

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El asfalto en nuestro país y en todo el mundo se ha convertido en el principal material para la construcción de carreteras, principalmente elegido por su rapidez de construcción y sus buenas propiedades de funcionalidad y durabilidad. Se tiene la necesidad de hacer muchas investigaciones cuya finalidad es obtener un material más durable pero que mantenga sus propiedades de funcionalidad.

La importancia de la adherencia de los asfaltos rebajados y emulsiones asfálticas utilizadas como “riego de liga” en pavimentos construidos con mezclas asfálticas ha sido predominantemente ignorado, es así que una mala adherencia del riego de liga puede influir en una falla prematura de una carpeta asfáltica.

La realidad es que la tecnología actual de riegos de adherencia, basada en asfaltos normales o de asfalto modificado con emulsiones, no consigue que dicha adherencia ideal se consiga por varios motivos: Cobertura inicial deficiente, compatibilidad agregado-emulsión deficiente, transferencia a la maquinaria, y poca penetración en la capa base o asfalto fresado. Adicionalmente, la impermeabilización de las grietas y la permanencia de la adherencia asfalto-sustrato con el tiempo y, particularmente, en condiciones de humedad y trampas de vapor.

Si se manifiesta una mala adherencia en capas disminuye considerablemente la vida útil de la estructura asfáltica, para esto se propone la investigación a través de ensayos de riego de liga con nanomateriales (polvo de silicio y grafito) existentes en nuestro medio para mejorar la adherencia entre la base granular y el concreto asfáltico.

En este trabajo, se presentará el papel de nanomateriales a base de organosilanos solubles en agua y asfalto como tecnología capaz de conseguir simultáneamente varias mejoras de los riegos de adherencia tales como: Unión química del asfalto de la emulsión con la capa base, mejora de la cobertura por reducción de la tensión superficial, efecto anti-transferencia, mejor mojabilidad y reducción de espesor en el film de asfalto para una mejor transferencia de carga. Todos estos efectos se basan en

la multifunción de la molécula como surfactante de la fase acuosa inicialmente, como agente de “mojabilidad” en el contacto con el agregado/asfalto y como promotor de adherencia, una vez el riego cura completamente.

## **1.2 Justificación**

Durante su vida útil los pavimentos asfálticos están sometidos a distintos tipos de esfuerzos. El cálculo estructural de los distintos componentes se realiza suponiendo que existe una perfecta adherencia entre las distintas capas. Se asume que estas se comportan de manera monolítica, sin embargo, esto no ocurre en la realidad. Problemas como “fisuras o grietas parabólicas” así como un “arrollamiento transversal”, son patologías que pueden ser atribuidas a una deficiencia en la adherencia de las capas de mezclas asfálticas. La calidad de los materiales, así como una correcta fase constructiva deberán asegurar el mejor comportamiento del pavimento terminado. La importancia de la adherencia de los Asfaltos rebajados y emulsiones asfálticas utilizadas como “riego de liga” en pavimentos con mezclas asfálticas en ha sido predominantemente ignorado, es así que una mala adherencia del riego de liga puede influir en una falla prematura de una carpeta asfáltica.

Para mejorar la deficiencia mencionada anteriormente, en este trabajo se presentará el papel de nanomateriales (Polvo de Silicio y Grafito) a base de organosilanos solubles en agua y asfalto como tecnología capaz de conseguir simultáneamente varias mejoras de los riegos de adherencia tales como: Unión química del asfalto de la emulsión con la capa base, mejora de la cobertura por reducción de la tensión superficial, efecto anti-transferencia, mejor mojabilidad y reducción de espesor en el film de asfalto para una mejor transferencia de carga. Todos estos efectos se basan en la multifunción de la molécula como surfactante de la fase acuosa inicialmente, como agente “wetting” o de “mojabilidad” en el contacto con el agregado/asfalto y como promotor de adherencia, una vez el riego cura completamente.

El análisis consiste en modificar el riego de liga con nanomateriales para mejorar la propiedad de adherencia entre capas de base de suelo granular y carpeta de rodadura

de pavimento flexible, también mejorar la propiedad de una mejor impermeabilización de la superficie y la mejora en puesta en obra y durabilidad del riego de liga cumpliendo especificaciones técnicas para una que el riego de liga tenga una mejor durabilidad ante el efecto de las cargas y efectos de la humedad.

Los resultados que se obtengan del estudio permitirán su mayor utilización en los proyectos viales de nuestra región aprovechando las ventajas técnicas del producto en estudio que a la larga nos traerá ahorro económico.

### **1.3 Planteamiento del problema**

#### **1.3.1 Situación problemática**

La realidad es que la tecnología actual de riegos de adherencia, basada en emulsiones normales o emulsiones de asfalto modificado, no consigue que dicha adherencia ideal se consiga por varios motivos: Cobertura inicial deficiente o exceso de cobertura creando charcos de riego de liga, compatibilidad agregado-emulsión deficiente, transferencia a la maquinaria, y poca penetración en la capa base. Adicionalmente, la impermeabilización de las grietas y la permanencia de la adherencia con el tiempo y, particularmente, en condiciones de humedad y trampas de vapor.

Ante esto nace la importancia de realizar una investigación para la modificación de riego de liga con nanomateriales para mejorar la adherencia entre capa base y capa asfálticas en caliente que mejorará la durabilidad del riego, y al mismo tiempo mejorar la puesta en obra, para la cual se utilizará nuevas metodologías y materiales para la constitución y mejoramiento y durabilidad del riego de liga.

Se pudo evidenciar que una capa de adherencia en exceso puede crear un plano de deslizamiento entre las dos capas de pavimento ya que el asfalto actúa más bien como un lubricante en lugar de un adherente. Puede crear en la superficie del nuevo pavimento áreas blandas o de "sangrado", condiciones que no solamente son invisibles, sino que producen pavimentos peligrosamente estabilizados.

La adherencia final conseguida entre capas depende no sólo de cómo se haya realizado el riego, si no que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa inferior, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de como se ha ejecutado la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla.

El control se reduce a una mera inspección visual del riego efectuado y al control de la dotación del mismo, pero no se verifica la calidad final conseguida en la adherencia de las capas, que es lo que en realidad se debería medir.

Ante esto nace la importancia de realizar una investigación para la modificación de riego de liga con nanomateriales para mejorar la adherencia entre capa base y capa asfálticas en caliente que mejorara la durabilidad del riego, y al mismo tiempo mejorar la puesta en obra, para la cual se utilizará nuevas metodologías y materiales para la constitución y mejoramiento y durabilidad del riego de liga.

En nuestro país existe poco avance en cuanto a la mejora de los materiales asfálticos, se sigue trabajando con la mismos materiales durante años y no se hace nada por mejorar, se ve como nuestros pavimentos flexibles a los pocos años de uso ya presentan fallas en su estructura debido a muchos factores y uno de ellos es la deficiencia en la adherencia entre capas factor que se le atribuye a los riegos de liga, a la mala puesta en obra y otros factores.

Ante esta situación se propone la utilización de la nanotecnología a través de los nanomateriales como el polvo de silicio y el grafito compuesto de carbono, ya que hoy en día se están realizando diferentes combinaciones de materiales con el fin de mejorar las propiedades de los asfaltos como: la unión química del asfalto de la emulsión con el sustrato, mejora de la cobertura por reducción de la tensión superficial, la mejora en puesta en obra, la incorporación de nanomateriales en los riego de liga con diferentes granulometrías de mezclas asfálticas a adherir, y con ello proponer una buena combinación de los nanomateriales en los asfaltos para alargar la vida útil de nuestras vías de asfalto flexible.

### **1.3.2 Problema**

¿Cuál es el comportamiento de los nanomateriales (polvo de silicio y grafito) incorporados en combinación con el riego de liga para mejorar sus propiedades en pavimentos flexibles?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar la mejora de puesta en obra y durabilidad de los riegos de liga con la incorporación de nanomateriales a través de ensayos de laboratorio para mejorar la adherencia entre la base granular y la mezcla asfáltica.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Recopilar la información teórica referente al tema en investigación.
- ✓ Seguir paso a paso la metodología y recomendaciones de la guía de laboratorio para la correcta realización de los ensayos de laboratorio.
- ✓ 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 la capa base y de los materiales que conforman la mezcla asfáltica convencional para la elaboración de las probetas.
- ✓ Elaborar un riego de liga convencional y un riego de liga modificado con nanomateriales (polvo de silicio y grafito) en diferentes porcentajes.
- ✓ Evaluar la propiedad de adherencia del riego de liga modificado con nanomateriales, a través de la elaboración de probetas bicapa por medio del ensayo de corte (adherencia), para posteriormente determinar el contenido óptimo de nanomaterial (polvo de silicio o grafito) que deberá tener el ligante asfáltico para tener una mejor adherencia entre capas.
- ✓ Realizar un análisis de costos del riego de liga convencional y un riego de liga modificado con nanomateriales (polvo de silicio y grafito).

- ✓ Realizar un análisis comparativo de adherencia entre capas a través de gráficos estadísticos entre riego de liga modificado con nanomateriales y el riego de liga convencional.
- ✓ Realizar una buena redacción de las conclusiones y recomendaciones de nuestro estudio.

## **1.5 Hipótesis**

La incorporación de porcentajes de nanomateriales (polvo silicio y grafito) en combinación con los riegos de liga nos permitirá mejorar la propiedad de adherencia entre capas y durabilidad de un pavimento asfáltico flexible para la construcción de pavimentos más estables y duradero respecto al tiempo.

## **1.6 Definición de variables independientes y dependientes**

Las variables en la investigación, representan un concepto de vital importancia dentro de un proyecto. Las variables, son los conceptos que forman enunciados de un tipo particular denominado hipótesis.

### **1.6.1 Variable independiente**

Una variable independiente es considerada un fenómeno a la que se le va a evaluar su capacidad para influir, incidir o afectar a otras variables.

En investigación experimental se llama así, a la variable que el investigador manipula para ver los efectos que produce en otra variable, su nombre lo explica de mejor modo en el hecho que de no depende de algo para estar allí.

Para nuestra investigación la variable independiente es el **RIEGO DE LIGA** por cuanto ésta no depende de algo para su aplicación y es la variable que vamos a manipular para mejorar sus propiedades.

### **1.6.2 Variable dependiente**

Una variable dependiente es una Propiedad o característica que se trata de cambiar mediante la manipulación de la variable independiente. Cambios sufridos por los sujetos como consecuencia de la manipulación de la variable independiente por parte

del experimentador. En este caso el nombre lo dice de manera explícita, va a depender de algo que la hace variar.

Las variables dependientes son las que se miden.

En nuestra investigación las variables dependientes serán:

- Porcentajes de polvo de silicio y grafito.
- La adherencia existente entre capas.

## **1.7 Diseño metodológico**

### **1.7.1 Componentes:**

#### **1.7.1.1 Unidades de estudio y decisión muestral**

Las unidades de estudio y decisión muestral son las siguientes:

##### **1.7.1.2 Unidades de estudio**

Para nuestro estudio de investigación la unidad de estudio son los cementos asfálticos para pavimentos aplicados en riego de liga.

##### **1.7.1.3 Población de estudio**

Como población de estudio tenemos a los cementos asfálticos diluidos para los riegos de liga.

##### **1.7.1.4 Decisión muestral**

En nuestra investigación tenemos los cementos asfálticos diluidos mezclados con nanomateriales.

## **1.8 Métodos y técnicas empleadas**

Para el presente estudio de investigación se empleará el método inductivo y la técnica experimental.

### **1.8.1 Método inductivo**

El método inductivo es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares. Es método científico más usual en el que pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación para hechos de un registro; la clasificación y estudios de estos hechos; la derivación inductiva que parte de los hechos y permite llegar a una generalización; y la contrastación. Esto supone que, tras una primera etapa de observación, análisis y clasificación de los hechos se logra postular una hipótesis que brinda una solución al problema.

Se aplicará el método inductivo en la investigación revisando y siguiendo normas y guías de pavimentos establecidas en nuestro país para realizar los ensayos de laboratorio, ya que la idea de utilizar distintos tipos de materiales para mejorar propiedades de otro no es nada nueva ya que se tiene conocimiento que data desde la antigüedad, todo esto como metodología constructiva para mejorar las propiedades de adherencia entre capas de pavimento.

La metodología y estudios consistirán en realizar pruebas experimentales de laboratorio que ayuden a establecer de manera precisa parámetros reales, que sirvan de apoyo para implantar recomendaciones técnicas a la hora de utilizar nanomateriales en los cementos asfálticos.

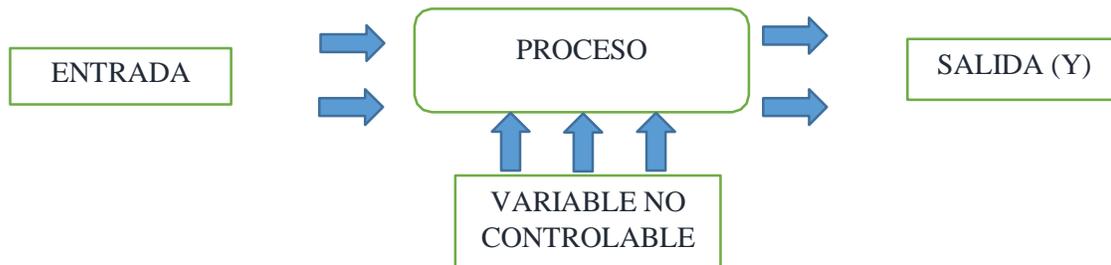
Debido a que los datos obtenidos en los proyectos investigativos son de pruebas empíricas y consentimiento del investigador, este proyecto busca establecer resultados experimentales reales, los cuales servirán de guía y recomendación propia del autor. La metodología consiste primeramente en la caracterización de los materiales a utilizar en el desarrollo de la investigación siguiendo parámetros y normas ya establecidas en nuestro país, primeramente, se caracterizará el material granular que se utilizará en la mezcla asfáltica a través de ensayos en el laboratorio, posteriormente se caracterizará el cemento asfáltico a utilizar a través de ensayos en laboratorio.

Se caracterizará también una capa base tipo a través de ensayos de laboratorio de suelos para conocer las propiedades del mismo y su posterior clasificación.

## 1.8.2 Técnicas empleadas

### 1.8.2.1 Diseño experimental

El diseño experimental es un método estadístico que se aplica en investigaciones experimentales en diferentes áreas: agricultura, industria, medicina, etc. Permite conocer mejor las variables involucradas en un proceso como una caja negra.



