10 \text{ N}$ (6 KN) y $6114,14 \text{ N}$ ($6,1 \text{ KN}$) respectivamente, con una diferencia entre ellas de un $1,6\%$

aproximadamente. Para la dosis de $0,5 \text{ lt/m}^2$ se tiene un mayor valor de resistencia al corte de $6835,59 \text{ N}$ ($6,8 \text{ KN}$).

Figura 3.94. Diagrama comparativo de esfuerzo y deformación para distintas dosis de ligante de curado medio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa la variación del esfuerzo cortante máximo para cada dosis de ligante aplicado y la deformación máxima conseguida antes de la falla.

Para una dosis de ligante de $0,3 \text{ lt/m}^2$ el valor medio de esfuerzo cortante es $0,24 \text{ Mpa}$ con una deformación de $2,52 \text{ mm}$, para $0,4 \text{ lt/m}^2$ se tiene un valor medio de esfuerzo cortante de $0,38 \text{ Mpa}$ con una deformación de $2,93 \text{ mm}$, para $0,5 \text{ lt/m}^2$ se tiene un esfuerzo cortante de $0,43 \text{ Mpa}$ con una deformación promedio de $2,43 \text{ mm}$, para $0,6 \text{ lt/m}^2$ se tiene un esfuerzo de $0,37 \text{ Mpa}$ y una deformación media de $2,43 \text{ mm}$.

Haciendo una comparación entre los dos tipos de riego utilizados se hace notar que para ambos ligantes la resistencia que presentaron valores altos fue para las dotaciones de $0,4$ a $0,6 \text{ lt/m}^2$.

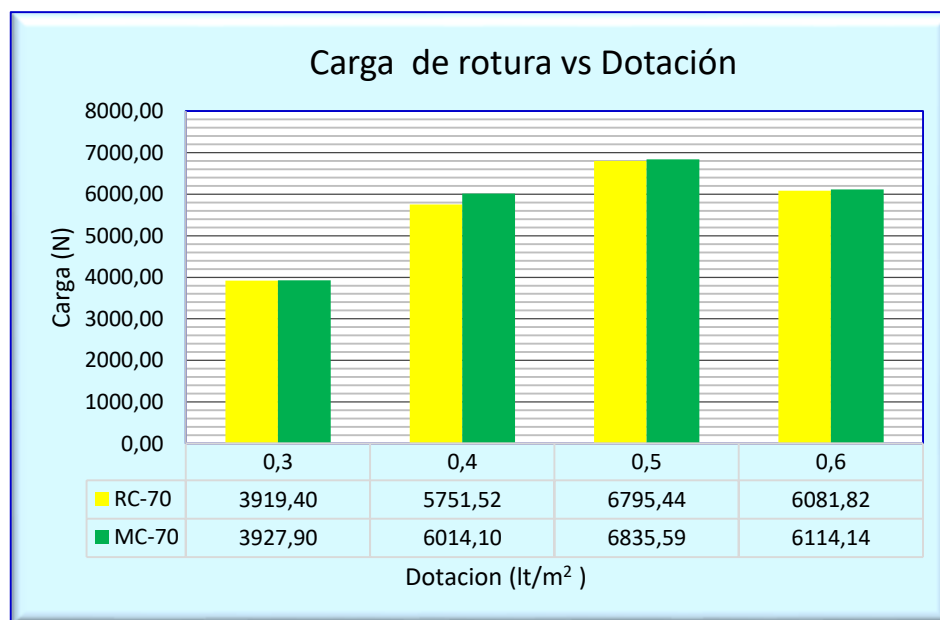
Se pudo apreciar también que las briquetas ligadas con riego de curado medio, tuvieron una deformación ligeramente menor en comparación de las briquetas ligadas con riego de curado rápido.

Tabla 3.57. Resumen estadístico de los resultados de resistencia a corte

Resistencia al corte (N)							
Curado rápido RC-70							
Dotación lt/m ²	Media	Mediana	Desv. est.	Mínimo	Máximo	Deformación	Esf. a corte
						mm	Mpa
0,3	3919,40	3927,92	34,35	3869,36	3959,81	2,85	0,240
0,4	5751,52	5751,60	34,44	5710,40	5802,91	2,95	0,359
0,5	6795,44	6795,62	21,99	6765,27	6824,45	2,94	0,417
0,6	6081,82	6094,95	24,37	6047,08	6104,17	3,05	0,381
Curado medio MC-70							
Dotación lt/m ²	Media	Mediana	Desv. est.	Mínimo	Máximo	Deformación	Dsf. a corte
						mm	Mpa
0,3	3927,90	3928,91	23,32	3903,60	3903,60	2,52	0,24
0,4	6014,10	5996,46	37,38	5982,14	6067,68	2,93	0,38
0,5	6835,59	6825,90	17,13	6823,74	6864,35	2,43	0,43
0,6	6114,14	6103,98	32,40	6078,37	6153,22	2,43	0,37

Fuente: elaboración propia

Figura 3.95. Comparación de la carga de rotura del riego de liga RC-70 vs MC-70 para distintas dotaciones

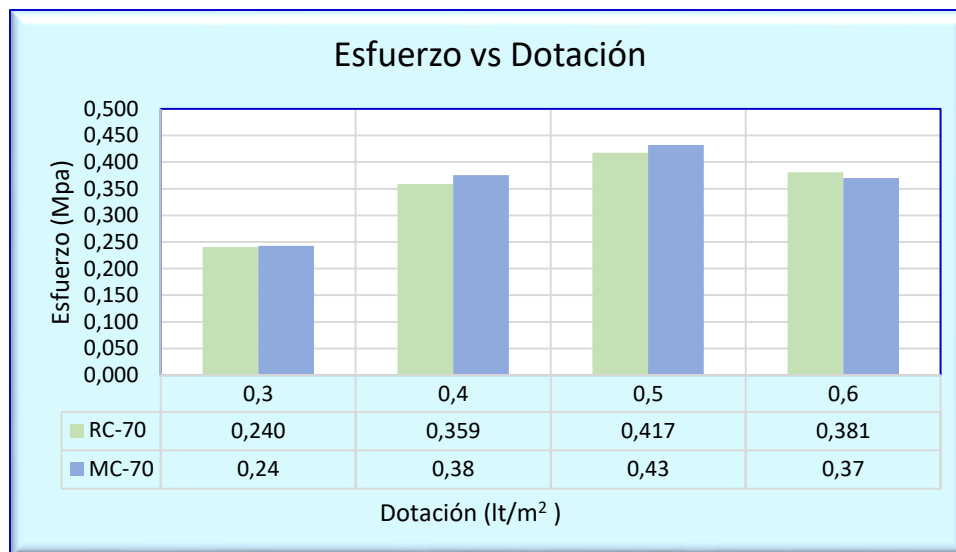


Fuente: Elaboración propia

Se observa que los valores medios de resistencia a corte para las dotaciones de 0,4 y 0,6 lt/m^2 , presentan valores altos comprendidos entre 5751,52 N y 6081,82 N respectivamente para ligante RC-70, mientras que para el ligante de curado medio los valores de resistencia se comprenden de entre 6014,10 N y 6114,14 N (para 0,4 y 0,6 lt/m^2).

Se aprecia también que el riego de liga de curado medio MC-70, obtuvo resultados de resistencia ligeramente mayores, que cuando se utilizó el riego de liga de curado rápido RC-70. Esto se observa para la resistencia más alta, para una dosis de 0,5 lt/m^2 , con un valor de 6795,44 N para curado rápido (RC), y un valor de 6835,59 N para curado medio (MC), con una diferencia de 0,58%.

Figura 3.96. Diagrama comparativo de esfuerzo a corte vs dotación de riego de liga de tipo RC.-70 y MC-70



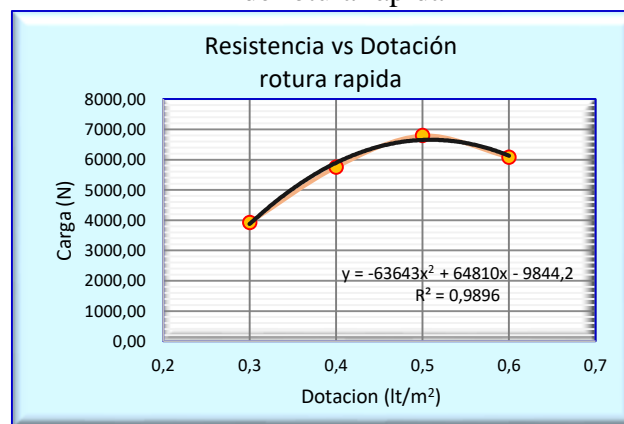
Fuente: Elaboración propia

De la comparación que se realiza en la figura se aprecia que los esfuerzos cortantes mínimos se dan para las dotaciones de 0,3 lt/m^2 para ambos tipos de ligante con valores de 0,24 Mpa (RC-70) y 0,243 Mpa (MC-70), los esfuerzos conseguidos para las dotaciones de 0,4 y 0,6 lt/m^2 para los dos tipos de ligante, fueron similares con un valor de 0,36 y 0,38 Mpa para ligante de curado rápido (RC-70), y un valor de 0,38 y 0,37 Mpa respectivamente para el ligante de curado medio (MC-70), los valores altos en

ambos casos se dio para una dosis de $0,5 \text{ lt/m}^2$ con un valor de $0,42 \text{ Mpa}$ para RC-70 y $0,43 \text{ Mpa}$ para MC-70.