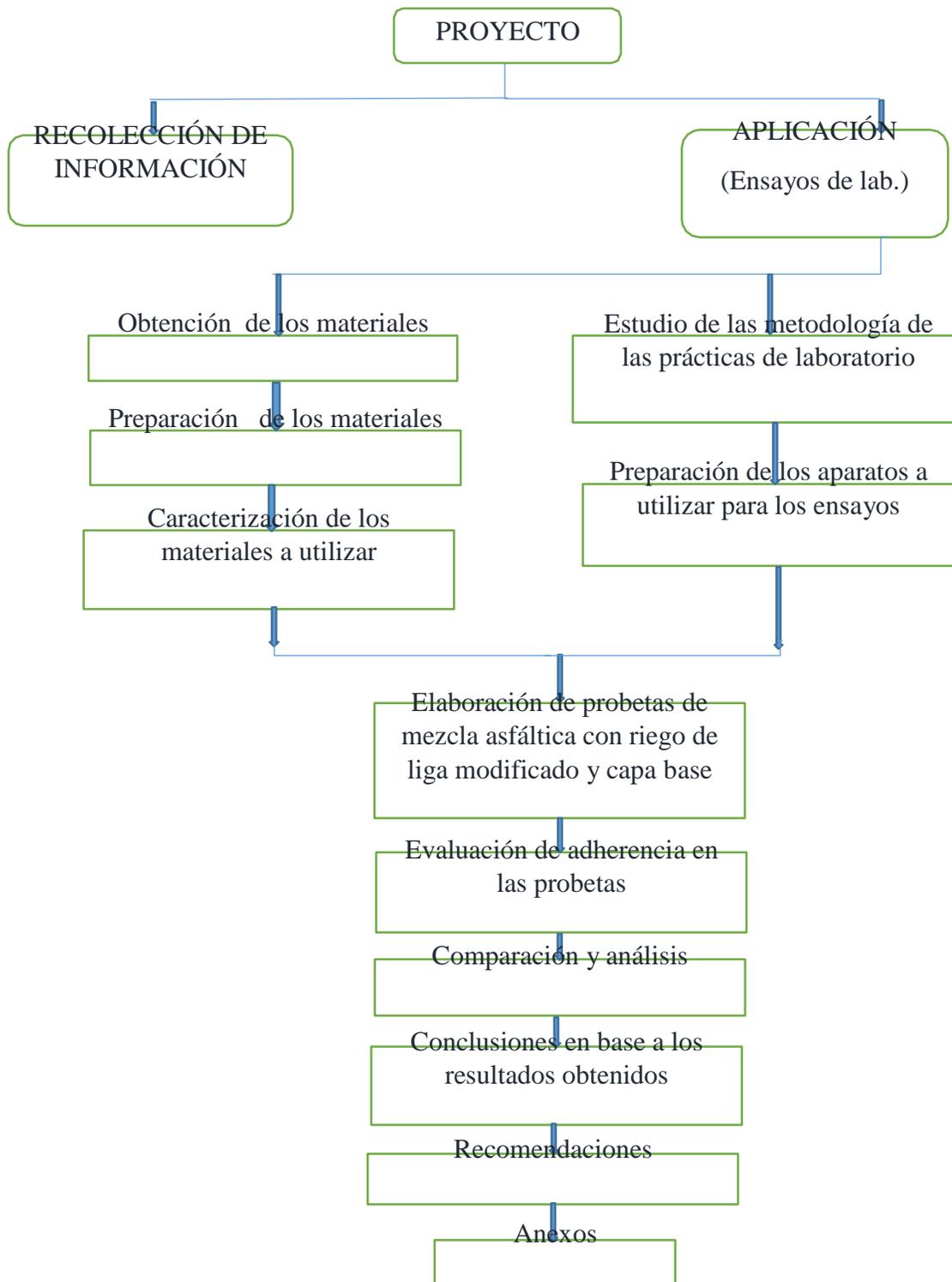
### 1.8.2.2 Técnica

La técnica a utilizar será experimental a través de ensayos sobre el material en estudio para evaluar sus propiedades.

El concepto del trabajo es la determinación de la fuerza de adherencia  $F_a$ , midiendo el esfuerzo de corte necesario que produce el deslizamiento o rompe la adherencia existente entre la carpeta de rodadura y la base, este ensayo nos permitirá determinar el grado de adherencia que se genera en un riego de liga modificado con nano materiales en comparación con un riego de liga convencional.

### 1.8.3 Metodología

Flujograma de proceso de la investigación a realizar



## **1.8.4 Técnicas de muestreo**

### **1.8.4.1 Técnicas de muestreo no probabilística**

El muestreo es no probabilístico que se aplicará para la obtención del cemento asfáltico, riego de liga y materiales de aportación.

Los agregados de aportación se lo obtendrá de la chancadora “Garzón” y el cemento asfáltico se los obtendrá de la planta de almacenamiento del SE.DE.CA., de la ciudad de Tarija.

El polvo de silicio y grafito se lo obtendrá de empresas o laboratorios químicos de nuestro medio.

### **1.8.4.2 Descripción de equipos e instrumentos**

#### **1.8.4.2.1 Para la caracterización de los agregados de capa base**

**Horno eléctrico.-** Es utilizado para el secado agregados de la capa base y debe contar con una temperatura constante entre 100 y 110 grados centígrados.

**Balanza.-** Es usada para obtener los distintos que se requieran con una sensibilidad de 0.1 gr.

**Juego de tamices.-** El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11.

**Molde de compactación.-** Usado para determinar el contenido óptimo de humedad para su compactación.

**Molde de CBR.-** Usado para determinar la resistencia del suelo en estudio.

**Aparato casa grande.-** Equipo que será usado para determinar los límites líquido y plástico de la capa base si esta los tiene.

#### **1.8.4.2.2 Para caracterización de los asfaltos.**

**Penetrómetro de asfalto.-** Aparato para determina la penetración del betún.

**Viscosímetro de Saybolt.-** Instrumento para determinar la viscosidad del asfalto.

**Cleveland de copa abierta.-** Aparato para determinación de punto de inflamación con el cual se determinará el punto de ignición.

**Ductilímetro.-** Instrumento con el cual se determinará la ductilidad del asfalto a una temperatura de 25 grados centígrados.

**Picnómetro.-** Instrumento que sirve para determinar la densidad o peso específico del cemento asfáltico en estudio.

#### **1.8.4.2.3 Para caracterización de los agregados para la mezcla asfáltica**

**Balanza.-** Es usada para obtener los distintos que se requieran con una sensibilidad de 0.1 gr.

**Juego de tamices.-** El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11.

**Cesto cilíndrico.-** Canasta metálica hecha de malla metálica N 4, nos permitirá determinar el peso específico y absorción del agregado grueso.

**Matraz de 500 ml.-** Aparato que nos permitirá determinar el peso específico y absorción del agregado fino.

**Recipientes cilíndricos.-** Son cilindros que nos permitirán determinar el peso unitario de los agregados.

**Máquina de desgaste de los ángeles.-** Consiste en un tambor hueco de acero cerrado en ambos extremos y con esferas de acero.

#### **1.8.4.2.4 Para elaboración de probetas**

**Molde de compactación.-** En este molde estará la capa base, se colocará encima el riego de liga modificado y luego se vaciará la mezcla asfáltica para determinar el grado de adherencia entre capas utilizando nanomateriales incorporados en el riego de liga.

**Compactador.-** Este compactador sirve para las probetas según especificaciones técnicas.

#### **1.8.5 Descripción de instrumentos**

**La balanza digital.-** Es un instrumento de medición se caracteriza por dos rasgos fundamentales: su gran rango de pesaje y su capacidad para obtener el peso con una precisión asombrosa.

**Figura 1.1.** Balanza digital



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Hornos.-** Los hornos de secado son aparatos para mantener una temperatura entre 105°C y 150°C y sus termostatos no deben ser manipulados, pues toman un tiempo considerable en estabilizarlos y ajustarlos nuevamente a la temperatura requerida. Las muestras horneadas deben ser removidas del horno por el laboratorista a más tardar 24 horas después de haberlas colocada allí.

**Figura 1.2.** Horno eléctrico



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Tamices.-** Son mallas metálicas constituidas por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el material triturado. Las aberturas que deja el tejido y que en conjunto constituyen la superficie de tamizado pueden ser de forma distinta, según la clase de tejido. Las mallas cuadradas se aconsejan para productos de grano plano, escamas o alargado. Las aberturas se identifican por un número que indica la cantidad de aberturas por pulgada cuadrada.

**Figura 1.3.** Serie de tamices metálicos



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Ductilímetro.-** Consta de un recipiente de acero inoxidable provisto de un carro de tracción que se desliza a través de unas guías dentro del baño y que es accionado mediante un motor eléctrico. El equipo realiza el ensayo de manera automática en tres probetas simultáneamente. Velocidad de tracción de 1 y 5 cm. /min. Incluye 3 moldes de bronce.

**Figura 1.4.** Ductilímetro



Fuente: Elaboración propia

**Penetrómetro.-** Equipo que permite el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0.1 mm. El peso del vástago será de 47.5 gr. y 0.05 gr. el peso total de la aguja. Para cargas totales de 100 gr. y 200 gr., dependiendo de las condiciones es en que se aplique el ensaye, se estipulan pesas de 50.0 y 100.0 gr.

**Figura 1.5.** Penetrómetro



Fuente: Elaboración propia

**Viscosímetro.-** Se utiliza para comparar la viscosidad específica de aceites y alquitranes utilizados en carreteras, con la viscosidad del agua. Se compone de un baño de agua completo con un termorregulador digital de precisión, agitador eléctrico, dispositivo de refrigeración.

**Figura 1.6.** Viscosímetro



Fuente: <https://www.emi.edu.bo>>laboratorio

**Picnómetro.-** Es un instrumento de medición cuyo volumen es conocido y permite conocer la densidad o peso específico de cualquier fluido ya sea líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura.

**Figura 1.7.** Picnómetro



Fuente: Elaboración propia

### 1.8.6 Procedimiento de aplicación

**Caracterización de la capa base.-** Los materiales de la capa base será evaluado su granulometría a través del tamizado del material el cual debe cumplir con todos los parámetros de una capa base según la normas Bolivianas de diseño de pavimentos.

Se realizará el ensayo de compactación para determinar la humedad óptima de compactación, se realizará el ensayo de límites de plasticidad que nos permitirán clasificar el suelo.

Se realizará ensayos de CBR para determinar la resistencia de la capa base y verificar que cumpla los parámetros de la norma boliviana de carreteras en el tema de diseño de pavimentos.

**Caracterización de asfalto.-** La caracterización del cemento asfáltico a modificar como del cemento asfáltico a utilizar basándose en la determinación de la viscosidad, penetración y punto de inflamación ya que son los parámetros más importantes. Estos parámetros deben cumplir los rangos especificados por normas, caso contrario no sería factible para realizar las mezclas asfálticas y se busca otra procedencia de cemento asfáltico.

**Caracterización de agregados.-** Para la caracterización de los agregados de aporte se debe primeramente someter al secado de los mismos a través del horno.

Posteriormente se comenzará con la práctica del tamizarlo a través del rop tap para realizar el vibrado de los tamices y el posterior pesaje del material que quedo retenido en cada tamiz.

Con estos valores obtendremos la curva granulométrica de los agregados, se analizará la curva granulométrica la cual debe estar dentro de los rangos máximos y mínimos de cada tamiz para su utilización en la práctica.

También se realizará ensayos de peso específico, peso unitario y desgaste de los ángeles.

**Elaboración de probetas.-** Para la elaboración de probetas, se debe considerar que la granulometría, contenido óptimo de humedad, compactación de la capa base que debe cumplir con las especificaciones de la norma para la elaboración de las probetas de capa base.

Posteriormente una vez elaborado la capa base a través de su compactación en los moldes en 3 capas a 56 golpes cada capa a humedad optima, sobre ella se colocara el riego de liga modificado y se dejara por un periodo mínimo de 24 hrs. y posteriormente se colocara la mezcla asfáltica y se dejara por 48 hrs. Siguiendo las normas de pavimentos, obteniendo una probeta completa para el estudio y evaluación de las propiedades de adherencia del riego de liga modificado con nanomateriales (polvo de silicio).

**Ensayos de evaluación de adherencia entre capas.-** Para los ensayos de evaluación de adherencia entre capas se evaluara el comportamiento del riego de liga modificado sometiendo a las probetas a esfuerzo de corte por cizalla a través de la prensa de CBR o la prensa MARSHALL para la aplicación de las cargas. Para ello es necesario tener listas las probetas con su respectiva identificación de cada una de ellas, también se contar con tablas que permitan la tabulación de datos donde especifique el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respetiva y los datos que se van a necesitar para el ensayo.

**Número de ensayos a realizar.-** Para la realización de este trabajo se realizarán los ensayos requeridos y necesarios, tanto para la capa base, para agregados a utilizar y del cemento asfáltico, así también se procederá a la elaboración de las probetas compuestas de capa base, riego de liga y carpeta de rodadura con el fin de comprobar la mejora en la adherencia y penetración, mediante el ensayo de adherencia, se usara como riego de liga, el asfalto líquido o diluido de curado rápido (RC-70) con una dosificación propuesta de 0.5 lt/m<sup>2</sup> adicionando diferentes porcentajes de nanomateriales ( polvo de silicio y grafito) que tendrán una variación del 2% al 10% con intervalo de 2%, de los cuales se utilizara el mejor porcentaje para realizar ensayos de durabilidad.

**Tabla 1.1.** Número de ensayos a realizar para la elaboración de las probetas

	<b>Ensayos a realizar</b>	<b>Cant.</b>
<b>Capa Base</b>	Granulometría	3
	Limites	3
	Compactación T-180	3
	C.B.R.	3
	Clasificación del suelo	1
<b>Agregados</b>	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
<b>Cemento asfáltico</b>	Penetración	3
	Ductilidad	3
	Punto de inflamación	3
	Punto de ablandamiento	3
	Peso específico	3
	Viscosidad	3
<b>Total</b>		<b>57</b>

Fuente: Elaboración propia

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

**Tabla 1.2.** Elaboración de briquetas para obtener la cantidad óptima de C.A.

Porcentajes de cemento asfáltico	Número de briquetas
4.00%	3
4.50%	3
5.00%	3
5.50%	3
6.00%	3
6.50%	3
<b>Total briquetas</b>	<b>18</b>

Fuente: Elaboración propia

Para la valoración de la adherencia entre capa base y capa de rodadura que se propone en esta investigación, primeramente se elaborara en los moldes la compactación de la capa base posteriormente se realizara la dotación del riego de liga modificado con nanomateriales (polvo de silicio y grafito) con el fin de determinar el porcentaje optimo tanto de grafito como de polvo de silicio que nos dé una mejor adherencia entre capas, posteriormente se realizara la capa de pavimento flexible para completar nuestros moldes.

**Para la dotación de polvo de silicio y grafito al riego de liga.-** El riego de liga será aplicado entre dos carpetas, la capa base de suelo debidamente compactada y una mezcla asfáltica elaborada en caliente (mezcla asfáltica densa), cada espécimen estará conformado por una capa inferior y una capa superior haciendo un total de 2 capas. Para el riego de adherencia o riego de liga se utilizarán asfalto líquido de curado rápido (RC-70), para lo cual se elaborarán 5 probetas por cada porcentaje adicionado al riego de liga.

La cantidad de probetas a construir será:

$$N = A * B * C$$

$$N = 5 * 2 * (5) = 50 \text{ probetas}$$

Donde:

N = Cantidad de briquetas.

A = Número de tasas de aplicación de nanomateriales al ligante.

B = Número de modificador al ligantes a utilizar.

C = Número de briquetas por cada tasa de aplicación al ligante.

## **1.9 Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información**

Una vez obtenido los resultados de caracterización y de los ensayos realizados en el laboratorio se procede al tabulado y si es posible corregir los resultados obtenidos de cada ensayo. Para el análisis se empleará la estadística descriptiva para el análisis de los datos.

### **1.9.1 Estadística descriptiva**

El proceso seguido en el estudio estadístico de una cierta característica o variable, puede subdividirse en tres pasos sucesivos.

**A). Recogida de datos.-** Planteado el test o encuesta oportuna y recogidos los datos que correspondan, el primer análisis que realizaremos es el del tipo de variable que pretendemos estudiar (cualitativa o cuantitativa; discreta o continua). Esto condicionará en gran medida su posterior tratamiento de los datos en estudio de la investigación.

**B). Organización de los datos.-** Determinado el modo de agrupamiento de las observaciones, procedemos a su recuento, construyendo la tabla de frecuencias. Posteriormente podremos visualizar tales frecuencias de forma gráfica con el diagrama estadístico apropiado.

**C). Análisis final.-** La obtención de muy diversas conclusiones respecto de la variable estudiada, se podrá realizar con auxilio de los diferentes parámetros estadísticos (de centralización, posición, dispersión, etc.).

Para nuestra investigación se trabajará con variables **cuantitativas** ya que los valores de las observaciones son numéricos (cuantificables) y en consecuencia éstos son ordenables.

### 1.9.1.1 gráficos estadísticos a utilizar

**Diagrama de barras.-** Para variables cuantitativas y cualitativas no agrupadas en intervalos.

### 1.9.1.2 Medidas de dispersión

**Rango.-** Con el fin de medir el mayor o menor grado de separación de las observaciones realizadas, es la diferencia entre el valor máximo y mínimo observado.

$$R = \text{Máx.} - \text{Mín.}$$

**Desviación media.-** Es la media de las desviaciones o separaciones de cada una de las observaciones, respecto a la media aritmética, consideradas en valor absoluto.

$$s = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}$$

Con los ensayos de laboratorio determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que debe tener el riego de liga que es el material modificado en la investigación.