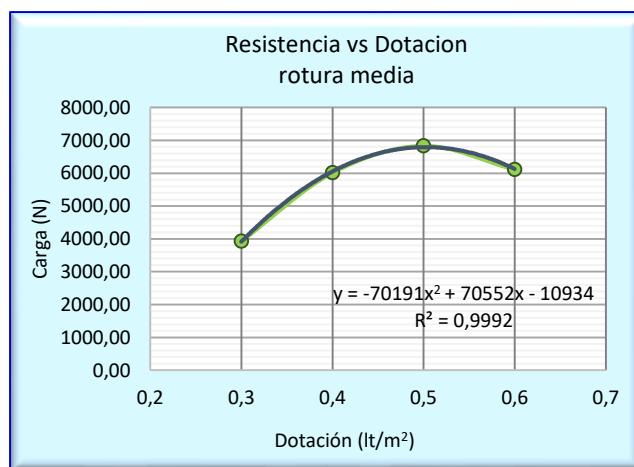
Del resumen de resultados se aprecia que las deformaciones conseguidas para las máximas cargas de rotura son mayores para las briquetas ligadas con el RC-70, mientras que para el ligante MC-70 se obtuvieron deformaciones ligeramente menores comparadas con el ligante de curado rápido.

Figura 3.97. Variación de la resistencia a corte respecto a la dotación de riego de liga de rotura rápida



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.98. Variación de la resistencia a corte respecto a la dotación de riego de liga de rotura media



Fuente: Elaboración propia

3.10.2. Control y medición de la dotación de riego de liga aplicado en obra (ensayo de absorción)

Para este ensayo se seleccionó tres dotaciones de riego de liga, que presentaron valores altos de resistencia al corte analizadas mediante el ensayo de corte LCB, las tasas de riego seleccionadas fueron 0.4, 0.5, 0.6 lt/m² cuyas resistencias al corte fueron 5751,52 N (5,8 KN), 6795,44 N (6,8 KN) y 6081,82 N (6,1 KN) respectivamente, para ligante de curado rápido, y resistencias de 6014,10 N (6,0KN), 6835,59 N (6,8 KN) y 6114,14 N (6,1 KN) para riego de curado medio. El ensayo se realizó con dos tipos de geotextil de tipo no tejido.

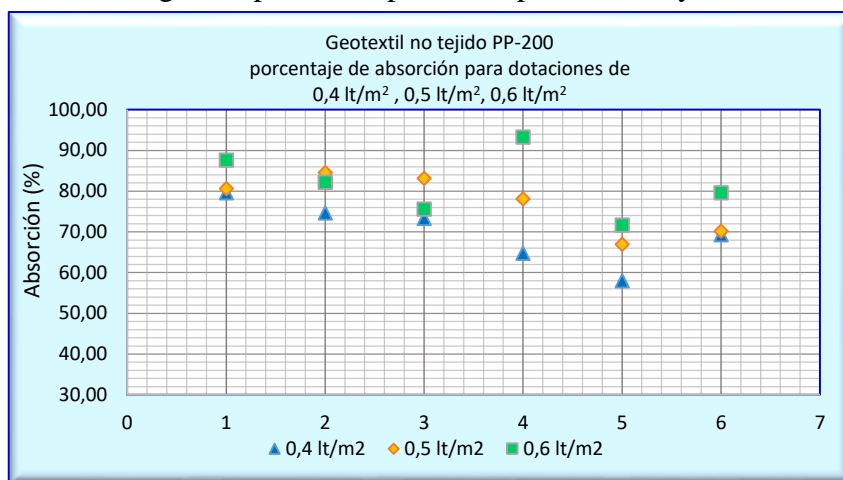
Una vez realizados los ensayos de absorción de ligante se ha realizado el análisis estadístico del conjunto de resultados obtenidos, para cada tipo de geotextil y ligante utilizado.

Tabla 3.58. Tratamiento estadístico de los resultados de absorción de ligante, con geotextil PP-200 y ligante tipo RC-70

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error									
Tasa	Probeta	Absorción	Media	Mediana	Desv. estándar	Coef. varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	%	%	%	%	-	-	-	%
0,4	NT12	79,62	69,95	71,30	7,70	11,01	9,67	0,121	12,15
	NT22	74,67					4,72	0,063	6,33
	NT32	73,32					3,37	0,046	4,60
	NT42	64,78					5,17	0,080	7,99
	NT52	58,03					11,92	0,205	20,54
	NT62	69,28					0,67	0,010	0,97
0,5	NT12	80,60	77,25	79,35	7,16	9,27	3,36	0,042	4,17
	NT22	84,56					7,32	0,087	8,65
	NT32	83,12					5,88	0,071	7,07
	NT42	78,09					0,84	0,011	1,08
	NT52	66,93					10,32	0,154	15,41
	NT62	70,17					7,08	0,101	10,09
0,6	NT12	87,58	81,65	80,89	7,89	9,66	5,93	0,068	6,77
	NT22	82,18					0,53	0,006	0,64
	NT32	75,58					6,07	0,080	8,03
	NT42	93,28					11,63	0,125	12,47
	NT52	71,69					9,97	0,139	13,91
	NT62	79,60					2,05	0,026	2,57

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.99. Resultados de absorción del ligante, del geotextil no tejido PP-200, y ligante tipo RC-70 para cada probeta ensayada



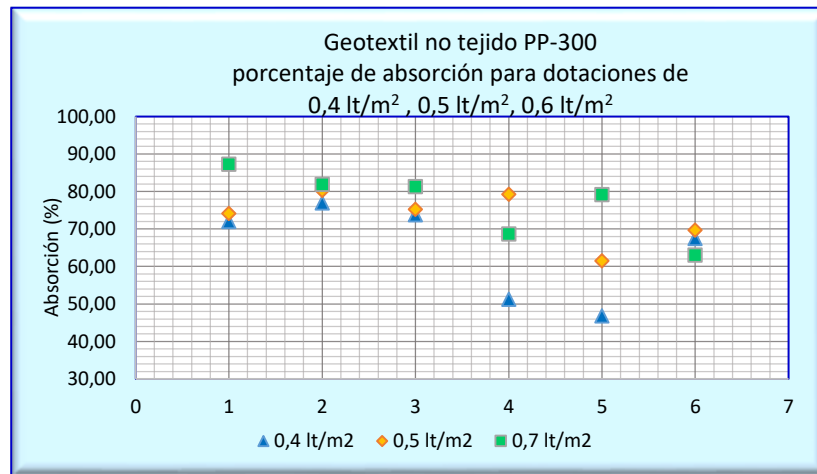
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.59. Tratamiento estadístico de los resultados de absorción de ligante, con geotextil PP-300 y ligante tipo RC-70

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error									
Tasa	Probeta	Absorción	Media	Mediana	Desv. estándar	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	%	%	%	%	-	-	-	%
0,4	NT13	71,97	64,70	69,73	12,60	19,47	7,27	0,101	10,10
	NT23	76,92					12,22	0,159	15,89
	NT33	73,77					9,07	0,123	12,30
	NT43	51,28					13,42	0,262	26,17
	NT53	46,78					17,92	0,383	38,30
	NT63	67,48					2,77	0,041	4,11
0,5	NT13	74,13	73,34	74,67	6,92	9,43	0,79	0,011	1,06
	NT23	80,24					6,90	0,086	8,60
	NT33	75,21					1,87	0,025	2,48
	NT43	79,24					5,90	0,074	7,44
	NT53	61,53					11,81	0,192	19,19
	NT63	69,70					3,64	0,052	5,22
0,6	NT13	87,28	76,88	80,23	9,14	11,89	10,40	0,119	11,91
	NT23	81,88					0,23	0,003	0,28
	NT33	81,28					0,37	0,005	0,46
	NT43	68,69					12,97	0,189	18,88
	NT53	79,18					2,47	0,031	3,12
	NT63	62,99					18,67	0,296	29,63

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.100. Resultados de absorción del ligante, del geotextil no tejido PP-300, y ligante tipo RC-70, para cada probeta ensayada



Fuente: Elaboración propia

De este análisis estadístico se puede observar las absorciones mínimas se consiguen para una dotación de 0,4 lt/m² tanto para el geotextil PP-200 y PP-300, cuyos porcentajes medios de absorción son aproximadamente de un 70% (PP-200) y 65% (PP-300), y los porcentajes de absorción mayores se encuentran para las dotaciones de 0,5 y 0,6 lt/m², con valores medios de absorción cercanos a 78% (PP-200) y 74% (PP-300) para la dotación de 0,5 lt/m², para una dotación de 0, lt/m² se tienen absorciones medias muy próximos al 82 % (PP-200) y 77% (PP-300).

Se observa también que la diferencia entre la media y la mediana de los resultados de absorción son mínimas con una diferencia menor a 3% (para PP-200) y menor a 7% (para PP-300) lo cual no influye a los resultados finales, teniéndose así los siguientes valores: Para una dotación de 0,4 lt/m² de tiene una media de 69,95%, con una desviación de 7,70 y una mediana de 71,30%, para el geotextil de tipo PP-200, y un valor medio de 64,70% con una desviación de 12,60, la mediana de 69,73% para el geotextil tipo PP-300. Para una dotación de 0,5 lt/m² se tiene un valor medio de 77,25% con una desviación de 7,16 y la mediana de 79,35% para el geotextil PP-200, y una media de 73,34% con una desviación de 6,92 y una mediana de 74,67% para el geotextil PP-300, para la dotación de 0,6 lt/m² los porcentajes de absorción son los más altos con

relación a las demás dotaciones en ambos casos, teniéndose valores medios de 81,65% con una desviación de 7,89 y la mediana 80,89% para el geotextil PP-200, y una media de 76,88% con una desviación de 9,14 y la mediana de 80,23%. De lo cual se deduce que las absorciones realizadas por el geotextil PP-200 son relativamente mayores al del geotextil PP-300, con una diferencia aproximada del 4%.