Con los ensayos de laboratorio se podrá determinar:

- Gráficos de resultados obtenidos con la incorporación de nanomateriales.
- Condiciones para la puesta en obra.
- Relaciones entre riego de liga modificados y riego de liga convencionales.
- Graficas de Resultados de adherencia.

**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 de la investigación

El tema en estudio “análisis de la mejora de puesta en obra y durabilidad de los riegos de liga con nanomateriales (polvo de silicio y grafito)” está limitado a mejorar las propiedades sobretodo de adherencia entre capas de pavimento asfáltico incorporando al riego de liga nanomateriales existentes en nuestro medio, con el fin buscar nuevos materiales para mejorar materiales asfálticos.

Primeramente se describirá de manera general de que se trata la investigación para la incorporación de nanomateriales en los riegos de liga como modificador donde se dará a conocer su problemática, los objetivos, hipótesis, etc.

Posteriormente la teoría acerca del riego de liga y nanomateriales, se detallará estados de conocimiento acerca de los mismos como ser sus características, propiedades, clasificación, etc.

Luego nos referimos a los cementos asfálticos, donde se detalla toda información necesaria como las características, propiedades, componentes, sus limitaciones, etc. de cada material mencionado.

El siguiente paso es la experimentación que se realizará, describe los métodos, criterios y medios para la obtención de datos, caracterización de los materiales a utilizar para que luego sean analizados.

**CAPÍTULO II**  
**CEMENTO ASFÁLTICO, RIEGO DE LIGA Y**  
**NANOMATERIALES**

## **CAPÍTULO II**

### **CEMENTO ASFÁLTICO, RIEGO DE LIGA Y NANOMATERIALES**

#### **2.1 Antecedentes de los asfaltos**

Como se explica en el manual del instituto del asfalto, el asfalto es uno de los componentes ingenieriles más arcaico utilizado desde los inicios del hombre para la construcción. Fue en Egipto, aproximadamente en el año 2500 a.c. que el asfalto fue descubierto; es una palabra cuyo vocablo que deriva de “Sphalto” que significa “que deja caer” este término se utiliza en Asiria entre los años 1400 y 600 a.c.

Tiempo después esta palabra fue adoptada por los griegos, quienes le otorgaron el significado de “que rigidiza o estabiliza, y finalmente evoluciono al latín y después al francés (asphalte) y al español (asfalto), hasta llegar al inglés (asphalt).

En el antiguo mundo el asfalto era utilizado como mortero para la pega de bloques en la construcción, en la realización de pavimentos interiores y como impermeabilizante en la industria naval y números aplicaciones más.

Como ejemplos históricos de ello se encuentren: la industria naval que producía y utilizaba el asfalto en sumeria ceca de los 6000 a.c., el uso de asfalto como mortero en la construcción de torres de babel y la utilización como material impermeable que le daban los egipcios al igual que como material de relleno del cuerpo humano en el proceso de momificación.

En aquel entonces era común encontrar asfalto natural depositado en estanques y lagos de asfalto, así como en piedras porosas como la caliza y la arenisca (piedras conocidas también como piedras asfálticas). Esto se explica debido a las fuerzas geológicas que provocaron el ascenso del asfalto a la superficie y al hacer contacto este con los elementos de la atmosfera provocaban su endurecimiento, ejemplo de esto son los depósitos del lago de asfalto de trinidad, el cual se encuentra en la isla del mismo nombre en la costa de Venezuela. Sin embargo, en la actualidad el asfalto que se utiliza es artificial y se deriva del petróleo.

El asfalto refinado comenzó a utilizarse hace casi doscientos años como sustituto del asfalto natural debido a que este último solo se encontraba en lugares apartados y su reología no era tan buena, ya que su contenido malténico al calentarse se evaporaba con rapidez y se endurecía con mucha facilidad. Al mismo tiempo, la industria automotriz empezó a expandirse por lo que una nueva industria llegó para mejorar las condiciones de las carreteras proporcionándoles texturas más suaves y diseños más modernos, por lo que el asfalto comenzó a verse como producto industrial barato e inagotable; fue así como se inició el uso del asfalto en las carreteras.

A principios del siglo XIX, sus aplicaciones se enfocaron en el ámbito de las vías terrestres, por lo que fue en 1802 cuando se utilizaron por primera vez en Francia rocas asfálticas como material para la construcción de banquetas, y en Filadelfia se utilizaron en 1838, pero la evolución del asfalto y su aplicación en las vías terrestres se dio en 1870 en Newark, New Jersey, cuando se construyó el primer pavimento de asfalto en el mundo.

Conforme la industria de las mezclas asfálticas iba en ascenso, comenzaron a surgir nuevas investigaciones para conocer el comportamiento de los asfaltos por medio de numerosas pruebas que fueron desarrollándose. En 192 Prevost Hubbard desarrolló uno de los primeros métodos de evaluación para determinar el Gmb (propiedad física de una mezcla asfáltica compactada) con el fin de simular el comportamiento de esta en campo.

Cinco años más tarde, Francis Hveem desarrolló un método de evaluación para el sangrado por exceso de asfalto en una mezcla asfáltica compactada y también obtener una mezcla más estable. Al mismo tiempo Bruce Marshall desarrolló uno de los métodos más importantes de la historia, el cual determina la cantidad óptima de asfalto y de densidad que debe tener una mezcla asfáltica compactada para resistir las cargas transmitidas por los vehículos hacia la estructura<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ayala, M. y Juárez, I. Tesis de Grado: Diseño de Mezcla Asfáltica Modificada con fibra de vidrio disponible en el Salvador. San Salvador: U. de el Salvador (2010).

## 2.2 Definición

Desde el punto de vista de composición química, los asfaltos son mezclas complejas de hidrocarburos de alto peso molecular, con una notable proporción de heteroátomos (oxígeno, azufre, nitrógeno) y cierta cantidad de metales, tales como vanadio y níquel. Adicionalmente, la mayoría de los asfaltos muestran en su composición ciertas sales orgánicas solubles en la forma de micro cristales.

Todos estos constituyentes proporcionan las características físicas, reológicas, coloidales y de durabilidad en el asfalto. Desde el punto de vista estructural, se considera al asfalto como una sustancia coloidal compuesta de varias fracciones, siendo las principales los asfáltenos, los máltenos, las resinas, y los carbenos.

Los asfáltenos son sustancias policíclicas de alto peso molecular (>5000), aglomeradas en forma de partículas sólidas y constituyen la fase coloidal dispersa en el asfalto. Se ha determinado que los asfáltenos son típicamente compuestos de hidrocarburos aromáticos con cadenas laterales parafínicas en grado variable, dependiente de la procedencia del crudo y las condiciones de elaboración del asfalto.

Los asfáltenos pueden ser precipitados utilizando disolventes saturados y volátiles, tales como el "spirit" de petróleo IP (sulfonado y con rango de ebullición entre 60 y 80° C), n-pentano o n-heptano; son solubles en benceno, pero insolubles en hexano. La cantidad de asfáltenos precipitados, así como su naturaleza, puede variar dependiendo del tipo de solvente que se utilice. La parte no precipitada corresponde a los máltenos.

Los aceites (máltenos) representan los hidrocarburos de menor peso molecular, son líquidos a temperatura ambiente y constituyen la fase continua del sistema coloidal.

Los asfáltenos le confieren al asfalto la dureza y los máltenos le proporcionan las propiedades de adhesividad y ductilidad; las resinas y carbenos tienen influencia en la viscosidad, o propiedad de flujo del asfalto.

Las resinas son sustancias de consistencia semisólida o pastosa y un color más claro que los asfáltenos. Tienen un peso molecular más bajo que los asfáltenos (oscila entre el de los asfáltenos y el de los máltenos), están disueltas en el crudo y son parcialmente solubles en el hexano, pero insolubles en el propano. Constituyen el elemento que permite mantener la estabilidad del sistema coloidal al propiciar la interacción entre los asfáltenos y los máltenos. Cuanto mayor es el contenido de resinas, más dúctil y blando es el asfalto. Los carbenos son constituyentes de naturaleza muy aromática, y representan la pequeña parte insoluble en CS<sub>2</sub> (en la cual el asfalto es prácticamente soluble).

Las características del asfalto dependen esencialmente de las proporciones relativas de sus constituyentes. A mayor proporción de asfáltenos, mayor dureza. Por oxidación al aire se pueden transformar las resinas y los máltenos en asfáltenos y por lo tanto aumentar la dureza.

### **2.3 Producción de asfalto**

A través de los tiempos el asfalto y sus mezclas han ido modificándose. Desde la referencia de los afloramientos de asfalto en el mar muerto y de su utilización en la india como impermeabilizante de muros en los almacenamientos de agua.

En la actualidad no podríamos concebir el mundo que vivimos sin la mezcla asfáltica, que pavimenta los caminos y no se permite la comunicación, y el intercambio de productos y servicios.

La necesidad ha cambiado y las técnicas también, por lo cual, me permito recordarles un poco de los últimos cambios en la fabricación y que tratemos todos de pensar en cuál será el futuro.

Al transcurso del tiempo las plantas de asfalto han ido cambiando su diseño, de acuerdo a las necesidades y los cambios de especificación. Muchos de los cambios han sido causados por los ahorros, mayor producción o por mejoramiento de las emisiones contaminantes.

Hace unos 40 años, las plantas productoras de mezcla asfáltica, eran del tipo dosificadoras y producían con una gran calidad. De estas plantas aún hay algunas en operación y siguen produciendo con esa alta calidad.

Debido a restricciones para contaminar el ambiente y en especial la del aire, a las plantas se tuvo que adicionar equipos más grandes y difíciles de transportar.

A los comienzos de los 70 se introducen a la industria de las mezclas asfálticas las secadoras y mezcladoras de tambor, que aunadas a los silos de almacenamiento y a la disponibilidad de controles eléctricos, nos permiten tener plantas productoras continuas que funcionan más sencillamente y que poder trasladarlas con mayor facilidad logrando economías en la producción.

Por frecuencia los cambios tecnológicos y de mejoría del medio ambiente nos llevan a modernizar los equipos productores de concreto asfáltico para reducir los costos de operación, ser competitivos y con mejor calidad.

En el presente ya se usan métodos de calentamiento, como las microondas y se están desarrollando cada vez más rápido nuevas técnicas, haciendo obsoletas hasta las plantas que aún no han tenido el 50% de su vida económica. Es de suponer que estos procesos se aceleran o produzcan otros cambios más drásticos, a medida que en algunos países empiece a escasear el petróleo.

Diferentes usos requieren diferentes usos de asfaltos. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando vidrios tipo crudos de petróleo antes de procesarlos.

El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción de solventes.

La destilación por vacíos consiste en separar al asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos de crudo dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto.

Es así como un sulfato muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo del petróleo o mezcla de crudo de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de la destilación por vacíos o extracción con solventes<sup>2</sup>.

## **2.4 Composición del asfalto**

Antes de intentar discutir las relaciones entre la composición química y las propiedades del asfalto que afectan la durabilidad, daremos atención a la composición química del asfalto. El asfalto no está compuesto de elementos químicos simples, es una mezcla bastante compleja de moléculas orgánicas, sistemas de alta condensación llamados aromáticos.

Un análisis elemental de varios asfaltos se muestra en la tabla 2.1. Aunque las moléculas de asfalto están compuestas predominantemente de carbono e hidrógeno, la mayoría de las moléculas contienen una o más de los llamados *heteroatomos* de nitrógeno, azufre y oxígeno junto con algo de metales, principalmente vanadio y níquel.

---

<sup>2</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

**Tabla 2.1** Composición de un asfalto

<b>Código</b>	<b>B-2959</b>	<b>B-3036</b>	<b>B-3051</b>	<b>B-3602</b>
<b>Origen</b>	<b>Mezcla Mexicana.</b>	<b>Arkansas Lousiana.</b>	<b>Boscan.</b>	<b>California.</b>
Porcentaje de carbono	83.77	85.78	82.90	86.77
Porcentaje de hidrogeno	9.91	10.79	10.45	10.94
Porcentaje de nitrógeno	0.28	0.26	0.78	1.10
Porcentaje de azufre	5.25	3.41	5.43	0.99
Porcentaje de oxigeno	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio, ppm.	180.00	7.00	1380.00	4.00
Níquel, ppm.	22.00	0.40	109.00	6.00

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

Como se observa en la tabla, los heteroátomos, aunque en menor proporción comparado, con las moléculas de hidrocarburo, pueden variar en concentraciones por arriba de los rangos que dependen del origen del asfalto, porque los heteroátomos a menudo se encadenan de manera funcional con la polaridad de sus moléculas, su presencia puede generar una gran alteración en algunas de las propiedades físicas entre asfaltos de diferente origen.

Un análisis elemental con valores promedio entrega poca información acerca de los átomos que se incorporan a las moléculas o sobre qué tipo de estructura molecular está presente. El tipo de estructura molecular es una información necesaria para entender fundamentalmente los efectos de la composición en las propiedades físicas y en la actividad química de este material.

El asfalto es indudablemente producto de materia orgánica de organismos vivos depositada y transformada, por ello la estructura molecular del compuesto presenta una gran diversidad. Carbonos en sistemas llamados aromáticos son estimados por correlación basados en análisis *carbono – hidrógeno*, [H.E. Schweyer and E.L. Chipley; 1967], [L.W. Corbett; 1967] sus densidades determinadas directamente por resonancia magnética molecular (*NMR*).

Las concentraciones de carbono aromático determinadas por NMR presentan un contenido típico de 25 a 35 por ciento de asfalto.

La estructura molecular del hidrocarburo es muy compleja por los heteroátomos de azufre, nitrógeno, y oxígeno que están presentes en una combinación suficiente, uno o más heteroátomos por molécula pueden estar presentes. Estos pueden estar incorporados dentro de los componentes, o en un grupo químico funcional más discreto junto a estos componentes.

Los heteroátomos, particularmente nitrógeno y oxígeno, y el denominado sistema aromático contribuyen considerablemente a la polarización de las moléculas que provocan las principales fuerzas de cohesión y las propiedades físicas.

## **2.5 Propiedades físicas de los asfaltos**

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

### **2.5.1 Durabilidad**

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la prueba de película delgada en horno (TFO) y la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO).

### **2.5.2 Adhesión y cohesión**

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos, como relacionada con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

### **2.5.3 Susceptibilidad a la temperatura**

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

#### **2.5.4 Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

En el proceso de elaboración de la mezcla el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se encuentra en el tambor mezclador. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la prueba de película delgada en horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento.

Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción.

Una vez más, las causas principales la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad

pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado<sup>3</sup>.

## **2.6 Propiedades químicas del asfalto**

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

En condiciones normales, los hidrocarburos forman una solución coloidal de dos fases, en la que los hidrocarburos más pesados, denominados asfáltenos, están dispersos en las moléculas de hidrocarburos más ligeros, denominados máltenos. Los asfáltenos por su color negro y similitud con el polvo grueso de grafito, le proporcionan su color y dureza al asfalto. Los máltenos son líquidos viscosos y pegajosos compuestos de resinas y aceites que le proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto (su valor cohesivo).

La proporción de asfáltenos y máltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno.

Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento:

Envejecimiento primario o de corto plazo: Se produce desde la fabricación de la mezcla, hasta el proceso de compactación, se debe a altas temperaturas que es sometido el asfalto para realizar los trabajos de elaboración de las mezclas asfálticas.

---

<sup>3</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

La volatilización es su causa principal (evaporación de los constituyentes más livianos del asfalto).

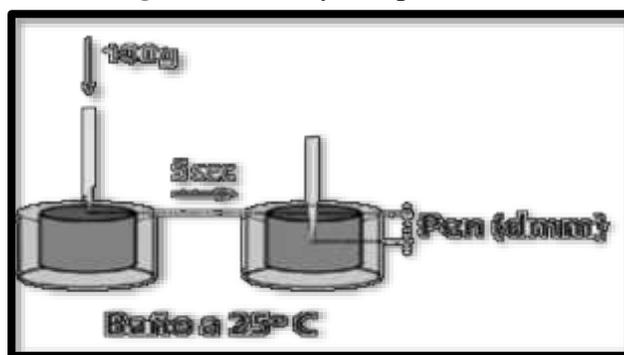
Envejecimiento secundario o de largo plazo: Es aquél que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. La oxidación es su causa principal (reacción del asfalto con el oxígeno).

## 2.7 Ensayos empíricos de del cemento asfáltico

Para estudiar la consistencia de los asfaltos se desarrollan ensayos en laboratorio, los cuales determinan si son aptos o no para trabajar en las mezclas asfálticas destinada a la pavimentación<sup>4</sup>.

**Penetración.-** El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100gr y que la carga se aplica durante 5 seg. Es evidente que cuando más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

**Figura 2.1** Ensayo de penetración



Fuente: [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R\\_Qve540KFBHZIP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R_Qve540KFBHZIP7e6qqOSfhCdW)

<sup>4</sup> Laboratorio nacional de vialidad. (Junio de 2015). Mezcla asfáltica en caliente. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)

Los asfaltos se clasifican según su dureza o consistencia por medio de la penetración en milésima de milímetros, el instituto de asfalto ha adoptado cuatro diferentes grados de asfalto para pavimentación comprendidos los cuales están dentro de los siguientes rangos.

**Tabla 2.2** Clasificación de asfalto según su dureza

<b>Asfalto para pavimento</b>	
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

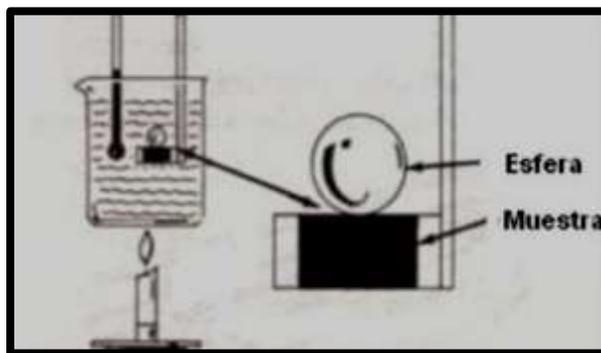
Fuente: Carlos Luis Verdezoto

**Punto de ablandamiento.-** Los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a diferentes temperaturas.

Normalmente éste método se lo realiza mediante el método arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los cementos asfálticos de pavimentos, frecuentemente se usa para caracterizar los materiales más duros que son empleados en otras aplicaciones e indica la consistencia del asfalto una vez tomada la temperatura necesaria del mismo y se ablanda esto puede ser en un rango de 48° a 57°C.

El ensayo consiste en llenar de asfalto dos anillos de latón de dimensiones normalizadas, las muestra separadas una de la otra se suspende de un baño de agua destilada y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificado, a continuación, se calienta el baño a una velocidad de 5 °C por minuto y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero caiga desde una distancia de 25mm. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

**Figura 2.2** Ensayo de punto de ablandamiento



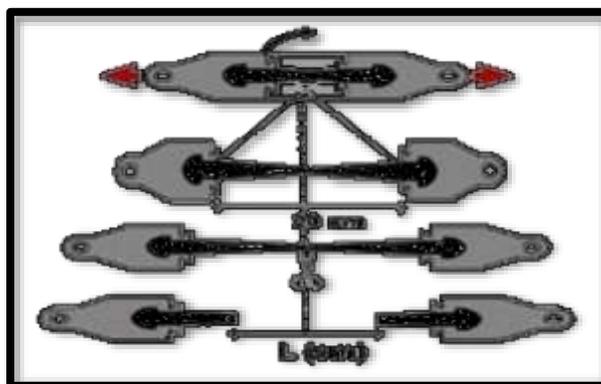
Fuente: [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

**Ductilidad.-** La ductilidad es una propiedad que tienen algunos elementos que pueden deformarse sin romperse.

Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquéllos que les falta esta característica. Por otro lado, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura.

Consiste en colocar una muestra o patrón en un baño de ductilidad a 25°C, para después medir el alargamiento elástico en porcentaje de la deformación con una velocidad de alargamiento de 5cm/min $\pm$ 5%, antes de la ruptura (>100cm); unos asfaltos con ductilidad elevada son susceptibles a los cambios de temperatura.

**Figura 2.3** Ensayo de ductilidad



Fuente: [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

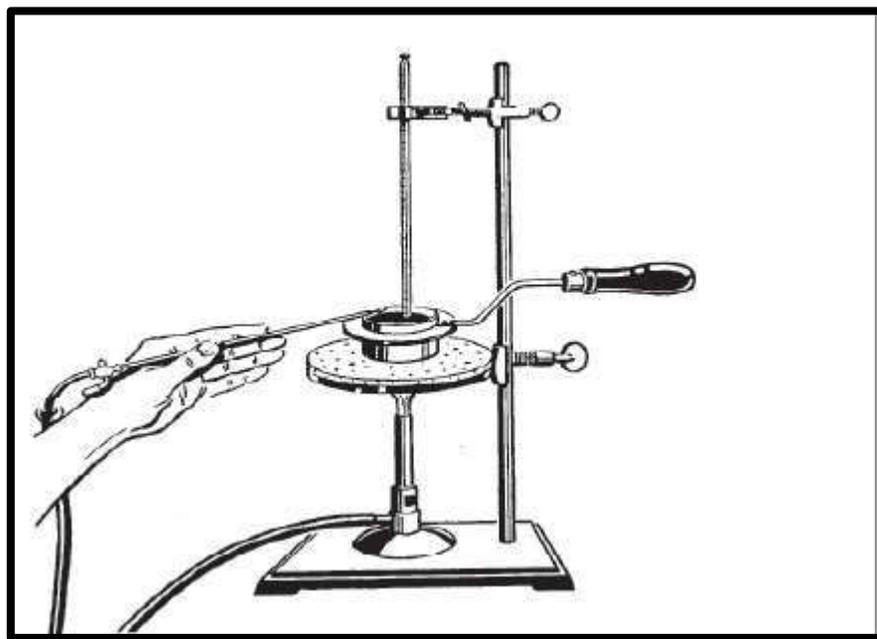
**Punto de inflamación.-** El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland. Según condición normalizada prescrita en el método ASTM D-92, se trata de un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida.

Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

**Figura 2.4** Ensayo de punto de inflamación



Fuente: [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R\\_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQDR7SyZv9URJIHZA1O0i017R_Qve540KFBHZJP7e6qqOSfhCdW)

**Peso específico.-** Es necesario conocer el peso específico del asfalto que se emplea para hacer las correcciones de volumen y se emplea también como factor para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentos compactados.

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 especificado de 1.05 significa que el material pesa 1.05 veces lo que pesa el agua a temperatura fijada.

Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expande cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.

En Ecuador PETROECUADOR, produce cementos asfálticos en la refinería de Esmeraldas, que por sus características físicas de penetración (según el MTOP 60-70) es utilizado como un asfalto AC-20.

Los resultados de los ensayos antes indicados comparados con sus respectivas especificaciones, nos lleva a concluir si este asfalto es apto o no para posteriormente ponerlo en uso<sup>5</sup>.

## **2.8 Definición de mezclas asfálticas**

Una mezcla asfáltica la constituye básicamente una combinación en proporciones preestablecidas de agregados pétreos en diferentes granulometrías, y un material asfáltico. Donde todas las partículas de agregado están recubiertas con una película continua y homogénea de cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica para pavimentación es sometida a un proceso de compactación, que les permite a los materiales constituyentes trabajar en conjunto, en el cual el material asfáltico actúa como ligante que aglutina las partículas de agregados y forman una masa cohesiva y permeable, y el agregado mineral ligado, actúa como

---

<sup>5</sup>Laboratorio nacional de vialidad. (Junio de 2015). Mezcla asfáltica en caliente. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)

un esqueleto pétreo, aportando resistencia y rigidez a la mezcla. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades y características de la mezcla.

### **2.8.1 Mezcla asfáltica en caliente**

Para lograr que los agregados pétreos se mezclen homogéneamente con el asfalto, ambos componentes se llevan a elevadas temperaturas, sobre los 100°C, para obtener una buena trabajabilidad de la mezcla.

El proceso de mezclado se realiza en una planta asfáltica y luego se transporta la mezcla al sitio de pavimentación y se coloca por medio de un finisher, una vez extendida se somete a un proceso de compactación, que hace que la mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por el paso de los vehículos y a su vez pueda traspasar la sollicitación del peso de ellos hacia las capas más profundas, absorbiendo una parte de ésta sollicitación.

#### **2.8.1.1 Propiedades de las mezclas asfálticas en caliente**

Las mezclas asfálticas deben cumplir con propiedades fundamentales cómo:

**Durabilidad.-** Propiedad de las mezclas compactadas en los pavimentos capaz de resistir la desintegración debido a la acción conjunta del tránsito y del clima, éste último afecta principalmente a la capa de rodadura por ser superficial y estar en contacto directo con el sol, el aire y el agua, esto hace que la mezcla pierda las propiedades aglutinantes, es decir se oxide, se endurece y envejece, afectando la vida útil del pavimento.

**Estabilidad.-** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones perjudiciales y éstas a su vez sean transmitidas a las capas estructurales internas del pavimento.

La estabilidad depende de la fricción interna y ésta a su vez de la textura superficial, forma de los agregados, densidad de la mezcla, granulometría y cantidad de asfalto, en cambio la cohesión entre agregados es la fuerza de la mezcla que depende

fundamentalmente de la capacidad que tenga el asfalto de mantener unidas las partículas del agregado, ésta propiedad varía inversamente con la temperatura y aumenta con el contenido de asfalto hasta llegar a un óptimo. La pérdida de estabilidad de un pavimento se traduce en ahuellamiento y ondulaciones.

**Resistencia a la fatiga.-** Capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos sin agrietamientos provocados por el paso reiterado de vehículos. Un pavimento con bajo contenido de asfalto o que se ha envejecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga.

**Flexibilidad.-** Capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones por asentamientos de la base, sub-base y subrasante sin agrietarse.

**Impermeabilidad.-** Las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, que el agua superficial sea de lluvias, de riegos, de canales etc., no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando que éstas puedan perder capacidad de soporte.

**Resistencia al deslizamiento.-** Capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmedo, ésta capacidad de la mezcla es sumamente importante a nivel de seguridad, ya que no se debe perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento.

**Trabajabilidad.-** Se refiere a la facilidad que tenga la mezcla asfáltica de colocarse y compactarse sin que se generen segregaciones. Esta propiedad está relacionada con el tipo de agregado, granulometría, contenido y viscosidad del asfalto, además de la temperatura de mezclado y compactación<sup>6</sup>.

### 2.8.2 Mezcla asfáltica en frío

Son las mezclas constituidas por la combinación de uno o más agregados pétreos, con una emulsión asfáltica (que no es más que asfalto emulsionado en agua antes de ser

---

<sup>6</sup> Botasso, G. (2003). Diseño de mezclas asfálticas en caliente.

mezclado con el agregado) y, eventualmente, agua. En este estado de emulsión el asfalto es menos viscoso y la mezcla es más fácil de trabajar y compactar. La emulsión romperá luego de que suficiente agua se haya evaporado y la mezcla en frío comienza a tener buena resistencia. Estas mezclas se efectúan con asfaltos líquidos y sin recurrir al calentamiento de los agregados. Se utilizan comúnmente como material para bacheo en rutas de bajo tránsito.

Estas mezclas poseen capacidad portante, por esta razón es que se considera su aporte en el paquete estructural. Los agregados gruesos son exclusivamente provenientes de trituración. Los agregados finos, conviene que provengan de la mezcla de arenas de trituración, que ofrecen la trabazón necesaria, y arenas silíceas naturales que le otorguen trabajabilidad a la mezcla.

Son ideales para la pavimentación urbana de arterias que serán sometidas a un bajo volumen de tránsito y en donde ese tránsito será casi exclusivamente de automóviles. Se recomienda su puesta en obra a temperaturas no inferiores a los 20 grados centígrados ni superiores a los 40 grados centígrados.

Las emulsiones asfálticas contienen pequeñas cantidades de solventes, que generalmente producen el mejor resultado de las mezclas asfálticas en frío, utilizadas para bacheo. La mezcla será rígida cuando el solvente se evapora. A la hora de dosificar agua dentro de la mezcla se debe tomar en cuenta, el tiempo con el que se dispone para abrir el tránsito nuevamente.

## **2.9 Diseño de mezclas asfálticas**

Una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinaciones en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen varios métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de agregado y asfalto en una mezcla.

El método Marshall tiene como propósito determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método provee información propiedades de la mezcla asfáltica caliente y establece contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. El método Marshall, como se presenta en esta sección, solo se aplica en mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que utilizan cemento asfáltico clasificado, con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm. o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente de penetración<sup>7</sup>.

### 2.9.1 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad del pavimento de mezclas en caliente estas incluyen la: estabilidad, la durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo principal de procedimiento de diseño de mezcla es el de garantizar que a mezcla de pavimentación posee cada una de estas propiedades.

**Estabilidad.-** la estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo las cargas repetitivas.

**Durabilidad.-** la durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto.

---

<sup>7</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

**Impermeabilidad.-** la impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso del 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 diseños de mezcla se relacionan con impermeabilidad.

**Trabajabilidad.-** La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Cuando la trabajabilidad es mala puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

**Flexibilidad.-** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse sin que se agriete s movimientos y asentamientos graduales de la subrasante se sientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

### **2.9.2 Características de los materiales pétreos para las mezclas asfálticas**

Los agregados pétreos típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 %, en peso, y entre 75 y el 85 %, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayor de las características de capacidad portante.

Los agregados adecuadamente graduados por su tamaño y escogidos por las propiedades que les provee su naturaleza forman lo que se conoce como el esqueleto pétreo y se mantienen íntimamente adheridos y cohesionados por las propiedades que posee el asfalto.

Debido a el rompimiento de la emulsión asfáltica se lleva a cabo por la interacción química de esta con el material pétreo, es necesario conocer el tipo de material pétreo que se tiene para determinar el tipo de emulsión asfáltica más apropiada.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Según la asociación de productores y pavimentadores asfálticos, la roca se tritura para angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas.

En un estudio se hizo el análisis con material que fue obtenido de forma procesada e industrial donde se determinó que la distribución de tamaños de agregados se realiza de manera que los vacíos de las fracciones gruesas sean llenadas por las fracciones finas dejando espacio suficiente para el ingreso del ligante y vacíos de aire. La estabilidad de la mezcla se logra a través de la sucesión de contactos entre distintas fracciones con un mínimo de asfalto y de vacíos de aire.

El agregado grueso debe proceder de la trituración de la roca o de la grava o de una combinación de ambas, sus fragmentos deberán ser limpios resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, estará exento de polvo, estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla y otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

Dentro de las propiedades y características de los agregados para obtener un pavimento asfáltico de calidad podemos mencionar las siguientes:

**Gradación y tamaño de la partícula.-** Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones de acuerdo a normas establecidas. Esta distribución de varios tamaños de partícula dentro del agregado es comúnmente llamada gradación del agregado o gradación de la mezcla.

**Limpieza.-** Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos de materiales indeseables (vegetación, arcilla, partículas blandas, terrones de arcillas) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra del agregado antes de ser lavado es comparado con su peso después de ser lavado) proporciona una medida exacta del porcentaje del material indeseable más fino que 0.075 mm. El ensayo de equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm.

**Dureza.-** Los agregados deberán ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla asfáltica y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que estén en, o cerca de la superficie, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores en la estructura del pavimento, esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito.