Análisis de resultados utilizando el ligante de curado medio MC-70

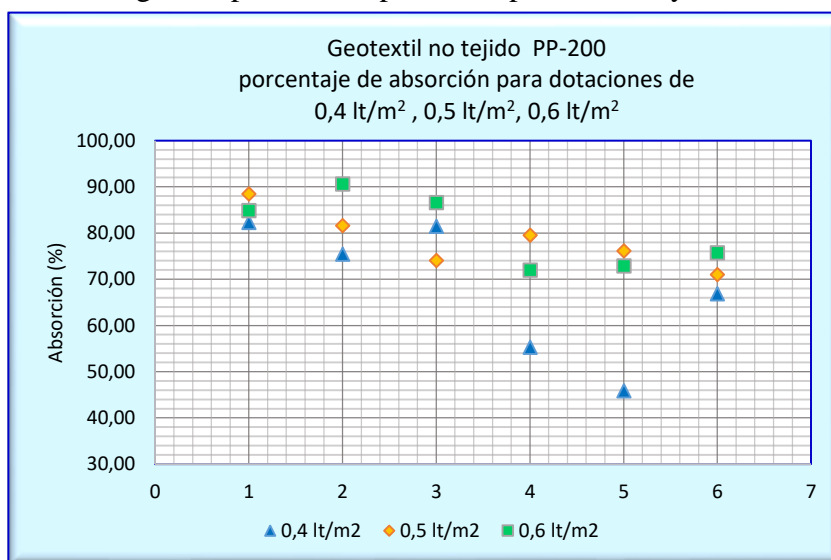
Tabla 3.60. Tratamiento estadístico de los resultados de absorción de ligante, con geotextil PP-200 y ligante tipo MC-70

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error									
Tasa	Probeta	Absorción	Media	Mediana	Desv. estándar	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	%	%	%	%	-	-	-	%
0,4	NT12	82,26	67,84	71,12	14,78	21,79	14,42	0,175	17,53
	NT22	75,41					7,57	0,100	10,04
	NT32	81,41					13,57	0,167	16,67
	NT42	55,27					12,57	0,227	22,74
	NT52	45,84					21,99	0,480	47,98
	NT62	66,84					1,00	0,015	1,50
0,5	NT12	88,45	78,44	77,80	6,19	7,90	10,00	0,113	11,31
	NT22	81,59					3,15	0,039	3,86
	NT32	74,05					4,39	0,059	5,93
	NT42	79,50					1,06	0,013	1,33
	NT52	76,11					2,34	0,031	3,07
	NT62	70,96					7,48	0,105	10,54
0,6	NT12	84,83	80,41	80,26	7,88	9,80	4,43	0,052	5,22
	NT22	90,55					10,14	0,112	11,20
	NT32	86,55					6,14	0,071	7,10
	NT42	71,98					8,43	0,117	11,71
	NT52	72,84					7,57	0,104	10,39
	NT62	75,69					4,71	0,062	6,23

Fuente: Elaboración propia

De la tabla se observa que utilizando el ligante de curado medio, se obtienen resultados de absorción mínimas para una dotación de 0,4 lt/m² para el geotextil PP-200, cuyo porcentaje medios de absorción es cercano a un 78% (PP-200) y los porcentajes de absorción mayores se encuentran para las dotaciones de 0,5 y 0,6 lt/m², con valores medios de absorción cercanos a 78% para la dotación de 0,5 lt/m², para una dotación de 0,6 lt/m² se tienen absorciones medias muy próximos al 80 %, con una diferencia de muy pequeña respecto a la dotación de 0,5 lt/m².

Figura 3.101. Resultados de absorción del ligante, del geotextil no tejido PP-200, y ligante tipo MC-70, para cada probeta ensayada



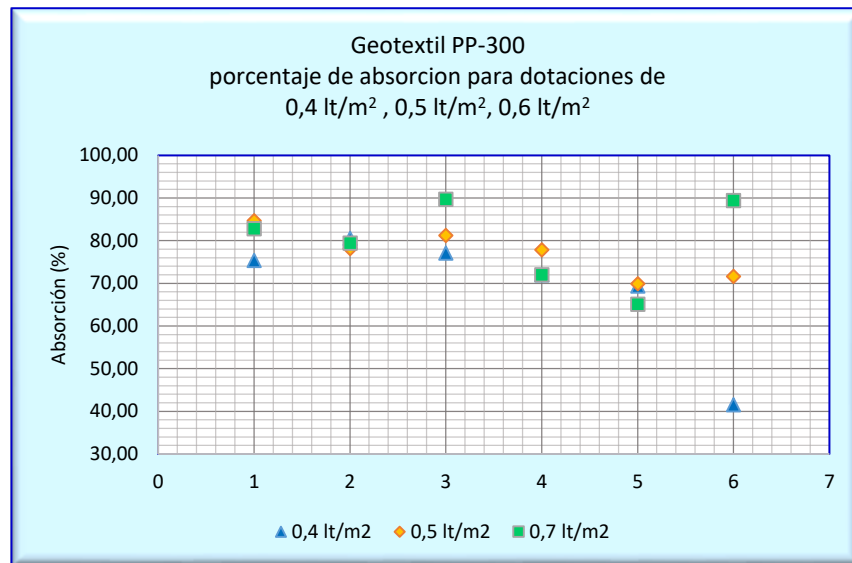
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61. Tratamiento estadístico de los resultados de absorción de ligante, con geotextil PP-300 y ligante tipo MC-70

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error									
Tasa	Probeta	Absorción	Media	Mediana	Desv. estándar	Coef. varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
lt/m ²	N°	%	%	%	%	-	-	-	%
0,4	NT13	75,41	69,34	73,69	14,15	20,41	6,07	0,080	8,05
	NT23	80,55					11,21	0,139	13,92
	NT33	77,12					7,78	0,101	10,09
	NT43	71,98					2,64	0,037	3,67
	NT53	69,41					0,07	0,001	0,10
	NT63	41,56					27,78	0,668	66,84
0,5	NT13	84,68	77,25	77,99	5,61	7,26	7,43	0,088	8,77
	NT23	78,16					0,91	0,012	1,17
	NT33	81,25					4,00	0,049	4,92
	NT43	77,82					0,57	0,007	0,73
	NT53	69,93					7,31	0,105	10,46
	NT63	71,65					5,60	0,078	7,81
0,6	NT13	82,83	79,74	81,12	9,76	12,23	3,09	0,037	3,74
	NT23	79,41					0,33	0,004	0,42
	NT33	89,69					9,95	0,111	11,09
	NT43	71,98					7,76	0,108	10,78
	NT53	65,12					14,61	0,224	22,44
	NT63	89,40					9,66	0,108	10,81

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.102. Variación en la absorción del ligante, del geotextil no tejido PP-300, y ligante tipo MC-70, para cada probeta ensayada



Fuente: Elaboración propia

De la tabla del análisis estadístico para las absorciones conseguidas por el geotextil PP-300 se puede observar que la absorción media para una dotación de 0,4 lt/m² es de 69,34% con una desviación de 14,15, para la dotación de 0,5 lt/m² se tiene un valor medio de 77,25% con una desviación en el resultado de 5,61 siendo este un 10% mayor a la absorción para la dotación de 0,4 lt/m², y para 0,6 lt/m² se tiene un valor medio de 79,74%, que es un 3% mayor al valor conseguido con la dotación de 0,5 lt/m².

Para este caso el geotextil que presenta absorciones más elevadas es el geotextil no tejido de gramaje 200 gr/m² (PP-200), si se compara con los resultados de absorción del geotextil PP-300, aunque estas diferencias no son muy grandes.

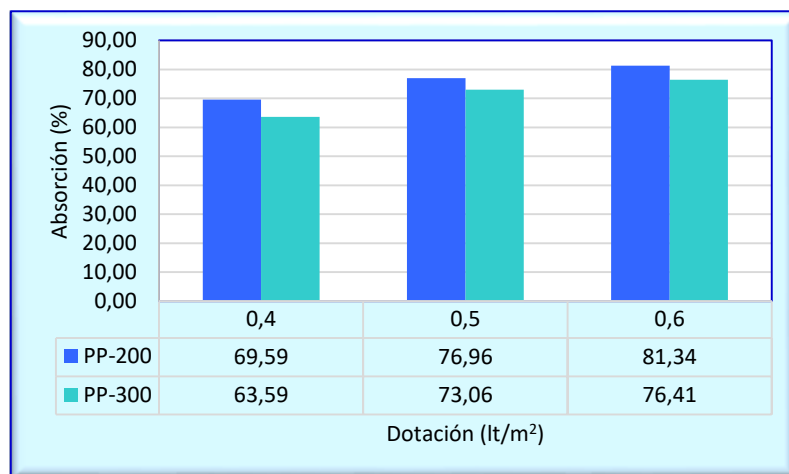
Tabla 3.62. Resumen del análisis estadístico de los porcentajes de absorción, para los dos tipos de ligante y geotextil utilizado

Asfalto líquido de curado rápido RC-70						
% de absorción	Dotación	Media	Mediana	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
%	lt/m ²					
PP-200	0,4	69,59	71,30	7,70	58,03	79,62
	0,5	76,96	79,35	7,16	66,93	84,56
	0,6	81,34	80,89	7,89	71,69	93,28
PP-300	0,4	63,59	69,73	12,60	46,78	76,92
	0,5	73,06	74,67	6,92	61,53	80,24
	0,6	76,41	80,23	9,14	62,99	87,28
Asfalto líquido de curado medio MC-70						
% de absorción	Dotación	Media	Mediana	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
%	lt/m ²					
PP-200	0,4	67,84	71,12	14,78	45,84	82,26
	0,5	78,44	77,80	6,19	70,96	88,45
	0,6	80,41	80,26	7,88	71,98	90,55
PP-300	0,4	69,34	73,69	14,15	41,56	80,55
	0,5	77,25	77,99	5,61	69,93	84,68
	0,6	79,74	81,12	9,76	65,12	89,69

Fuente: elaboración propia

De la tabla 3.62. resumen de los resultados de absorción y el análisis estadístico realizado se observa las diferencias entre los valores mínimos de porcentaje absorbido para cada dotación y tipo de geotextil utilizado, los cuales están entre 58,9% y 71,7% para el ligante de curado rápido RC-70 y 45,8% y 71,9% para el ligante de curado medio MC-70, y los valores máximos de entre 79,6% y 93,28% para ligante RC-70 y 82,3% y 90,6 % para ligante MC-70, esto para el geotextil no tejido PP-200. Los valores obtenidos con el geotextil no tejido PP-300, presentan diferencias entre valores mínimos de 46.8% y 62,9% para ligante tipo RC-70, y entre 41,6% y 69,9% para ligante tipo MC-70, y los valor máximos se encuentran entre 76,9% y 87,3% para ligante de curado rápido, y 80,5% y 89,7% para ligante de curado medio.