**Forma de la película.-** La forma de la película afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación en la obra, así como la cantidad de la fuerza necesaria para compactar la mezcla asfáltica y la densidad requerida. La forma de las partículas también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.

Las partículas irregulares angulares generalmente resisten el desplazamiento en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente con partículas a bordes puntiagudas y de forma cubica, producidas, casi siempre por trituración.

**Textura de la superficie.-** La textura superficial de las partículas del agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la de papel de lija aumenta la resistencia en el pavimento debido que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento de tránsito sea más seguro.

Adicionalmente las partículas de asfalto se adhieren mejor a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

**Capacidad de absorción.-** Todos los agregados son porosos y algunos más que otros la cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información dentro del estudio que se realizara. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las de más partículas de agregado. Debido a esto un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados para la elaboración de mezclas asfálticas a menos que posean otras características que lo haga deseable, a pasar de su alta capacidad de absorción.

**Afinidad con el asfalto.-** La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas (clase sedimentaria tipo calcáreas) tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofobicos (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofolicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto por lo consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestas al agua. Existen varios ensayos para determinar la afinidad con el asfalto y su tendencia

al desprendimiento. En uno de estos ensayos la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar es sumergido en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente<sup>8</sup>.

### **2.9.3 Porcentaje de asfalto en la mezcla**

El ligante asfáltico interviene en las mezclas asfálticas en proporciones diferentes según el tipo de formulación, generalmente este valor oscila entre el 3% y el 10 % sobre la masa de los agregados pétreos. Generalmente los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su antigua clasificación de acuerdo al ensayo de penetración, como aquellos de penetración intermedia (50/60 y 70/100) y actualmente también tienen un uso generalizado los asfaltos modificados. El asfalto, está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contienen otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. La principal propiedad que le confiere el asfalto a la mezcla es su adhesividad o poder ligante, mediante el cual se mantienen íntimamente unidas las partículas de agregados. Otra de las propiedades importantes del ligante asfáltico es su impermeabilidad y la resistencia a la mayoría de los ataques químicos que pueden generar los ácidos, álcalis y las sales. Por último, su susceptibilidad térmica, o comportamiento termoplástico marcan su diferencia de comportamiento entre los distintos intervalos térmicos a los cuales puede estar expuesto el asfalto. Los asfaltos convencionales poseen una elevada viscosidad a baja temperatura, y a medida que son sometidos a temperaturas mayores, su viscosidad desciende considerablemente.

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de los resultados de la relación de vacíos-densidad, y de la prueba de estabilidad-flujo. Se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos sea de 5% para una mezcla densa y 10% para una mezcla abierta. Luego, se evalúan las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto, y

---

<sup>8</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

comparadas con los criterios de diseño. Si se cumplen todos los criterios, es el contenido de diseño de asfalto. Si no se cumplen todos los criterios será necesario hacer algunos ajustes a volver a diseñar la mezcla.

### 2.9.3.1 Mezcla asfáltica densa

Para obtener el porcentaje óptimo de una mezcla densa se elaboraron pastillas con un porcentaje de asfalto de 6.0%. 6.25% y con un 6.5%, ya no se elaboraron más pastillas ya que si se aumentaba el porcentaje estaba muy sobrada y si se realizaba con un porcentaje menor faltaría por cubrir el agregado, esto se caracteriza de acuerdo a su aspecto físico del asfalto con respecto a los agregados.

El porcentaje que se determinó de acuerdo a los vacíos, fue de 6.25% de asfalto por el cual se empezó a mezclar las placas asfálticas.

**Tabla 2.3** Prueba de Marshall para una mezcla densa

Pastilla	% de Asfalto	Resistencia (kg)	Flujo (mm)
1	5.75	1170.3615	4.6961
2	5.75	926.2637	3.6901
3	5.75	1225.1513	4.5438
4	6.00	1162.9452	3.8806
5	6.00	1117.7172	4.4149
6	6.00	1249.2191	5.1913
7	6.25	989.2316	4.0629
8	6.25	1380.1147	3.8516
9	6.25	1257.6614	4.3555
10	6.50	1258.7031	4.5779
11	6.50	1096.5258	4.3894
12	6.50	1186.4066	3.8700

Fuente: Especificaciones técnicas de mezcla asfáltica caliente, Comisión Permanente de Asfalto argentina 2006

### 2.9.3.2 Mezcla asfáltica abierta

Para obtener el porcentaje óptimo de una mezcla cerrada se elaboraron pastillas con un porcentaje de asfalto de 5.0, 5.25 y con un 5.5%, de igual forma para la mezcla densa, ya no se siguió elaborando más pastillas ya que si se aumentaba el porcentaje

estaba muy sobrada y si se realizaba con un porcentaje menor faltaría por cubrir el agregado, esto se caracteriza de acuerdo a su aspecto físico del asfalto con respecto a los agregados.

El porcentaje que se determinó de acuerdo a los vacíos mencionados anteriormente fue de 5.25% de asfalto por el cual se empezó a mezclar las placas asfálticas.

**Tabla 2.4** Prueba de Marshall para una mezcla abierta

Pastilla	% de Asfalto	Resistencia (kg)	Flujo (mm)
1	5.00	777.6907	5.284
2	5.00	1159.6491	6.3643
3	5.00	929.933	2.5573
4	5.25	1031.5678	5.2941
5	5.25	0	0
6	5.25	852.1949	4.7727
7	5.50	892.4321	4.8239
8	5.50	1340.8569	6.3465
9	5.50	806.9669	3.9069

Fuente: Especificaciones técnicas de mezcla asfáltica caliente, Comisión Permanente de Asfalto argentina 2006

## 2.10 Tipos de asfaltos

Los tipos de asfalto refinado producidos por destilación directa son los siguientes:

Se producen asfaltos directamente de los cementos asfálticos, disolviéndolos en destilados volátiles; esos productos se llaman asfaltos rebajados y cuando contienen solventes tipo nafta o gasolina dan lugar a asfaltos líquidos de curado rápido y aquellos que contienen querosene como solvente darán asfaltos de curado medio.

En el caso de una carpeta de rodamiento, construida por el procedimiento de mezcla en el lugar, el solvente debe separarse de la mezcla asfáltica, dejando cemento asfáltico como cementante y como medio impermeabilizante. Mientras más dura sea la base asfáltica más solvente se necesitara para un grado determinado de fluidez. La rapidez con la cual los asfaltos rebajados pueden invertir su estado para convertirse en

cementos asfálticos, depende de la cantidad, carácter del solvente y las condiciones empleadas en su uso.

### **2.10.1 Asfaltos rebajados de fraguado rápido (FR)**

Los asfaltos rebajados de fraguado rápido son cementos asfálticos diluidos con un destilado de petróleo tal como la gasolina que se evapora rápidamente. Los productos de curado rápido se emplean cuando se desea un cambio rápido del estado líquido de aplicación al cemento asfáltico original.

Los tipos de asfalto de fraguado rápido varían de FR-0 a FR-4, las consistencia, temperaturas de aplicación porcentajes de disolvente y penetraciones del cemento asfáltico original son casi similares a las de las designaciones comparables de la serie FM. La penetración del residuo después de la destilación se aproxima a la del asfalto original.

### **2.10.2 Asfaltos rebajados de fraguado medio (FM)**

Los asfaltos rebajados de fraguado medio, son cementos asfálticos rebajados o diluidos a una mayor fluidez mezclándolos con destilados de tipo kerosene o el aceite diésel ligero que se evaporan a una velocidad relativamente baja. Los productos de fraguado medio tienen buenas propiedades humectantes que permiten el revestimiento satisfactorio de los agregados en forma de polvos de graduación fina.

La consistencia de los asfaltos de fraguado medio varía desde líquidos ligeros (FM-0) hasta casi semisólidos (FM-4).

La fluidez de las diversas calidades está controlada por la cantidad de disolvente; el FM-0 puede contener tanto diluyente como 50 % en volumen y el FM-4 tanto como el 22 %.

La consistencia del aglutinante después de que el disolvente se evapora totalmente depende del cemento asfáltico originalmente seleccionado, que es generalmente de 85-100 grados centígrados.

La penetración del residuo de la destilación que es una medida de la dureza del asfalto en servicio, es algo superior entre 120 y 300 grados de penetración.

### **2.10.3 Asfaltos rebajados de fraguado lento (FL)**

Los asfaltos rebajados de fraguado lento son destilados de petróleo con las fracciones volátiles ligeras separadas en gran medida. Los asfaltos de fraguado lento se endurecen o fraguan muy lentamente y se emplean cuando se desea una consistencia casi igual a la del aglutinante mismo, tanto en el momento del tratamiento como después de un periodo de curación.

### **2.11 Reacción del asfalto ante altas temperaturas**

El cemento asfáltico expuesto a temperaturas extremadamente calurosas, como los desiertos, o a condiciones de velocidad y cargas sostenidas, como un tráiler a velocidad lenta, puede comportarse como un líquido viscoso, por esta razón que se le considera un fluido newtoniano puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa.

A los líquidos viscosos como el cemento asfáltico también se les conoce como “plásticos” ya que una vez que comienzan a fluir pierden su forma y jamás la recuperan, es por esta razón que cuando aplicas este tipo de mezclas en caliente sobre todo en un día caluroso, esta tiende a fluir bajo el tránsito vehicular y el peso del mismo, en pocas palabras su conducta es la de un plástico, lo que ocasiona roderas y movimiento de las intersecciones. Al mismo tiempo que pierde adherencia entre el

agregado y el asfalto, lo cual puede ocasionar un desprendimiento de la carpeta de rodadura<sup>9</sup>.

## **2.12 Definición de riego de imprimación**

La imprimación consiste en la incorporación inicial de asfalto diluido en forma de película a una superficie de una base no asfáltica a fin de prepararla para recibir un tratamiento superficial o una nueva capa de construcción, el objeto de la imprimación es de: impermeabilizar la superficie, taponear los vacíos capilares, recubrir y unir las partículas sueltas del agregado, endurecer o reforzar la superficie, ayudar a la compactación y conservación de la base sin un excesivo uso de agua, promover adherencia entre la superficie de la base y el tratamiento o construcción de recubrimiento.

Para el colocado del riego de imprimación se usa un distribuidor a presión, para regar, bajo condiciones normales de 0.90 a 2.20 litros por metro cuadrado de asfalto de baja viscosidad, tal como el MC-30 o el MC-70 sobre la superficie preparada de base absorbente. El asfalto debe ser absorbido enteramente por la capa base.

Si no es absorbido completamente al término de 24 horas, se deberá esparcir arena sobre la superficie a fin de que seque el exceso de asfalto, se deberá tener cuidado para evitar la sobre imprimación, la superficie debe estar completamente curada antes de colocar el tratamiento superficial o carpeta asfáltica.

El riego de imprimación debe colocarse 15 cm adicionales al ancho que será cubierto con el concreto asfáltico sobre la superficie preparada, limpia, seca o ligeramente húmeda y cuando la temperatura del ambiente en la sombra sea superior a los 6 grados centígrados en ascenso.

En otros países de centro américa y países de europa el riego de imprimación es considerado también riego de liga, y es aplicado en la construcción de carreteras.

---

<sup>9</sup> Navarro. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29 (2013).

### 2.13 Definición de 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**”, se define como riego de liga a la aplicación de una emulsión asfáltica o asfalto rebajado sobre una capa asfáltica o una capa granular debidamente compactada.

Es la aplicación de la emulsión asfáltica sobre un suelo mejorado denominado capa base o un pavimento ya existente y se utiliza para obtener una buena adherencia con la nueva capa asfáltica a construir.

La emulsión comúnmente usada para este trabajo es la emulsión de tipo catiónico de ruptura rápida. En algunos casos se utilizan emulsiones medias. El objetivo es lograr una capa fina y uniforme de emulsión la cual liberará el asfalto luego de romper. Es importante determinar la cantidad de emulsión a aplicar de acuerdo al estado de la carpeta existente. Esta cantidad será lo suficiente para lograr una adecuada adherencia entre las capas asfálticas evitando los excesos que podrían provocar exudación del asfalto.

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 rebajado sobre un pavimento existente, para asegurar la adherencia entre la superficie de las capas asfálticas que se superpone.

Dos características esenciales del riego de liga son: (a) debe ser muy delgado y (b) debe cubrir uniformemente el área a ser pavimentada de forma que el comportamiento de todas ellas sea lo más parecido a un elemento monolítico.

La adherencia final conseguida entre capas depende no sólo de cómo se haya realizado el riego, de que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa inferior, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de cómo se ha ejecutado la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla. El control se reduce a una mera inspección visual del riego efectuado y al control de la dotación del mismo, pero no se verifica la calidad final conseguida en la adherencia de las capas, que es lo que en realidad se debería medir.

**Figura 2.5.** Dotación de riego de liga



Fuente: <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/publications/tackcoatguidelines.pdf>

#### **2.14 Riego del liga en Bolivia**

La aplicación del riego de liga en nuestro medio se lo realiza según especificaciones técnicas para cada proyecto en particular, su uso se lo hace generalmente después de la aplicación del riego de imprimación, se aplica el riego de liga si después de la imprimación de la capa base a transcurrido un tiempo mayor a 7 días y no sea colocado la carpeta asfáltica entonces se procede a colocar un riego de liga generalmente de curado rápido (RC), ya que la superficie pudo sufrir deterioros durante ese tiempo por la circulación de vehículos.

El riego de liga se lo aplica para generar una mejor adherencia entre capas y se lo hace generalmente con una dotación de 0.5 litros por metro cuadrado.

### **2.15 Componentes del riego de liga**

El riego de liga puede hacerse con emulsión asfáltica como la CSS-1h, con una composición de 60 % de asfalto, 40 % de agua y emulgente, este tipo de emulsión se empezó a utilizar en nuestro país a partir del año 1993 y cuya práctica se mantiene hasta la fecha. El objetivo de esta capa es llenar los vacíos y ligar sobre la totalidad de la superficie, como resultado de la experiencia práctica la dosificación de emulsión asfáltica varía de 0.15 a 0.70 l/m<sup>2</sup>.

Para el riego de liga se pueden utilizar asfaltos rebajado como el RC- 250, que fue muy utilizado, cuando no se usaban las emulsiones asfálticas; Pero hoy con los nuevos convenios de medio ambiente se prohíbe su uso, por tener un elevado grado de contaminación ambiental y su alto costo para colocarlo ha provocado que ya no se utilice.

El asphalt institute define a la emulsión asfáltica para uso vial, como aquella “emulsión de betún asfáltico en gasolina o diésel que contiene pequeñas cantidades de agente emulsificante; es un sistema heterogéneo que contiene dos fases normalmente inmiscibles (asfalto y agua), en el que el agua forma la fase continua de la emulsión y la fase discontinua está constituida por pequeños glóbulos de asfalto.

Los asfaltos emulsificados pueden ser de tipo aniónico o catiónicos, según el tipo de agente emulsificante empleado.”

### **2.16 Propiedades del riego de liga**

El riego de liga al ser una combinación de cemento asfaltico con un emulsificante para que este tenga una propiedad importante que es la adherencia, que es capacidad de generar una unión entre dos capas diferentes de un pavimento flexible como son la capa base y la capa de rodadura.

Otra propiedad es su baja viscosidad que se opone al movimiento del líquido y no se generen charcos de riego de liga en la superficie.<sup>10</sup>

La emulsión comúnmente usada para trabajos es la emulsión de tipo catiónico de ruptura rápida lo que hace que una vez colocado en la superficie esta se evapore y penetre de manera más rápida en la superficie de colocado.

### **2.17 Importancia del riego de liga**

La literatura internacional señala la utilización del riego de liga como material adherente para la colocación de sobrecapas.

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.