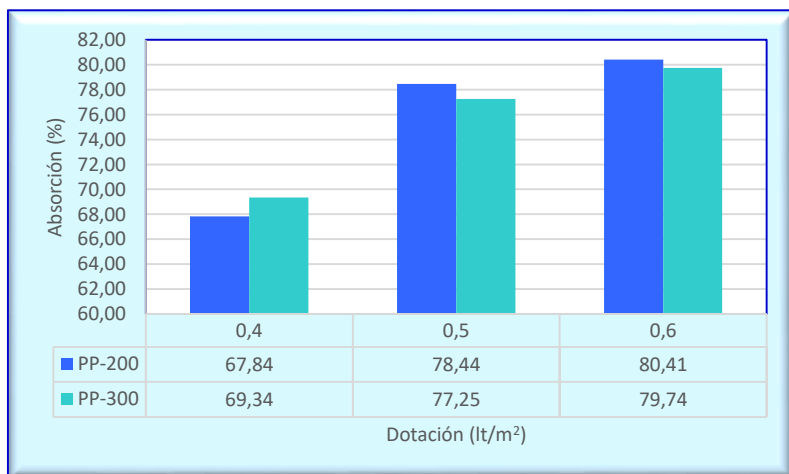
Figura 3.103. Diagrama comparativo de porcentaje de absorción de ambos tipos de geotextil, para ligante de curado rápido



Fuente: Elaboración propia

De la figura 3.103 se puede observar que el porcentaje de absorción lograda por el geotextil PP-200 son ligeramente mayores al de la absorción del geotextil PP-300 (casi un 5% más que el geotextil pp-300).

Figura 3.104. Diagrama comparativo de porcentaje de absorción de ambos tipos de geotextil, para ligante de curado medio



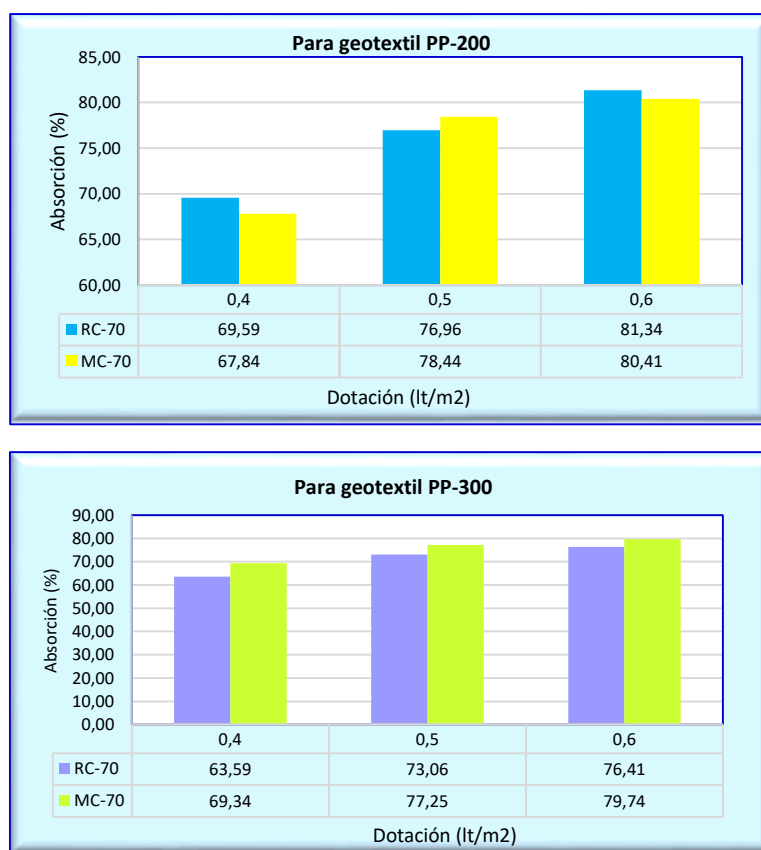
Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que de igual forma que con el ligante de curado rápido, los porcentajes de absorción del geotextil PP-200 son en cuanto mayores con relación a la

absorción conseguida con el geotextil PP-300, con excepción para una dotación de 0,4 lt/m^2 en donde la absorción del geotextil PP-300 fue mayor que el geotextil PP-200, esto se puede deber a la influencia de la textura superficial de la probetas u otro factor.

También se observa para ambos casos (geotextil PP-200 y PP-300, ligante RC-70 y MC-70) que el tipo de ligante a utilizar influye de forma muy mínima a la absorción, ya que para ambos casos los valores de absorción son relativamente similares, tal como se observa en la figura 3.105.

Figura 3.105. Relación de absorción según el tipo de ligante utilizado

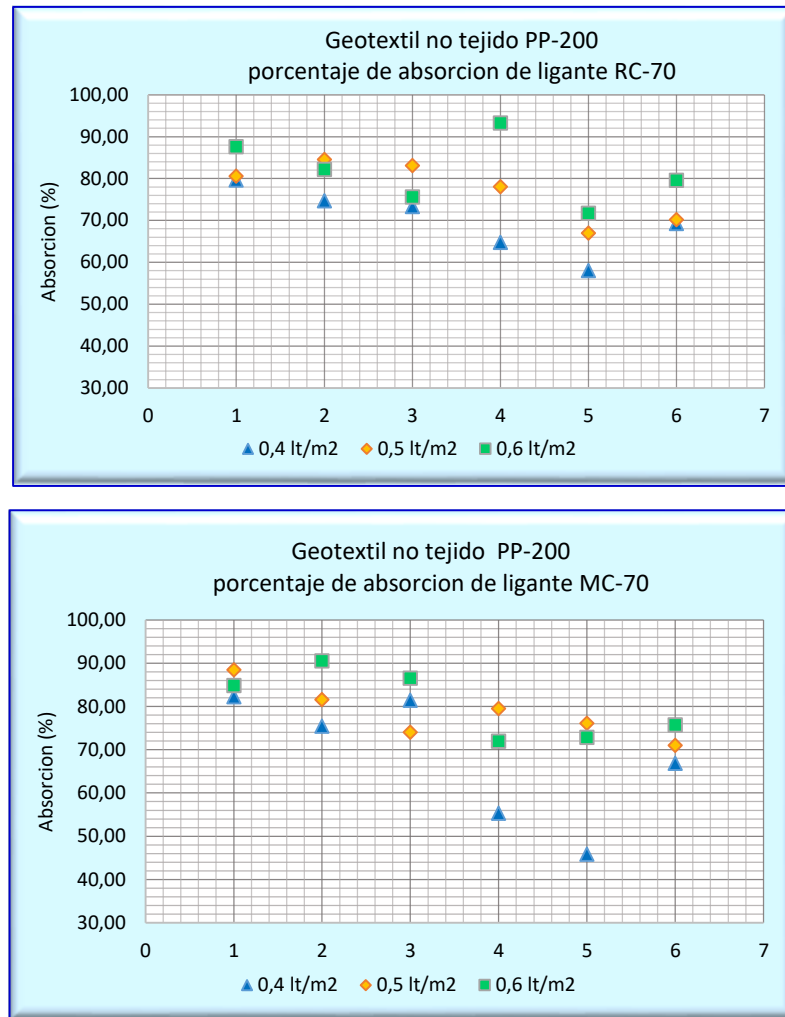


Fuente: Elaboración propia

Dado a que el geotextil PP-200 presento valores de absorción de ligante mayores al del geotextil PP-300, esto puede deberse al tipo de gramaje o densidad del geotextil, ya que al ser de mayor densidad su absorción será un poco más lenta, por lo que el geotextil tipo PP-200 resulta el más adecuado para su utilización en los ensayos de

medición de ligante aplicado con el dispositivo de medición (sistema alternativo de control de dotación).

Figura 3.106. Variación en la absorción de ligante para diferentes dotaciones



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se observa que existen variaciones en la absorción para una misma dotación, tal como se ve en la gráfica para un dotación de 0,4 Lt/m² se tienen diferentes porcentajes de absorción, que van desde un 58,03% (mínimo) y 79,62% (máximo) para el ligante de curado rápido y 45,84% (mínimo) y 82,26% (máximo) para el ligante de curado medio, estas variaciones se dan en las diferentes dotaciones.

Las variaciones que se observan son debido a la influencia de la textura superficial de las probetas, ya que al realizarse el ensayo en ambas caras de la probeta se pudo notar que la cara inferior de la probeta presentaba una superficie con muy poca rugosidad superficial mientras que en la cara superior se presentó ciertas irregularidades en su superficie, como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 3.107. Probetas prismáticas con rugosidad superficial distintas

(a) Probetas con superficie poco rugosa



(b) probetas con superficie rugosa (cara superior)



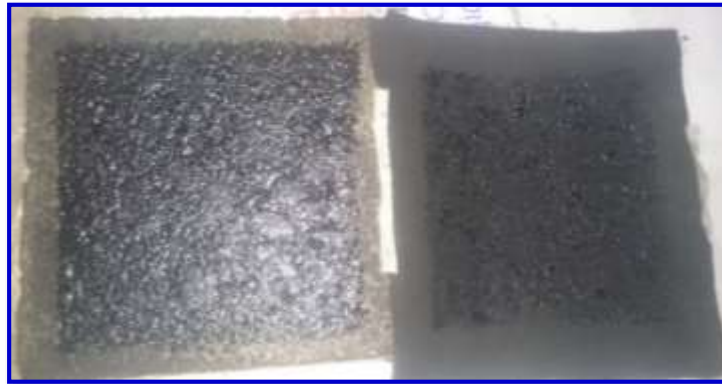
Fuente: elaboración propia

En la figura se observa la diferencia en la textura superficial de ambas caras de la probeta en la cual se realizó el ensayo.

De aquí se puede deducir que los porcentajes de absorción de ligante tanto RC-70 y MC-70 utilizados en este ensayo son influenciados por la textura que presenta la superficie de la probeta en la cual se aplica el ligante, donde las bajas absorciones se dieron en las probetas con superficies rugosas, presentando porcentajes de absorción

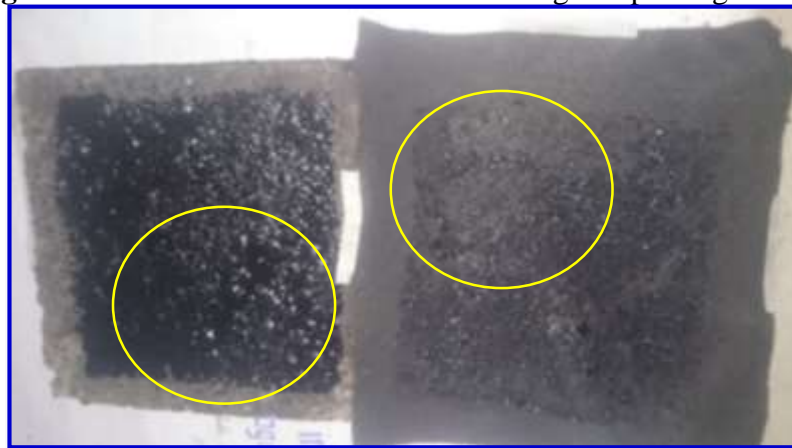
cercanos al 40% y las absorciones altas se dieron cuando la superficie de ensayo presento poca rugosidad con porcentajes cercanos al 90% independiente del tipo de geotextil y tipo de ligante utilizado.

Figura 3.108. Absorción de ligante por el geotextil para una dotación de $0,6 \text{ lt/m}^2$



Fuente: elaboración propia

Figura 3.109. Variación en la absorción de ligante por el geotextil

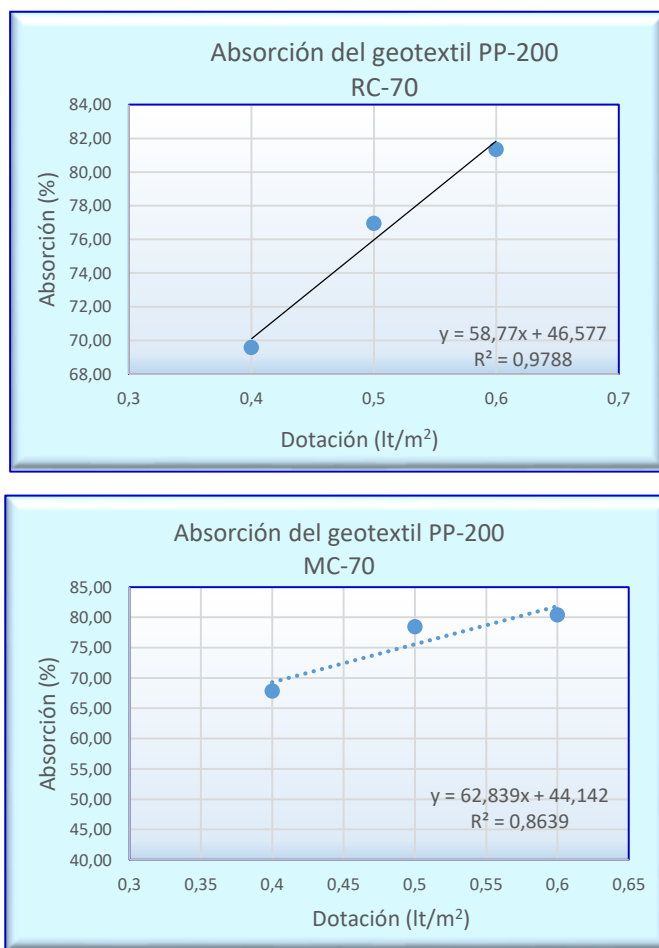


Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura existe variación en la absorción de ligante, donde se puede notar en el geotextil una zona (recuadro amarillo) en la cual tuvo una mínima absorción, esta variación como ya se dijo anteriormente se debe a la presencia de diferentes rugosidades en la superficie de la probeta, es entonces que el valor bajo de absorción pueda deberse a que el ligante aplicado sobre la superficie rugosa no permanece en su totalidad en la superficie de la probeta, ya que esta fluye hacia los huecos o rugosidades superficiales rellenándolos, tal como se observa en la figura 3.109 el ligante no

absorbido por el geotextil se encuentra rellenando los huecos o rugosidad superficial de la probeta.

Figura 3.110. Relación de absorción con la dotación del ligante en diferentes dosis



Fuente: Elaboración propia

De las gráficas se obtiene la ecuación de tendencia con el cual se podrá determinar un porcentaje de absorción teórico para una determinada dotación de riego de liga, en el cual X =dotación de riego de liga; Y = absorción teórica.

Para lograr obtener mejores resultados de medición de ligante aplicado es necesario considerar la textura superficial de cada probeta en la cual se realizó los ensayos de absorción.

Cuyos resultados de la textura superficial fueron los siguientes:

Tabla 3.63. Resultados de texturas superficial de las probetas estudiadas

Textura superficial de las probetas prismáticas						
Tasa de riego	Para ligante RC-70			Para ligante MC-70		
	N° de probeta	Cara superior	Cara inferior	N° de probeta	Cara superior	Cara inferior
lt/m ²		mm	mm		mm	mm
0,4	1	0,33	0,93	1	0,27	0,95
	2	0,41	1,06	2	0,41	1,01
	3	0,63	0,82	3	0,39	0,67
0,5	4	0,57	0,69	4	0,35	0,80
	5	0,37	1,11	5	0,42	0,68
	6	0,41	0,86	6	0,60	0,98
0,6	7	0,41	0,93	7	0,59	1,05
	8	0,58	1,18	8	0,31	0,79
	9	0,35	0,68	9	0,46	0,84

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos de la textura superficial de las probetas analizadas, se obtuvo los distintos porcentajes de absorción según el tipo de textura superficial de su superficie.

Tabla 3.64. Porcentajes de ligante absorbido para las diferentes texturas superficiales de las probetas de ensayo

Absorción del ligante en para diferente texturas superficial							
Para ligante de curado rápido				Para ligante de curado medio			
Tasa de riego	Probeta	% absorción	Textura	Tasa de riego	Probeta	% absorción	Textura
lt/m ²		%	mm	lt/m ²		%	mm
0,4	NT12	79,62	0,33	0,4	NT13	82,26	0,27
	NT22	74,67	0,41		NT23	75,41	0,41
	NT32	73,32	0,63		NT33	81,41	0,39
	NT42	64,78	0,93		NT43	55,27	0,95
	NT52	58,03	1,06		NT53	45,84	1,01
	NT62	69,28	0,82		NT63	66,84	0,67
0,5	NT12	80,60	0,57	0,5	NT13	88,45	0,35
	NT22	84,56	0,37		NT23	81,59	0,42
	NT32	83,12	0,41		NT33	74,05	0,80
	NT42	78,09	0,69		NT43	79,50	0,60
	NT52	66,93	1,11		NT53	76,11	0,68