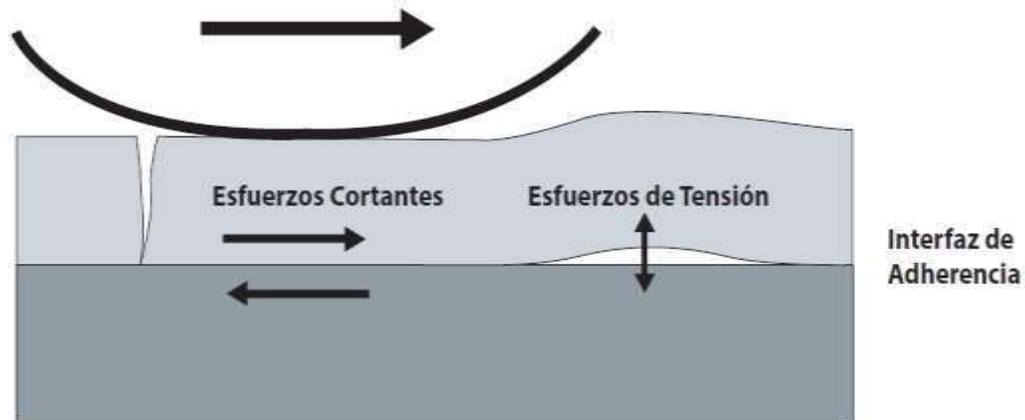
Por otro lado, si la interfaz de adherencia entre la capa nueva y la existente no puede proveer la suficiente resistencia para soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito, puede ocurrir una falla por cortante.

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 en la superficie de la vía por fatiga en la superficie y el deterioro del resto de la estructura del pavimento.

---

<sup>10</sup> Bustos, G. & Pérez, E., Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 533: Tratamientos Superficiales mediante Riegos de liga, Madrid 2004.

**Figura 2.6.** Estado de esfuerzo en interfaz de adherencia



Fuente: Tesis universidad de Chile de nombre, “Estudio experimental de la resistencia de adherencia entre capas”

Lo anterior es explicado por nuevos modelos que contemplan el efecto de una pobre adherencia entre capas (Khweir y Fordyce, 2003). El modelo tradicional de agrietamiento por fatiga considera la concentración de esfuerzos de tensión así como el inicio y propagación de grietas a la superficie en la última fibra del espesor de total de las capas asfálticas que constituyen la estructura del pavimento, al suponer que las capas se encuentran debidamente adheridas y que el pavimento funciona como un sistema monolítico. No obstante, los nuevos modelos sugieren que en capas asfálticas con pobre adherencia, la concentración de esfuerzos se presentará tanto en la última fibra de la capa existente así como en la última fibra de la nueva capa asfáltica colocada al encontrarse estas dos desligadas, razón por la cual las investigaciones consideran la aparición y propagación grietas por fatiga para cada una de las capa asfálticas (ver Figura 2.6). Esto repercute como se explicó anteriormente en un deterioro acelerado de la estructura del pavimento.

Otro aspecto que se consideran en los nuevos modelos es que si el agrietamiento inicia sobre la superficie hacia la interfaz de adherencia, el agrietamiento no se propagará hacia abajo de las capas de la estructura existente sino más bien generará un posible plano de deslizamiento en la interfaz de adherencia.

Dos características esenciales del riego de liga son: (a) debe ser muy delgado y (b) debe cubrir uniformemente el área a ser pavimentada de forma que el comportamiento de todas ellas sea lo más parecido a un elemento monolítico. Sin embargo, la experiencia ha puesto de manifiesto que esta unión no siempre se consigue, ocasionando deterioros prematuros en el pavimento y una reducción de su vida de servicio.

Mencionado así algunos artículos al respecto de problemas con el mal riego de liga: Van Dam<sup>1</sup>. En un informe de la administración federal de aviación y Shahin<sup>1</sup> en dos artículos de revistas independientes, informaron sobre los efectos del deslizamiento de las capas de un pavimento de mezclas asfálticas en caliente (HMA), y sobre el comportamiento del pavimento utilizando diversos modelos mecanicistas<sup>11</sup>.

Los autores informaron que incluso un ligero deslizamiento de una superposición, provoca una redistribución de las tensiones dentro de un pavimento. El deslizamiento entre capas en la superposición llega a causar grandes deformaciones por tracción que se producen en la parte inferior de la superposición. Si se ha producido el deslizamiento, cargas horizontales sólo puede recibir ayuda de la capa que resbaló y la resistencia a la fatiga del pavimento podría convertirse en una función de la vida de fatiga de sólo la superposición, reduciendo en gran medida la vida de fatiga de todo el pavimento. Uzan<sup>2</sup>. Utilizaron el análisis matemático para demostrar que las distribuciones de esfuerzos en las interfaces de capa son afectadas por condiciones de interfaz y que un débil enlace de interfaz entre las capas del pavimento podría dar lugar a grietas en forma de medialuna en la superficie.

Hachiya<sup>2</sup> y Sato<sup>2</sup> demostraron a través de análisis mecanicista que pueden ocurrir deslizamiento de capas o separación, si las tensiones de cizallamiento en la interface logran superar su resistencia al corte. Y por lo anteriormente expuesto concluyeron que las consecuencias del deslizamiento de las capas asfálticas son las siguientes:

---

<sup>11</sup> Bustos, G. & Pérez, E. 2004, Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Orden circular 533: Tratamientos Superficiales mediante Riegos de liga, Madrid.

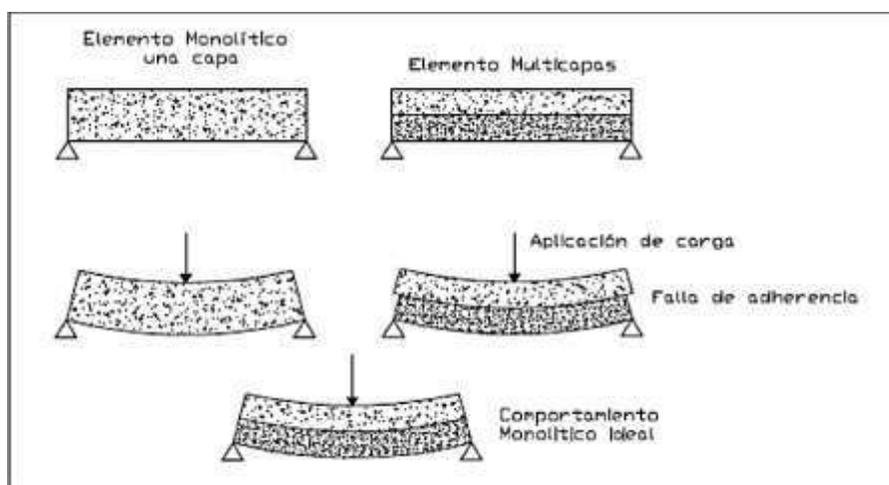
Van Dam.<sup>1</sup> Informó de que la falta de unión entre las capas de un pavimento de asfalto acorta la vida útil del pavimento tan drásticamente que las medidas adecuadas se deben tomar durante la construcción para asegurar la unión.

Shahin<sup>1</sup>. Ha informado de que un pavimento con una capa deslizada requeriría la eliminación o la sustitución en lugar de un segundo recubrimiento debido al grosor excesivo de recubrimiento adicional requerido para mantener los esfuerzos de tracción por debajo de los niveles aceptables.

Dunston<sup>2</sup>. El riego de liga, quizás a través de la circulación del tráfico, después de la construcción, contribuyó a la rotura de un HMA durante la compactación.

La adherencia final conseguida entre capas depende no sólo de cómo se haya realizado el riego, de que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa inferior, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de cómo se ha ejecutado la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla. El control se reduce a una inspección visual del riego efectuado y al control de la dotación del mismo, pero no se verifica la calidad final conseguida en la adherencia de las capas, que es lo que en realidad se debería medir.

**Figura 2.7.** Comparación de viga monolítica y viga multicapa



Fuente: Tesis universidad de Chile de nombre, “Estudio experimental de la resistencia de adherencia entre capas”

**Figura 2.8.** Dotación de riego de liga no uniforme



Fuente: <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/publications/tackcoatguidelines.pdf>

### **2.18 Aplicación del riego de liga**

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.

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 dónde 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.

### **2.19 Falla por adherencia en pavimento flexible**

Durante su vida útil los pavimentos asfálticos están sometidos a distintos tipos de esfuerzos. El cálculo estructural de los distintos componentes se realiza suponiendo que existe una perfecta adherencia entre las distintas capas. Se asume que éstas se comportan de manera monolítica, sin embargo esto no ocurre en la realidad. Problemas como “fisuras o grietas parabólicas” así como un “arrollamiento transversal”, son patologías que pueden ser atribuidas a una deficiencia en la adherencia de las capas de la estructura del pavimento. La calidad de los materiales, así como una correcta fase constructiva deberán asegurar el mejor comportamiento del pavimento terminado.

Los pavimentos flexibles basan su comportamiento en la capacidad de deformación ante la sollicitación de las cargas del tránsito y las cargas térmicas. Para absorber tales cargas estos pavimentos se constituyen en varias capas, las cuales poseen propiedades resistentes diferentes, disminuyendo su calidad a medida que aumenta la profundidad dentro del paquete estructural.

El pavimento asfáltico es entonces, por naturaleza, un sistema multicapa en que sus partes componentes deben estar adheridas entre sí para brindar una solidaridad resistente.

Cuando la adherencia entre capas asfálticas no es buena, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana, ante las sollicitaciones del tránsito. Esta falta de vínculo se traduce también, en una mala o nula distribución de tensiones en el espesor total del pavimento.

El concepto de sistema multicapa sometido a una sollicitación de flexión, puede asimilarse al de una viga, donde su resistencia se incrementa en función de su altura y considerando una adherencia total entre sus partes componentes de la misma<sup>12</sup>. Si la viga estaría formada por varias capas de espesor delgado colocadas

---

<sup>12</sup> Maestrando: Ing. Luis Agustín RICCI “Evaluación de la adherencia entre capas con intercapa 2008

simplemente apoyadas unas sobre otras sería menos resistente que una viga monolítica de igual altura total, o la misma viga de delgadas capas pero adheridas fehacientemente entre ellas. Esto puede demostrarse con la teoría básica de flexión que dice que la tensión debida a flexión en cualquier sección es directamente proporcional al momento flector “M”, e inversamente proporcional al módulo de resistencia de la sección “W”.

Es sabido también que para elementos de sección rectangular, como puede considerarse una muestra de estudio de un pavimento, el módulo resistente es directamente proporcional al cuadrado de su altura, con lo cual se evidencia la importancia de poseer espesores de capa considerables y netamente adheridos entre sí.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{bh^3}{6}}$$

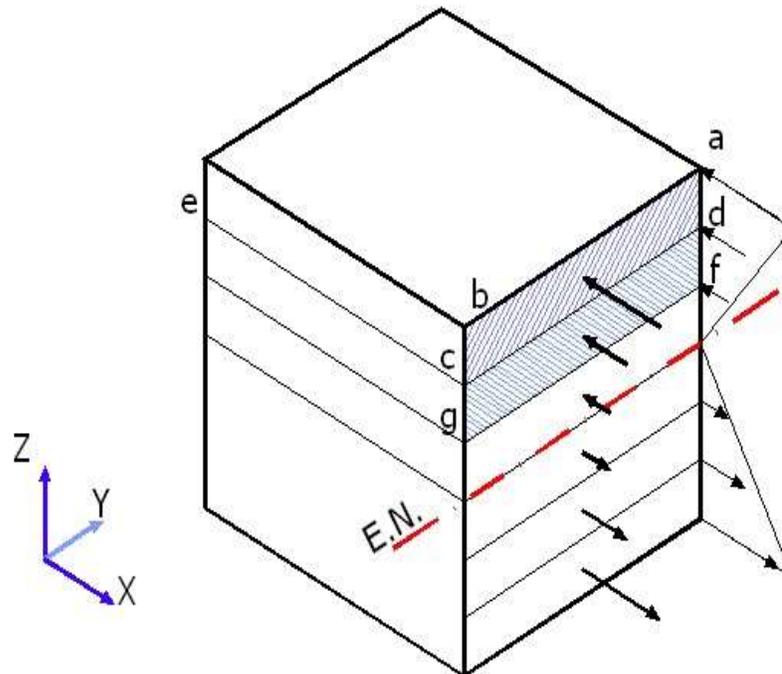
Ahondemos más en este concepto y en la comprensión del mecanismo de resistencia a la flexión.

Ante una viga sometida a flexión simple, los esfuerzos presentados en una sección de la misma se ven representados en la figura 2.9.

Se aprecia que la mitad superior de la sección estará sometida a esfuerzos de compresión, no obstante ello, la semi parte inferior lo estará a tracción. Por la condición de equilibrio de fuerzas en el eje X en toda la sección, las fuerzas de compresión quedan equilibradas con las de tracción.

Ahora bien, si se analizase solo una de las láminas de la sección, por ejemplo la delimitada por abcd, el esfuerzo de compresión resultante en la misma sólo sería equilibrado por un esfuerzo cortante y de sentido opuesto a la compresión desarrollado en el plano dce. Este esfuerzo cortante se ve materializado por la adherencia en los sistemas multicapas, es allí entonces donde reside su importancia.

**Figura 2.9.** Esquemas de fuerza de compresión y tracción en viga sometida a flexión



Fuente: Tesis universidad de Chile de nombre, “Estudio experimental de la resistencia de adherencia entre capas”

Como la fuerza de compresión total aumenta hasta el eje neutro, es allí donde se requiere una resistencia de adherencia de mayor importancia para contrarrestar su efecto.

De esta manera queda demostrado que ante sollicitaciones de flexión la adherencia entre las partes componentes de un paquete estructural es de suma importancia.

La falla por adherencia en pavimentos se ve manifestada por corrimientos, o corrugaciones.

Según el manual de identificación de fallas de la **federal highway administration** los corrimientos o **shoving** son desplazamientos longitudinales localizados en áreas de la superficie del pavimento; generalmente causados por el frenado brusco de los vehículos o las aceleraciones que suelen darse en pendientes, curvas o intersecciones. Como consecuencia de ese desplazamiento longitudinal viene aparejado un

desplazamiento vertical, ya que la mezcla que se desliza tiende a acumularse en una instancia posterior. La manera de cuantificar esta falla es midiendo la superficie afectada y expresándola en metros cuadrados.

**Figura 2.10.** Falla de tipo Shoving o corrimiento fotográfico



Fuente: Distress Identification manual for the long-term pavement, Federal highway administration U.S. Department of transportation EE.UU. año 2003

El manual centroamericano de mantenimiento de carreteras define al término Corrimiento o **Shoving** como: Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando "cordones", principalmente laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera donde se visualiza claramente.

Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento.” Asegura también que una de las principales causas es la inadecuada ejecución del riego de liga, dando como resultado la escasa adherencia entre la capa asfáltica de rodadura.

El corrimiento puede venir acompañado de otro tipo de falla identificada como fisuras en arco las cuales se deben a una deficiencia de adherencia entre las capas del pavimento. También hace alusión a la falla por corrugación o **corrugation** como:

“Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1.0 metro entre ellas, a lo largo del pavimento”.

**Figura 2.11.** Falla de tipo Shoving o corrimiento, esquema y fotografía



Fuente: Distress Identification manual for the long-term pavement, Federal highway administration U.S. Department of transportation EE.UU. año 2003

**Figura 2.12.** Falla de tipo fisura en arco, esquema y fotografía



Fuente: Distress Identification manual for the long-term pavement, Federal highway administration U.S. Department of transportation EE.UU. año 2003

Estas tipologías de fallas es muy común observarlas en zonas donde el pavimento está sometido a alta exigencias de frenado, aceleraciones y movimientos de vehículos girando; y se deben en parte a la falta de adherencia de la carpeta de rodamiento

con los sustratos inferiores. Estas fallas también pueden deberse a fallas en las técnicas de colocación y en defectos de la mezcla empleada.

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<sup>13</sup>.

## **2.20 Procedimiento de puesta en obra del riego de liga**

Previa aplicación del riego de liga, la superficie de apoyo debe ser regular y no debe exhibir deterioros. Asimismo, debe estar libre de manchas o huellas de suelos cohesivos, los que deben eliminarse totalmente de la superficie.