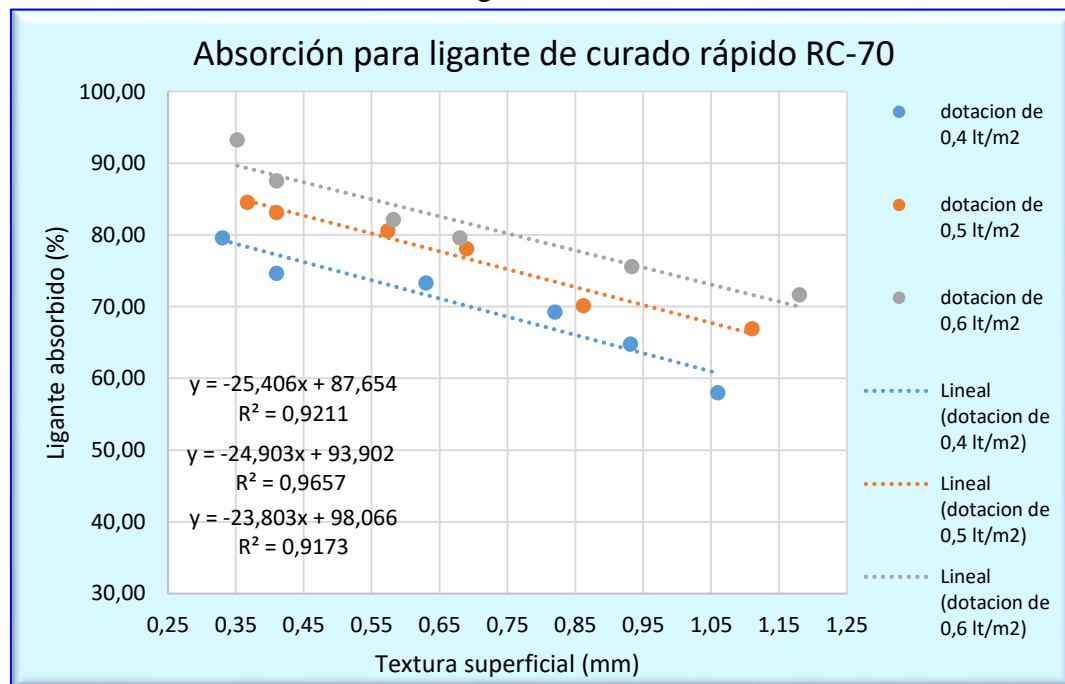
	NT62	70,17	0,86		NT63	70,96	0,98
0,6	NT12	87,58	0,41	0,6	NT13	84,83	0,59
	NT22	82,18	0,58		NT23	90,55	0,31
	NT32	75,58	0,93		NT33	86,55	0,46
	NT42	93,28	0,35		NT43	71,98	1,05
	NT52	71,69	1,18		NT53	72,84	0,79
	NT62	79,60	0,68		NT63	75,69	0,84

Fuente: Elaboración propia

De la tabla se puede identificar las diferentes variaciones de absorción de ligante, como se describió anteriormente esta variación se debe las diferentes texturas o rugosidades presentes en la superficie de las probetas en donde se realizó los ensayos de absorción.

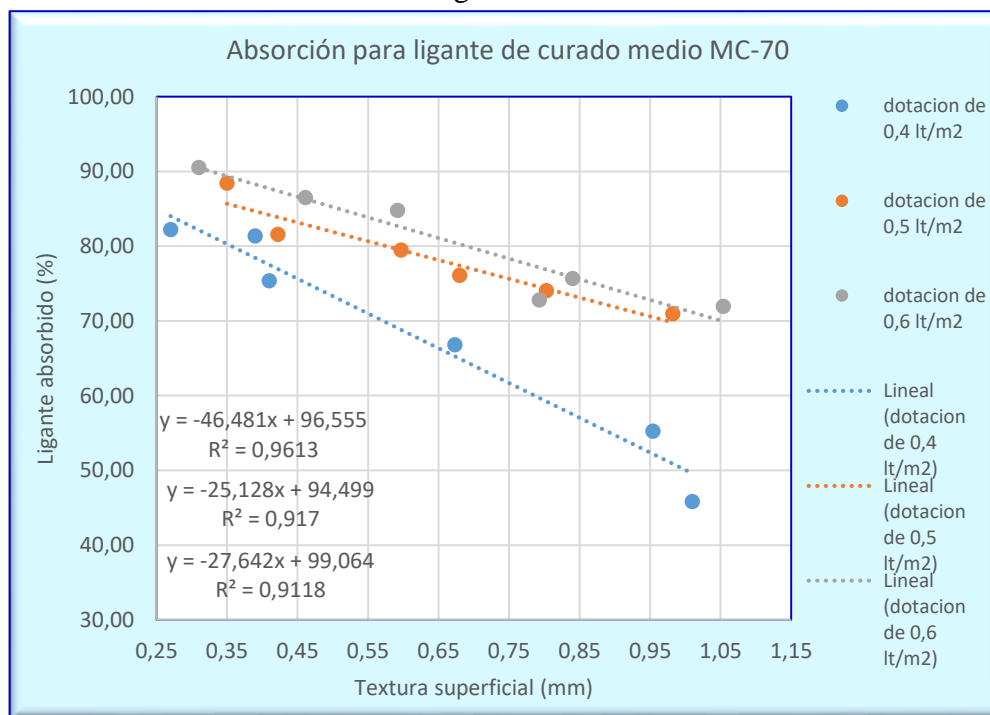
De estos resultados se realizó las correlaciones entre la dotación de ligante, la cantidad de absorción y el valor de la textura superficial, mediante un software estadístico SPSS Statistics V18.0.

Figura 3.111. Porcentajes de absorción en distintas texturas superficiales, para ligante RC-70



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.112. Porcentajes de absorción en distintas texturas superficiales, para ligante MC-70



Fuente: Elaboración propia

De las figuras 3.111 y 3.112, se pueden observar el comportamiento en cuanto a la absorción de ligante aplicado en distintas superficies. Para ambos casos se hace notar que el porcentaje de absorción del geotextil PP-200 va decreciendo conforme la superficie se hace más rugosa, y por el contrario el geotextil absorbe más cantidad de ligante en superficies con poca rugosidad. De esto se puede decir que la cantidad de absorción es inversamente proporcional a la rugosidad que presenta la superficie.

Con los resultados de absorción de acuerdo a la rugosidad superficial para las distintas dotaciones se realizó una correlación entre los porcentajes de absorción, las distintas rugosidades o textura superficial, del cual se obtuvo una ecuación para determinar un porcentaje de absorción tomando en cuenta la cantidad de ligante aplicado en litros por metro cuadrado, y el tipo de rugosidad de la superficie en milímetros.

La ecuación obtenida con el software estadístico de esta correlación entre la dotación de ligante, textura y absorción para ambos ligantes analizados es la siguiente:

$$Y = 50,012 a - 24,704b + 68,225 \quad \text{Para ligante de curado rápido RC-70}$$

Esta ecuación tiene un error de estimación o desviación de $\pm 2,35\%$ del resultado de absorción.

$$Y = 58,230 a - 35,175b + 70,247 \quad \text{Para ligante de curado rápido RC-70}$$

Esta ecuación tiene un error de estimación de $\pm 3,47\%$ del resultado de absorción.

Resultados obtenidos de las variables de la ecuación:

Ligante de curado rápido RC-70	Coefficientes no estandarizados B
constante	68,225
dotación de ligante (lt/m ²)	50,012
textura superficial (mm)	-24,704
R ²	0,936
Ligante de curado medio MC-70	Coefficientes no estandarizados B
constante	70,247
dotación de ligante (lt/m ²)	58,230
textura superficial (mm)	-35,175
R ²	0,945

Colocando las variables analizadas se tiene lo siguiente:

$$LA = 50,012 * DL - 24,704 * TS + 68,225$$

Donde:

LA = Ligante absorbido en (%).

DL = Dotación de ligante en (lt/m²).

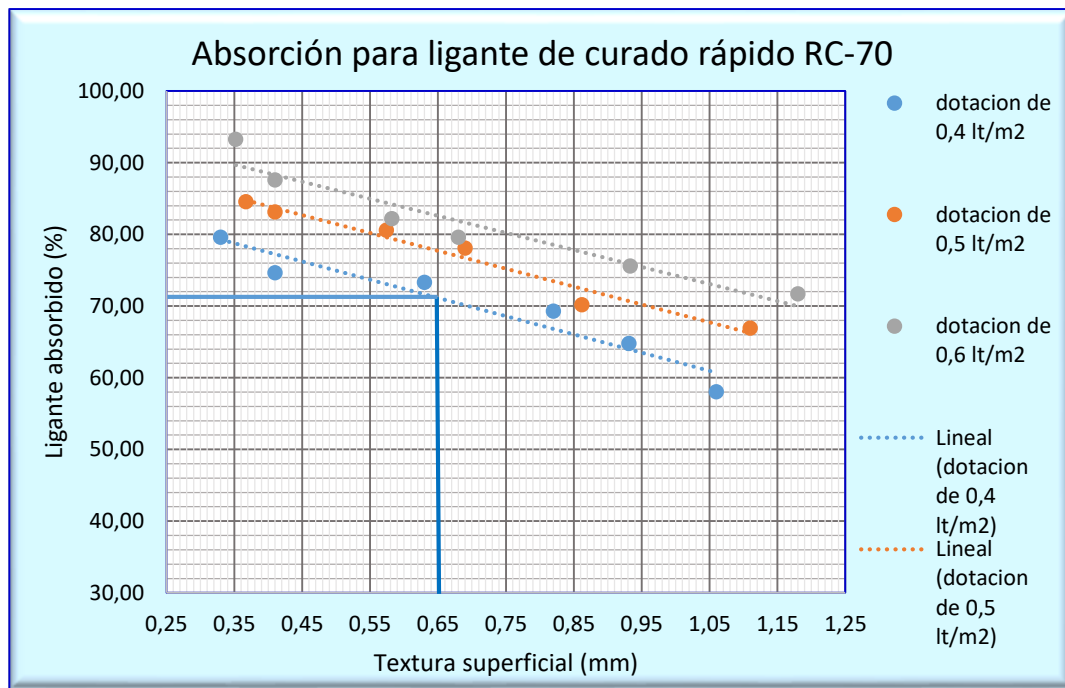
TS = Textura superficial (mm).

Verificación de los valores de absorción para una determinada dotación y textura superficial.