Inmediatamente antes de proceder a la aplicación de la emulsión, la superficie a regar se debe limpiar de materiales sueltos o perjudiciales y secos. Para ello se deben utilizar barredoras mecánicas o máquinas de aire a presión, u otro método.

Asimismo, si la superficie a regar fuera un pavimento asfáltico en servicio, se deben eliminar, mediante fresado, los excesos de ligante asfáltico que hubiera y se deben reparar los deterioros que pudieran impedir una correcta adherencia del riego de liga.

Cuando la superficie a regar se encuentre en las condiciones fijadas anteriormente, se debe aplicar el riego de liga, con la dotación y la temperatura definida en la obra.

La distribución del riego de liga se debe efectuar de manera uniforme, evitando duplicarla en las juntas transversales de trabajo. Donde fuera preciso regar por franjas, se debe procurar una ligera superposición del riego en la unión de las mismas. Se debe garantizar la aplicación del riego de curado de manera uniforme, sin la formación de estrías ni acumulaciones en superficie, garantizando la dotación especificada.

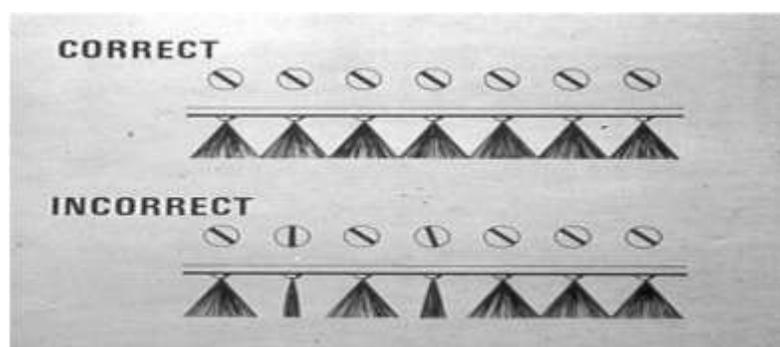
El control para la puesta en obra del riego de liga se reduce a una mera inspección visual del riego efectuado y al control de la dotación del mismo.

---

<sup>13</sup> Maestrando: Ing. Luis Agustín RICCI “Evaluación de la adherencia entre capas con intercapa 2008

**Vehículo distribuidor.-** Varios ajustes relacionados con vehículos son fundamentales para lograr la colocación de riego de adherencia uniforme. Esencialmente, los patrones de rociado, altura de la barra de spray y de la presión de distribución deben trabajar juntos para producir la aplicación uniforme de riego de liga. En general, las mejores aplicaciones de los resultados de un "doble vuelta" o la cobertura de "triple vuelta". "doble / triple de vuelta" significa que los patrones de rociado de la boquilla se solapan entre sí de tal manera que cada porción de la zona recibe aerosol de exactamente dos / tres boquillas, figura 2.9.

**Figura 2.13.** Patrones de rociado



Fuente: Departamento de transporte de Texas, Estados Unidos de América. Boletín técnico, correcta aplicación de riego de liga (2011)

La altura de la barra de spray debe permanecer constante cuando se aplica una capa ligante. La barra de spray excesivamente baja da lugar a rayas, mientras que las barras de spray excesivamente altas causan solapamiento que se produce en una tasa de aplicación excesiva.

La presión dentro del distribuidor debe ser capaz de forzar el material de riego de liga a cabo las boquillas de spray a una velocidad constante. Presión inconsistente dará lugar a tasas de aplicación no uniforme.

Temperatura dentro del distribuidor debe mantenerse entre aproximadamente 24° C (75° F) y 54° C (130° F). El exceso de calor puede causar que la emulsión se rompa cuando aún estaba en el distribuidor.

La adherencia final conseguida entre capas depende no sólo de cómo se haya realizado el riego, de que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa inferior, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de cómo se ha ejecutado la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla.

**Figura 2.14.** Boquillas de distribución del camión distribuidor de riego de liga



Fuente:[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement\\_surface\\_preparation.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

**Figura 2.15.** Proceso de aplicación del riego de liga



Fuente:[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement\\_surface\\_preparation.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

### **2.21 Condiciones que debe tener la superficie 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. Los materiales para capa ligante se pueden aplicar a pavimento fresco y / o húmedo.

La superficie debe estar libre de impurezas como polvo, hojas de plantas, plásticos y otros objetos que afecten al riego de liga.

La superficie debe estar debidamente compactada de acuerdo a especificaciones técnicas requeridas para cada capa que compone la estructura del pavimento flexible.

La superficie debe ser uniforme sin presentar desniveles a lo largo de toda su longitud.

La Aplicación de riego de liga debe resultar en una capa fina y uniforme de material ligante ya sea 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.

### **2.22 Errores más frecuentes que se comete con los riegos de liga**

Dentro de las fallas o errores que se dan a la hora de colocar el riego de liga podemos mencionar los siguientes:

**Tasa de aplicación del riego de liga.-** Con respecto a este punto se han llevado a cabo diversos estudios los cuales señalan tanto que un exceso de riego de liga, una cantidad insuficiente de ésta conduce a una pérdida de adherencia entre capas, por

el contrario algunos estudios demuestran que en algunos casos el riego de liga es innecesario.

Es importante señalar que la tasa de aplicación óptima dependerá de las condiciones de la superficie de las capas de asfalto, las cuales pueden variar según el tipo de mezcla empleado o si se trata de un pavimento envejecido, nuevo o fresado. Basándose en los antecedentes revisados se observa que en general las dosis óptimas se encuentran en el rango de 0.1 [l/m<sup>2</sup>] hasta los 0.75 [l/m<sup>2</sup>].

**Figura 2.16.** Tasa insuficiente de aplicación del riego de liga



Fuente:[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement\\_surface\\_preparation.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

**Tiempo de curado del riego de liga.-** La mayoría de los estudios señalan que el riego de liga debe encontrarse como película asfáltica ligante (haber alcanzado su quiebre), en el caso de las emulsiones, previo a la colocación de la siguiente capa asfáltica, mientras que otros estudios realizados sobre el riego de liga indican que no es aconsejable dejar curar demasiado tiempo, ya que el riego puede perder sus propiedades adherentes.

Se recomienda en nuestro medio que una vez se hace el colocado del riego de liga, en nuestro caso convencional se lo debe dejar entre 3 a 5 días para luego realizar la colocación de la carpeta de pavimento flexible.

Existen estudios que sugieren que no es necesario curar el riego de liga, ya que este quiebra inmediatamente gracias a la elevada temperatura de la nueva capa de asfalto, evaporándose el agua y emulsificante y escapando a través de la mezcla suelta a la superficie.

**Figura 2.17.** Curado del riego de liga



Fuente:[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement\\_surface\\_preparation.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

**Condición de superficie de la interfaz.-** La condición de la superficie de un pavimento nuevo o antiguo incluyendo textura, limpieza y presencia de agua son uno de los factores de mayor importancia que influyen en la adherencia entre capas, ya que en la mayoría de las construcciones no se tiene el trabajo necesario de limpieza de la superficie donde se colocara el riego de liga, ni el cuidado ante la presencia de agua en la capa base ya que tanto el agua, polvo y otras sustancias son perjudiciales para la adherencia entre capas.

**Temperatura de confección y compactado.-** La temperatura es un factor muy importante no es recomendable trabajar a temperaturas de ambiente menores a los 15 grados ya que influirá de manera negativa en la adherencia, pero vemos que en nuestro medio no se toma con seriedad este tema ya que se trabaja a menores temperaturas de las recomendadas y no se toman las previsiones necesarias para contrarrestar estos efectos.

Existen estudios que demuestran que tanto una elevada temperatura de la capa inferior, capa superior y temperatura ambiente, resultan beneficiosos para la obtención de una buena adherencia, esto podría deberse a que a mayores temperaturas el cemento asfáltico de la capa superior logra fusionarse mejor con el asfalto de la capa inferior o residuo del ligante empleado como riego de liga, para conformar una unión continua y homogénea en la interfaz.

### **2.23 Maquinaria y equipo utilizado para la aplicación del riego de liga**

**Tanques de almacenamiento.-** Los tanques de almacenamiento de la emulsión asfáltica deben ser, idealmente, cilíndricos y verticales y estar térmicamente aislados del medio ambiente.

El tanque de almacenamiento debe tener un sistema que permita mantener la temperatura de almacenamiento de la emulsión asfáltica y debe disponer de una válvula adecuada para la toma de muestras.

Para evitar la rotura de la capa de la emulsión en contacto con el aire y la formación de espuma, el caño de alimentación debe llegar hasta el fondo del tanque.

El sistema de bombeo empleado debe ser tal que no ingresen aire a la emulsión.

Todas las tuberías directas y bombas, preferiblemente rotativas, utilizadas para el traspaso de la emulsión asfáltica desde la cisterna de transporte al tanque de almacenamiento, y de éste al equipo de aplicación en obra o mezclado, deberán estar dispuestos de modo que se puedan limpiar fácil y perfectamente después de cada jornada de trabajo.

**Camión distribuidor.-** El equipo de distribución del riego debe tener un sistema que regule la dotación en función de la velocidad de avance, de manera de obtener un riego uniforme, cumpliendo con la dotación definida en el correspondiente tramo de prueba<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas Ing. Leticia Ontiveros Rojas ENERO 2013

El mismo debe ser capaz de mantener la emulsión a la temperatura prescrita y aplicar la dotación de emulsión asfáltica especificada.

La bomba debe generar una presión suficiente en la barra de distribución, de manera que los picos rieguen de forma pareja y deben estar fijados a una sola altura de la superficie.

**Figura 2.18.** Camión distribuidor del riego de liga



Fuente:[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement\\_surface\\_preparation.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/pavement_surface_preparation.htm)

#### **2.24 Limitaciones de la ejecución, puesta en obra y habilitación al tránsito**

No se permite la puesta en obra del riego de liga en las siguientes situaciones (salvo autorización expresa del inspector de calidad):

Cuando la temperatura ambiente a la sombra resulte inferior a diez grados Celsius (10°C). Dicho límite se puede bajar a cinco grados Celsius (5°C), a juicio del Inspector de Calidad, si la temperatura tiende a aumentar.

Cuando haya probabilidad o se produzcan precipitaciones atmosféricas.

La aplicación del riego de liga deberá estar coordinada con la puesta en obra de la capa superpuesta a él, de manera que el ligante no haya perdido su efectividad como

elemento de unión. Cuando el Interventor lo estime necesario, se aplicará otro riego de liga.

Los trabajos de aplicación del riego de liga se deberán realizar en condiciones de luz solar. Sin embargo, cuando se requiera terminar el proyecto en un tiempo especificado por el INVÍAS o se deban evitar horas pico de tránsito público.

Está prohibida la circulación de cualquier tipo de vehículo hasta que se haya producido la rotura de la emulsión en toda la superficie aplicada y siempre que no se verifique que parte del riego de liga se adhiere a los neumáticos de los vehículos.

### **2.25 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. Una presión baja dará como resultado un riego discontinuo por la descarga desigual del material en las boquillas individuales. Mientras que una presión demasiada alta deformará el abanico de riego.

El camión distribuidor debe tener la capacidad de mantener la temperatura de la emulsión para asegurar una adecuada viscosidad y flujo del material a través de las boquillas de barra rociadora.

La temperatura a la que debe mantenerse la emulsión dependerá del tipo de emulsión que se desea aplicar, la literatura sugiere rangos de aplicación de temperatura para emulsiones de rompimiento rápido entre los 21° C y los 60 °C y en emulsiones de rompimiento lento entre los 21°C y 70°C.

Un exceso de calentamiento sobre el material bituminoso podría causar el rompimiento de la emulsión estando aún dentro del tanque del camión dosificador.

## 2.26 Consideraciones básicas en la aplicación y puesta en obra del riego de liga

**La rugosidad de la superficie del pavimento al recibir el riego de liga.-** Las superficies rugosas requieren más riego de liga que las superficies lisas. Por ejemplo, el fresado produce una, superficie ranurada áspera, lo que aumentará el área de superficie de pavimentos existentes en comparación con una superficie lisa.

**Figura 2.19.** Superficie no uniforme

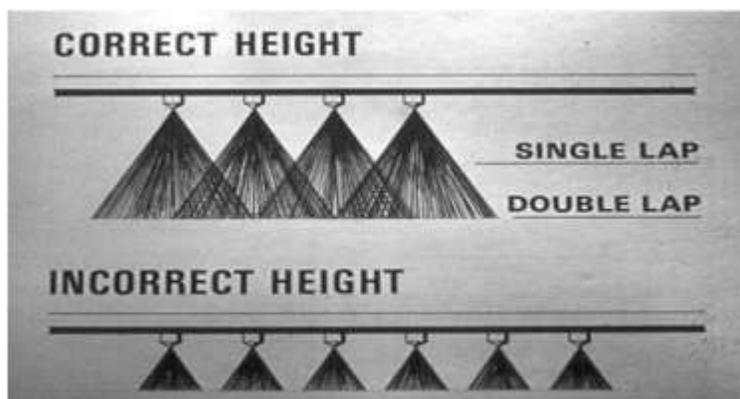


**Fuente:** <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/publications/tackcoatguidelines.pdf>

**Vehículo Distribuidor.-** Varios ajustes relacionados con vehículos son fundamentales para lograr la colocación de riego de adherencia uniforme. Esencialmente, los patrones de rociado, altura de la barra de spray y de la presión de distribución deben trabajar juntos para producir la aplicación uniforme de riego de liga.

En general, las mejores aplicaciones de los resultados de un "doble vuelta" o la cobertura de "triple vuelta". "Doble / triple de vuelta" significa que los patrones de rociado de la boquilla se solapan entre sí de tal manera que cada porción de la zona recibe aerosol de exactamente dos / tres boquillas.

**Figura 2.20.** Incorrecta y correcta aplicación de riego de liga por las boquillas



Fuente: Departamento de transporte de Texas, Estados Unidos de América. Boletín técnico, correcta aplicación de riego de liga (2011)

La altura de la barra de spray debe permanecer constante cuando se aplica una capa ligante. La barra de spray excesivamente baja da lugar a rayas, mientras que las barras de spray excesivamente altas causan solapamiento que se produce en una tasa de aplicación excesiva.

La presión dentro del distribuidor debe ser capaz de forzar el material de riego de liga a cabo las boquillas de spray a una velocidad constante. Presión inconsistente dará lugar a tasas de aplicación no uniforme.

Temperatura dentro del distribuidor\_debe mantenerse entre aproximadamente 24 °C (75°F) y 54°C (130°F). El exceso de calor puede causar que la emulsión se rompa cuando aún estaba en el distribuidor.

### **2.27 Tramo de prueba**

Antes de iniciarse la aplicación del riego de liga, se debe ejecutar el tramo de prueba. El mismo tiene por objetivo efectuar los ajustes y/o correcciones en la dotación de obra, la temperatura de la emulsión al momento de la aplicación, el proceso de distribución del riego de curado y, de corresponder, la distribución y compactación de los áridos de cobertura; todos ellos necesarios para alcanzar la conformidad total de exigencias del presente pliego de especificaciones técnicas generales y del pliego de

especificaciones técnicas particulares correspondiente. El contratista debe informar por escrito, adjuntos a la dotación de obra final a emplear, los ajustes llevados a cabo. Los mismos deben ser aprobados por el inspector de calidad.

El tramo de prueba se debe realizar sobre una longitud no menor a la definida por el inspector de calidad, nunca menor a cien metros (100 m).

Con el objetivo de determinar la conformidad con las condiciones y requisitos especificados en el presente documento y en el pliego de especificaciones técnicas particulares, se deben realizar los ensayos establecidos en ambos documentos para el tramo de prueba. El inspector de calidad puede solicitar la ejecución de otros ensayos además de los indicados en el presente documento y en el pliego de especificaciones técnicas particulares. Los mencionados ensayos pueden ser in-situ, sobre muestras de mezcla asfáltica sin colocar y/o sobre testigos extraídos.