Ejemplo de cálculo:

Dotación de ligante: 0,4 lt/m² Textura superficial: 0,65 mm

Figura 3.113. Obtención de la absorción teórica para una tasa de 0,4 lt/m² y una textura de 0,65mm



Fuente: Elaboración propia

Para una dotación de 0,4 lt/m², y una textura de 0,65mm, con la ecuación de la correlación se tiene:

$$\%de\ absorcion = 50,012 * (0,4) - 24,704 * (0,65) + 68,225 = 72,17 \% \pm 2,35\%$$

El porcentaje teórico considerando el error de estimación estará entre: 70,17 – 73,86

De la gráfica se tiene: 71,5%

Con lo cual se verifica que el valor obtenido entra dentro del rango de absorción

Con todos los resultados obtenidos y el análisis realizado se puede decir que la metodología propuesta o sistema alternativo de medición, el cual tiene su base en la absorción de ligante, es influenciado en sus resultados por la rugosidad o textura de la

superficie sobre la que se aplica el ligante, por lo que no sería el más apropiado para la medición de ligante aplicado, si la textura superficial no es considerada previo a la medición del ligante.

3.11. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con la finalidad de comprobar la idoneidad del dispositivo para la medición del ligante aplicado con el cual se propone una metodología o sistema alternativo de medición de ligante, y la validación de los resultados obtenidos esta investigación se realizaron los siguientes trabajos.

Para validar los resultados obtenidos en esta investigación con el sistema alternativo de medición de ligante, se elaboraron 4 probetas prismáticas de las cuales se determinó la textura superficial, a estas probetas se les aplicó una dotación de riego de liga con una tasa de $0,45 \text{ lt/m}^2$ y $0,55 \text{ lt/m}^2$, una vez aplicado el ligante se procedió a realizar el ensayo de absorción, para así poder comparar los porcentajes de absorción del ensayo realizado con el porcentaje de absorción teórico obtenido con la ecuación formada de la correlación entre la dotación de ligante, textura superficial y el porcentaje absorbido y comprobar la dispersión de los resultados.

Los resultados obtenidos con las dos dotaciones de ligante de 0,45 litros por metro cuadrado y 0,55 litros por metro cuadrado, aplicadas a ambas caras de las probetas, para fines investigativos de validación fueron las siguientes:

Tabla 3.65. Resultados de absorción de ligante para una tasa de $0,45 \text{ lt/m}^2$

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m^2)					0,45
Cantidad de riego para un superficie de $25 \times 25 \text{ cm}^2$ en (gr)					25,01
Absorción de ligante					
Nº	Peso inicial	Peso final	Textura	Cantidad absorbida	% de absorción
	gr	gr	mm	gr	%
1	26,6	46,82	0,43	20,22	80,85
2	26,5	47,3	0,33	20,80	83,17
3	25,9	44,63	0,61	18,73	74,89
4	27,1	46,2	0,55	19,10	76,37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.66. Resultados de absorción de ligante para una tasa de 0,55 lt/m²

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					0,55
cantidad de riego para un superficie de 25x25 cm ² en (gr)					30,56
Absorción de ligante					
Nº	Peso inicial	Peso final	Textura	Cantidad absorbida	% de absorción
	gr	gr	mm	gr	%
1	27,1	51,83	0,57	24,73	80,92
2	26,6	52,1	0,42	25,50	83,44
3	25,9	49,6	0,81	23,70	77,45
4	26,1	51,3	0,46	25,20	82,46

Fuente: Elaboración propia

Colocando los valores de la textura y dosis de ligante en la ecuación de la correlación se tiene:

Para dosis de 0,45 lt/m²

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,45 - 24,704 * 0,43 + 68,225 = 80,11 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,45 - 24,704 * 0,33 + 68,225 = 82,57 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,45 - 24,704 * 0,61 + 68,225 = 75,66 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,45 - 24,704 * 0,55 + 68,225 = 77,14 \%$$

Para dosis de 0,55 lt/m²

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,55 - 24,704 * 0,57 + 68,225 = 81,65 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,55 - 24,704 * 0,42 + 68,225 = 85,35 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,55 - 24,704 * 0,81 + 68,225 = 75,72 \%$$

$$\% \text{ absorcion} = 50,012 * 0,55 - 24,704 * 0,46 + 68,225 = 84,36 \%$$

De los resultados obtenidos realizando el ensayo de absorción en las probetas y los valores teóricos de absorción obtenidos mediante la ecuación de la correlación, se puede observar que para una dotación de 0,45 lt/m² realizando el ensayo se obtuvo valores de entre 74,89% para una textura superficial de 0,61mm y un valor máximo de

83,17% para una textura de 0,33mm, comparando con el valor obtenido con la ecuación para las mismas texturas se tienen valores de $75,66\% \pm 2,35$ (0,61mm) y $82,57\% \pm 2,35$ (0,33mm), donde los valores obtenidos con el ensayo son relativamente iguales, los cuales entran dentro del rango de errores y desviación.

De igual forma para una dotación de $0,55 \text{ lt/m}^2$ los resultados del ensayo fueron de 77,45% para una rugosidad de 0,81mm cuyo valor está dentro del rango del valor calculado mediante la ecuación el cual es $75,72\% \pm 2,35$ ($73,95\% - 77,49\%$), así también el valor máximo que se obtuvo del ensayo es de 83,44% para una rugosidad de 0,42mm, este valor de igual forma entra dentro de los rangos de desviación y errores de la correlación cuyo resultado de absorción fue $85,35\% \pm 2,35$ (0,42mm).

Con esto se puede verificar que los resultados de absorción son aceptables, y de esta manera se puede mejorar el control de la dotación del ligante aplicado, y que esta pueda ser ventajoso respecto al método estandarizado ya que este con dicho método solo se controla la cantidad sin considerar la superficie sobre la que se aplica.

Medición en campo

Se realizó una medición en campo con la finalidad de comparación del sistema alternativo propuesto en esta investigación con el sistema estandarizado de medición el cual es el uso de bandejas para la medición del ligante aplicado.

La medición en campo se lo realizó en el Proyecto de Asfaltado de la Carretera Entre Ríos – Palos Blancos, el cual es realizado por la Empresa EUROFINSA S.A.

Esta medición con el dispositivo se hizo para el riego de imprimación bituminosa, si bien este riego de ligante no es el estudiado en esta investigación, al ser las tasas de aplicación mayores al del riego de liga. La medición se lo realizó solo con el objetivo de comparación del sistema propuesto (dispositivo de medición con la utilización de geotextil) y el sistema estandarizado (uso de bandejas para la medición de cantidad ligante).

Figura 3.114. Riego de imprimación para la conformación de la carpeta asfáltica
Proyecto de asfaltado de la carretera Entre Ríos – Palos Blancos



Fuente: Elaboración propia

Para el riego de imprimación en proyecto de asfaltado la empresa encargada utilizó el ligante tipo MC-30, cuya dosificación es de cemento asfáltico (52%) y como solvente kerosene (48%). La tasa de ligante especificada para el riego de imprimación varía de 0,8 a 1,60 lt/m² conforme al tipo y textura de la base y del material bituminoso elegido. (Informe de especificaciones técnicas, Ceinsa, Eurofinsa).

Una vez que se hizo el riego de imprimación se realizó las mediciones obteniéndose los resultados siguientes.

Riego de imprimación:

Progresiva de inicio: 43+380

Progresiva final: 44+120

Carril: derecho

Tasa de ligante: 1,0 lt/m²

Figura 3.115. Determinación del peso de las bandejas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.116. Extracción de la bandeja después de la aplicación del ligante



Fuente: Elaboración propia

Método de las bandejas

Las bandejas utilizadas para este ensayo de medición de ligante, eran de dimensión de 30 x 30 cm.

Tabla 3.67. Resultados de la medición de la cantidad de riego de imprimación, usando el método de las bandejas

Densidad MC-30			0,932	gr/m ³	
Área bandeja	Peso inicial	Peso final	Ligante en la bandeja	Peso de ligante	dosis de ligante
m ²	gr	gr	gr	gr/m ²	lt/m ²
0,09	544	632	88	977,78	1,05
0,09	600	699	99	1100,00	1,18
0,09	581	675	94	1044,44	1,12
0,09	571	657	86	955,56	1,03

Fuente: Laboratorio de la empresa

Medición de la cantidad de ligante con el sistema propuesto en esta investigación

Figura 3.117. Medición del ligante con el geotextil



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.68. Resultados de la absorción del riego de imprimación utilizando geotextil

Geotextil no tejido					PP-200
Tasa de riego de liga ensayado (lt/m ²)					1
área de la placa metálica 25x25 cm					0,0625
densidad de MC-30 (gr/cm ³)					0,932
Absorción de ligante					
Prueba	Peso inicial	Peso final	Cantidad absorbida	% de absorción	Dosis de ligante
N°	gr	gr	gr	%	lt/m ²
1	26,8	78,3	51,50	88,41	0,88
2	27,3	80,4	53,10	91,16	0,91
3	26,1	75,1	49,00	84,12	0,84
4	24,6	69,6	45,00	77,25	0,77

Fuente: Elaboración propia

De los resultados que se presentan en la tabla 3.67 (método de bandejas) y tabla 3.68 (método de absorción), se puede observar que los resultados obtenidos de medición del riego de imprimación mediante el uso de bandejas dieron valores de entre 1,03 lt/m² (mínimo), y un valor máximo de 1,18 lt/m², este alto valor podría deberse a que el ligante extendido a parte de quedar dentro de la superficie de la bandeja también el ligante queda adherido en las paredes externas de la bandeja lo cual podría variar el valor del peso final de la bandeja.

De igual forma se observa los resultados obtenidos con el sistema propuesto (absorción de ligante), cuyos valores de absorción fueron 77,25% (0,77 lt/m²) como mínimo, y un máximo de 91,16% (0,91 lt/m²) los cuales son menores a la cantidad de ligante especificado que fue de 1,0 lt/m², estos resultados son debido a influencia del material de la capa base, ya que una vez que el ligante es aplicado, el solvente del riego de imprimación es absorbido por el material de la capa base, haciendo variar de esta manera a la absorción del geotextil.

De esta comparación realizada para la medición de ligante, entre el método de las bandejas y el sistema alternativo propuesto, se observa que los resultados de control de la cantidad de ligante, más cercanos a la cantidad especificada fue con el uso de las bandejas, mientras que los resultados obtenidos con el sistema alternativo fueron muy

por debajo de la cantidad especificada, concluyendo así de que esta metodología no es la apropiada para la medición de riegos de imprimación.

3.12. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos se realizará para la dotación de riego de liga que presentó un alto valor de resistencia a corte, determinado mediante el ensayo de corte siguiendo el método LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona). De igual forma se analizará el costo del geotextil no tejido, dicho material es usado para el ensayo de absorción, (metodología alternativa de medición de ligante).

Análisis de costo de geotextil PP-200

Precio del geotextil (bs/m²): el metro cuadrado de geotextil tiene un costo de **12,50 Bs.** (fuente: Guía industrial y de construcción, revista de precios unitarios, 2017).

Las dimensiones del geotextil para ser usado en el dispositivo de medición es de 30 x 30 cm. por lo tanto el costo de material por punto de medición será aproximadamente de 1,13 bs.

Análisis de costo de riego de liga

El análisis de costo para el riego de liga de curado rápido RC-70 y de curado medio MC-70, para una dotación de 0,5 litros por metro cuadrado, se detallarán en las planillas de precio unitario.

La dosificación del riego de liga para esta dotación de ligante es de 37% de solvente y 63% de cemento asfáltico, esta dosificación y el análisis de costo será para un área de 1 metro cuadrado.

Planilla de costos de riego de liga de curado rápido para una tasa de 0,5 lt/m²

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
Proyecto:	VALORACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA DOTACIÓN DE RIEGO DE LIGA			Item:	1
Actividad:	RIEGO DE LIGA DE CURADO RAPIDO RC-70				
Unidad:	m2				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
Nº	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	cemento asfatico (C.A. 85-100)	kg	0,320	7,85	2,51
2	Gasolina	lt	0,185	3,74	0,69
TOTAL MATERIALES					3,20
2.MANO DE OBRA					
Nº	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	chofer	hr	0,001	15	0,02
2	ayudante	hr	0,002	12,5	0,03
3	operador planta	hr	0,001	18,75	0,02
4	capataz	hr	0,001	17,5	0,02
SUBTOTAL MANO DE OBRA					0,08
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				65	0,05
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	0,02
TOTAL MANO DE OBRA					0,15
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
Nº	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	camion distribuidor de asfalto	hr	0,001	223	0,22
2	escoba mecanica	hr	0,001	35	0,04
3	planta diluidora de asfalto	hr	0,001	389	0,39
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5	0,01
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					0,65
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Gastos generales = % de 1+2+3				26	
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					1,04
5. UTILIDAD					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Utilidad= % de 1+2+3+4				10	
COSTO TOTAL UTILIDAD					0,51
6. IMPUESTOS					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	
COSTO TOTAL IMPUESTOS					0,17
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					5,73
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Bs.)					5,73

Análisis de costos de riego de liga de curado medio para una tasa de 0,5 lt/m²

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
Proyecto:	VALORACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA DOTACIÓN DE RIEGO DE LIGA			Item:	1
Actividad:	RIEGO DE LIGA DE CURADO MEDIO MC-70				
Unidad:	m2				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	cemento asfatico (C.A. 85-100)	kg	0,320	7,85	2,51
2	Kerosene	lt	0,185	2,72	0,50
TOTAL MATERIALES					3,02
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	chofer	hr	0,001	15	0,02
2	ayudante	hr	0,002	12,5	0,03
3	operador planta	hr	0,001	18,75	0,02
4	capataz	hr	0,001	17,5	0,02
SUBTOTAL MANO DE OBRA					0,08
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				65	0,05
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	0,02
TOTAL MANO DE OBRA					0,14
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	camion distribuidor de asfalto	hr	0,001	223	0,22
2	escoba mecanica	hr	0,001	35	0,04
3	planta diluidora de asfalto	hr	0,001	389	0,39
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5	0,01
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					0,65
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Gastos generales = % de 1+2+3				26	
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					0,99
5. UTILIDAD					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Utilidad= % de 1+2+3+4				10	
COSTO TOTAL UTILIDAD					0,48
6. IMPUESTOS					
				PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	
COSTO TOTAL IMPUESTOS					0,16
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					5,45
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Bs.)					5,45

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- ❖ Como conclusión general se observó que la metodología alternativa propuesta en el presente trabajo, el cual se basa en la absorción de ligante, es directamente influenciado por la textura de la superficie y de las dotaciones de ligante, y no tanto así por el tipo de ligante utilizado.
- ❖ Se observa que el riego de liga es necesario para asegurar la correcta unión entre capas asfálticas, ya que aumenta la resistencia al deslizamiento entre estas, dando así una mayor durabilidad al pavimento. Para esto la aplicación de riego debe ser con una dosificación adecuada, el cual debe ser correctamente controlado en obra.
- ❖ Se encontró en el ensayo de corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), una metodología para medir la adherencia, que es de fácil aplicación.
- ❖ Se pudo comprobar que no existe una única dotación de riego de adherencia ya que esta estará en función a la tasa de ligante utilizado y el tipo de mezcla utilizada, como también se puede notar que es necesario tomar en cuenta la rugosidad superficial. Para lo cual en esta investigación se pudo determinar que el rango adecuado de dotaciones que mejores resultados de resistencia al corte dieron, están entre $0,4 \text{ lt/m}^2$ y $0,6 \text{ lt/m}^2$.
- ❖ Si se relacionan los resultados de los ensayos de corte LCB, con los que se obtienen las dotaciones optimas de riego de liga para el tipo de mezcla asfáltica utilizado, y los resultados del ensayo de absorción de ligante se podrá establecer una correlación con la cual se pueda determinar porcentajes teóricos de

absorción en función al tipo de mezcla asfáltica y la dotación de riego, y comprobar con el dispositivo de medición utilizado en esta investigación, si el riego de liga efectivo que queda en la superficie el cual equivale al porcentaje absorbido por el geotextil, es el mismo que el riego de liga calculado en laboratorio, los cuales garantizan una buena adherencia entre capas.

- ❖ Se pudo evidenciar que la textura que presenta la superficie, en la cual se realiza el ensayo, influye en la absorción del geotextil, ya que la absorción disminuye a medida que aumenta la rugosidad superficial, tal como se vio en los resultados presentados en el cual se vio la variación de la absorción para una misma dotación, dando valores mínimos de absorción cercanos al 40%. Esto debido a que en las probetas que tenían poca rugosidad el ligante aplicado permanecía casi en su totalidad en la superficie, mientras que en las superficies rugosas el ligante fluye hacia los huecos o rugosidades reduciendo así el ligante que permanece en la superficie.
- ❖ Se comprobó que el geotextil de gramaje 200 gr/m^2 tiene una mayor capacidad de absorción, que el geotextil de gramaje 300 gr/m^2 , haciendo que su uso sea el adecuado para la utilización con el dispositivo.
- ❖ Se observa también que el dispositivo de medición de ligante aplicado en obra, planteado en esta investigación resulta beneficioso ya que permitirá la medición del riego de liga que permanece en la superficie, la misma que está encargada de unir a las dos capas. Los valores de absorción del geotextil que representa al ligante que permanece en la superficie serán los adecuados, siempre y cuando se tome en cuenta a la textura superficial del pavimento en donde se aplicará el riego de liga.

4.2.Recomendaciones

- ❖ Como una recomendación particular, es preciso la utilización de una indumentaria adecuada para la realización de las mezclas asfálticas, con el fin de evitar cualquier accidente. También es necesario tener precaución durante la dosificación del riego de liga ya que para ello se hace uso de gasolina y keroseno como solvente, los cuales son inflamables, por eso se recomienda trabajar en una zona alejada del fuego.
- ❖ Se pudo observar que al aplicar un dosis de riego de $0,7\text{lt/m}^2$ ocurrió un fenómeno que es el de ligante en exceso, ya que al realizar la compactación de la segunda capa asfáltica el ligante era expulsado por alrededor de la briqueta. Dando valores erróneos de resistencia al corte. Es por eso que es recomendable mantener la dotación de entre $0,4\text{ lt/m}^2$ a un máximo de $0,6\text{ lt/m}^2$, para obtener valores adecuados de adherencia ya que como se vio en el análisis de resultados, a partir de la dotación de $0,5\text{ lt/m}^2$ la resistencia a corte iba en disminución.
- ❖ Como un parámetro razonable para una buena adherencia es recomendable que se cumpla con al menos $0,3\text{ Mpa}$ de resistencia al corte, esto según las investigaciones realizadas.
- ❖ Se recomienda tomar en cuenta la textura superficial para que los valores que se obtengan al realizar el ensayo de absorción con el dispositivo, den valores más precisos de la cantidad de ligante efectivo que permanece en la superficie, la cual será la encargada de unir las capas asfálticas.
- ❖ Se pudo observar que para riegos de imprimación la absorción del geotextil es influenciada por el material de la capa base, ya que el material de la capa base absorbe rápidamente el solvente del riego de imprimación haciendo que el geotextil no tenga una buena absorción, comparando con el método de las bandejas

que dio resultados más cercanos a cantidad aplicada. Por ello no es recomendable el uso de la metodología alternativa para el control de dotación de riego de imprimación.