Una vez obtenidos y analizados los resultados, el inspector de calidad debe decidir:

-Si es aceptable o no la dotación de obra. En el primer caso, se puede iniciar la aplicación del riego. En el segundo, el contratista debe proponer las actuaciones a seguir (estudio de una nueva dotación y condiciones de aplicación, corrección parcial de la ensayada, correcciones en el proceso, etc.), de modo de cumplimentar con las exigencias establecidas, en este caso se debe repetir la ejecución del tramo de prueba.

-Si son aceptables o no los equipos propuestos por el contratista para llevar adelante los procesos distribución y control de dichos procesos.

No se puede proceder a la distribución sin que el inspector de calidad haya autorizado el inicio en las condiciones aceptadas después del tramo de prueba.

Los tramos de prueba en los que se verifique el cumplimiento de las condiciones de ejecución y puesta en obra del riego, como así también se verifiquen los requisitos de la unidad terminada definidos en el presente pliego de especificaciones técnicas

generales y en el pliego de especificaciones técnicas particulares correspondiente, pueden ser aceptados como parte integrante de la obra.

## **2.28 Plan de control de calidad de riego de liga**

El plan de control de calidad define el programa que debe cumplir el contratista para el control de calidad de los materiales, del proceso de distribución del riego propiamente y de la unidad terminada.

-El plan de control de calidad debe ser entregado por el contratista y aprobado por el inspector de calidad, el mismo debe incluir como mínimo los siguientes aspectos:

-Frecuencia de ensayos (materiales, proceso de distribución del riego de curado y unidad terminada).

-Tiempos de presentación de los mismos.

- Listado de equipamiento con los cuales se deben realizar los ensayos, nunca menor a lo indicado en el pliego de especificaciones técnicas generales para el laboratorio de obra y oficina para el personal de la inspección.

-Certificado de calibración y plan de calibración del equipamiento, que verifique trazabilidad con patrones de referencia.

-Designación y CV del profesional responsable de llevar adelante el plan de control de calidad propuesto por el contratista.

Con la información generada por la implementación del plan de control de calidad se debe elaborar un informe para presentar al inspector de calidad. La frecuencia de presentación de este informe es determinada por el inspector de calidad, nunca esta frecuencia puede ser inferior a:

-Una presentación mensual.

-Cuarenta mil metros cuadrados (4000 m<sup>2</sup>) de superficie regada.

En el informe se debe volcar la información generada por el cumplimiento del plan de control de calidad: ensayos sobre materiales, sobre el proceso de distribución del riego y de la unidad terminada de los diferentes lotes ejecutados en este período.

En todos los casos en que el inspector de calidad entregue al contratista planillas modelos de cálculo y presentación de resultados de ensayos, las mismas son de uso obligatorio.

El inspector de calidad, o quién éste delegue, pueden supervisar la ejecución de los ensayos, por lo que el contratista debe comunicar con suficiente anticipación su realización.

El inspector de calidad puede disponer el envío de una muestra de cualquier material involucrado en la obra (emulsiones, testigos, etc.) a un laboratorio independiente con el objetivo de auditar periódicamente al laboratorio de control de calidad del contratista. Dicho laboratorio independiente debe contar con el equipamiento calibrado con patrones trazables siendo deseable y valorada la participación del mismo en programas de interlaboratorio.

Para todos los casos en los cuales se verifique una diferencia en un parámetro determinado entre el laboratorio del contratista y el laboratorio empleado por el inspector de calidad, considerando la misma muestra, el valor que se debe tomar como definitivo es el correspondiente al laboratorio empleado por el inspector de calidad. Si el inspector de calidad lo considera conveniente, se puede emplear la metodología de la normativa ASTM-D3244 para establecer el valor definitivo del parámetro considerado.

Para determinar el equipo de transporte sobre el cual efectuar el muestreo con el cual controlar un lote de producción, se debe emplear el sistema de muestreo aleatorio descrito en norma ASTM D-3665. El método se debe utilizar para determinar puntos sobre la superficie regada para el control de un lote de obra (para extracción de

testigos, determinación de puntos de ensayo, etc.). En el método de muestreo se detalla un resumen.

En todos los casos en los cuales se contemple una metodología de muestreo establecida por el IRAM (como por ejemplo la norma IRAM 6599), se debe adoptar ésta como válida.

Para casos extraordinarios donde no sea aplicable lo anterior, el inspector de calidad debe siempre aprobar la metodología de muestreo y/o extracción de testigos; asimismo, el inspector de calidad debe fijar la frecuencia y ubicación.

En virtud de velar por la correcta ejecución del proyecto y control de calidad del mismo, el inspector de calidad puede, respecto al presente plan de control de calidad, agregar ensayos a realizar, aumentar la frecuencia de los ensayos, aumentar la cantidad de muestras y/o testigos a ensayar, aumentar las frecuencias de muestreo, ordenar la extracción de muestras y/o testigos de cierto lugar en particular y ordenar la ejecución de ensayos sobre cierto lugar en particular.

### **2.29 Plan de ensayo sobre el proceso de distribución del riego de liga**

La frecuencia mínima de ensayos del proceso de distribución del riego de liga se resume en la Tabla 2.5.

Independientemente de la frecuencia especificada, se debe realizar al menos una vez cada uno de los ensayos detallados durante la ejecución del tramo de prueba.

Al cambiar un insumo y/o alguno de los materiales componentes del riego de liga se debe presentar una nueva dosificación de obra.

**Tabla 2.5** Plan de ensayos sobre el proceso de distribución del riego de liga.

<b>Plan de ensayos sobre el proceso de distribución del riego de liga</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Frecuencia</b>
Dotación del ligante residual	(1)	Cada lote de obra

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### **2.30 Tipos de emulsión asfáltica a utilizar**

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónicas, catiónicas, y no iónicas. En la práctica, los dos primeros tipos son los más utilizados en la construcción y mantenimiento de carreteras.

Las clases aniónicas y catiónicas se refieren a las cargas eléctricas que rodean las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se debe a una ley básica de la electricidad: como cargas iguales se repelen entre sí y cargas contrarias se atraen entre sí.

Cuando dos polos (ánodo y cátodo) se sumergen en un líquido y una corriente eléctrica pasa a través de ellos, se convierte en el ánodo cargado positivamente y un cátodo cargado negativamente. Si se pasa una corriente a través de una emulsión que contiene partículas de asfalto cargadas negativamente, que migrarán al ánodo. Por lo tanto, la emulsión se conoce como aniónica.

Por el contrario, las partículas de asfalto cargados positivamente se mueven hacia el cátodo y la emulsión se conoce como catiónica. Con emulsiones no iónicas, las partículas de asfalto son neutrales y no migran a los polos.

Las emulsiones se clasifican sobre la base de la rapidez con que las gotitas de asfalto tardan en fusionarse, (es decir, volver a cemento asfáltico). Los términos RS, MS, SS y QS han sido aprobados para simplificar y estandarizar la clasificación, son términos relativos y sólo significa curado rápido, curado mediano, curado lento y de endurecimiento rápido respectivamente. La tendencia a fusionarse está estrechamente relacionada con la velocidad con que una emulsión se volverá inestable y romper después de contactar la superficie de un agregado. Una emulsión RS tiene poco o ninguna capacidad para mezclarse con un agregado, emulsiones SS y QS están diseñados para mezclarse con agregado fino, con el QS espera romper más rápidamente que el SS.

Las emulsiones se identifican además por una serie de números y letras relacionadas con la viscosidad de las emulsiones y la dureza de los cementos de asfalto base. La letra "C" frente al tipo de emulsión denota catiónica. La ausencia de la "C" denota aniónica.

Los números en la clasificación indican la viscosidad relativa de la emulsión. Por ejemplo, un MS-2 es más viscoso que un MS-1. La letra "h" que sigue ciertos grados simplemente significa que se utiliza base de asfalto grado duro. La "s" significa que asfalto base blanda.

El "HF" que precede a algunos de los grados Aniónicas indica alta flotador (High Float), tal como se mide por la prueba de flotador bajo la norma ASTM D-139.

Emulsiones high float tienen una calidad de gel, impartida por la adición de ciertos productos químicos, que permite una película de asfalto más gruesa en las partículas de agregado y evita que escurra el asfalto del agregado. Estos grados se utilizan

Las emulsiones asfálticas a emplear para la ejecución de riegos de liga deben ser del tipo CRR-0/CRR-1, de acuerdo a la norma IRAM 6691 o CRR-0m/CRR-1m de acuerdo a la norma IRAM 6698, u otra emulsión asfáltica que demuestre en el tramo de prueba, un comportamiento adecuado para esta aplicación.

El pliego de especificaciones técnicas particulares puede exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear emulsiones asfálticas no encuadradas dentro de la norma IRAM 6691 o IRAM 6698.

### **2.31 Conservación del riego de liga**

El deslizamiento entre capas en la superposición llega a causar grandes deformaciones por tracción que se producen en la parte inferior de la superposición. Si se ha producido el deslizamiento, cargas horizontales sólo puede recibir ayuda de la capa que resbaló y la resistencia a la fatiga del pavimento podría convertirse en una función de la vida de fatiga de sólo la superposición, reduciendo en gran medida la vida de fatiga de todo el pavimento.

Utilizaron el análisis matemático para demostrar que las distribuciones de esfuerzos en las interfaces de capa son afectadas por condiciones de interfaz y que un débil enlace de interfaz entre las capas del pavimento podría dar lugar a grietas en forma de medialuna en la superficie. Hachiya y Sato demostraron a través de análisis mecanicista que pueden ocurrir deslizamiento de capas o separación, si las tensiones de cizallamiento en la interface logran superar su resistencia al corte.

La conservación del riego de liga contemplado en el pliego de especificaciones técnicas generales consiste en el mantenimiento de las mismas en perfectas condiciones y la reparación inmediata de cualquier falla que se produjere hasta la colocación sobre el mismo de la capa siguiente inmediata siguiente, hasta la recepción definitiva de la obra o durante el período que indique el pliego de especificaciones técnicas particulares; según corresponda.

Los deterioros que se produzcan deben ser reparados por cuenta del contratista, repitiendo, si fuera necesario al solo juicio del inspector de calidad, las operaciones íntegras del proceso constructivo.

Si el deterioro afectara la base, capas intermedias y/o subrasante, el contratista debe efectuar la reconstrucción de esa parte, sin derecho o pago de ninguna naturaleza cuando la misma haya sido realizada como parte integrante del contrato para la ejecución de ese trabajo. Esto es así aun cuando la calzada haya sido librada al tránsito público en forma total o parcial.

La reparación de depresiones, baches aislados y de pequeñas superficies se debe realizar de acuerdo a lo indicado en el pliego de especificaciones técnicas generales, con los materiales establecidos en el pliego de especificaciones técnicas generales y en el correspondiente pliego de especificaciones técnicas particulares.

La adherencia final conseguida entre capas depende no sólo de cómo se realizó el riego, de que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de cómo se ha ejecutado

la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla.

### **2.32 Efectos nocivos para los riegos de liga**

El riego de liga es un material bituminoso que es afectado principalmente por la presencia de agua (humedad), que es perjudicial para las propiedades del riego ya que reduce considerablemente el capacidad de adherencia entre la capa base y la capa de rodadura produciendo un desprendimiento del ligante, el cual se traduce en una mayor vulnerabilidad del pavimentó frente a las sollicitaciones de tránsito generando un fallo en la unión dando lugar a deterioros como agrietamientos por fatiga, es por eso que se debe tener mucho cuidado con respecto al clima cuando se va ejecutar la aplicación del riego de liga ya que si llueve antes de que cumpla el curado del riego éste debe volver a ser realizado.

Otro factor dañino para el riego de liga es la presencia de polvo o suciedad en la superficie donde se aplicara el riego de liga, la presencia de polvo disminuirá en las propiedades de adherencia del riego, es por este motivo que es importante realizar la limpieza de la superficie y la eliminación de mayor porcentaje de polvo presente en la superficie.

### **2.33 Análisis de durabilidad del riego de liga**

La durabilidad de un material es una propiedad asociada a la sustentabilidad del mismo, en este contexto el rol del riego de liga es mantener unidas las capa base y la capa de rodadura para que ambas trabajen de forma monolítica, sin embargo aspectos propios de ligante hace que su reología se vea afectada con el paso del tiempo debido al envejecimiento que experimenta el material.

La durabilidad del riego liga dependerá de la calidad del material a utilizar y de la forma de aplicación del riego ya que se utilizó el análisis matemático para demostrar que las distribuciones de esfuerzos en la capa son afectadas por condiciones de interfaz ya débil enlace de interfaz entre las capas del pavimento podría dar lugar

a grietas en forma de medialuna en la superficie. Hachiya y Sato demostraron a través de análisis mecanicista que pueden ocurrir deslizamiento de capas o separación, si las tensiones de cizallamiento en la interface logran superar su resistencia al corte. Y por lo anteriormente expuesto concluyeron que las consecuencias del deslizamiento de las capas asfálticas son las siguientes:

Van Dam.<sup>1</sup> informó de que la falta de unión entre las capas de un pavimento de asfalto acorta la vida útil del pavimento tan drásticamente que las medidas adecuadas se deben tomar durante la construcción para asegurar la unión.

Shahin<sup>1</sup>. Ha informado de que un pavimento con una capa deslizada requeriría la eliminación o la sustitución en lugar de un segundo recubrimiento debido al grosor excesivo de recubrimiento adicional requerido para mantener los esfuerzos de tracción por debajo de los niveles aceptables lo que afecta la durabilidad del riego.

Dunston<sup>2</sup> informó que el riego de liga inadecuado, quizás a través de la circulación del tráfico, después de la construcción, contribuyó a la rotura de un HMA durante la compactación.

La durabilidad depende no sólo de cómo se haya realizado el riego, de que la dosis sea la apropiada, de que se haya adherido bien a la capa inferior, o de que el tráfico de obra no lo haya levantado, sino también de cómo se ha ejecutado la nueva capa. Sin embargo, durante la fase de construcción, esta propiedad apenas se controla.

Durante la ejecución de los trabajos, el supervisor efectuará los siguientes controles:

- Verificar el estado y funcionamiento de todo el equipo empleado por el contratista.
- Comprobar que los materiales por utilizar cumplan todos los requisitos de calidad exigidos y que en lo posible sean de una sola procedencia.
- Supervisar la correcta aplicación del método aceptado como resultado del tramo de prueba, en cuanto al manejo, transporte y colocación de los tratamientos asfálticos.

-Efectuar ensayos para verificar las dosificaciones de ligante en riegos de liga e imprimaciones.

### **2.34 Nanomateriales**

En los últimos años el diseño y empleo de nuevos materiales ha cobrado gran interés, tanto desde un punto de vista científico como tecnológico. En este sentido, el desarrollo de estructuras nanométricas supone una gran novedad respecto de las basadas en materiales macroscópicos, no solo en cuanto a su tamaño, sino además porque estas nanoestructuras poseen características fisicoquímicas diferentes.

Ahora bien, el comportamiento macroscópico del material depende de la nanoestructura, es por eso que la incorporación de nanomateriales puede producir un impacto en el desempeño de los pavimentos asfálticos.

Los nanomateriales son aquellos minerales en los que al menos una de sus dimensiones se encuentran en el rango de la nanoescala, es decir, entre 1 y 100 nanómetros y se clasifican en base a sus dimensiones o la de alguno de sus componentes, estableciéndose así cuatro categorías 0D, 1D, 2D y 3D. Existen diversos tipos de materiales de tamaño nanométrico, ya sean aislantes, semiconductores o electroconductores, que se presentan en morfologías como nanopartículas, nanopolvos, nanotubos, nanocápsulas, materiales nanoporosos, nanohilos, polímeros, etc. En la proporción de átomos en la superficie con respecto al interior mucho más alta que en materiales de tamaño más elevado. Por consiguiente, si reducimos las dimensiones del material, modificaremos sus propiedades y en consecuencia podremos diseñar materiales con propiedades a la carta.

Indudablemente el uso de nanomateriales ha sido la corriente fundamental seguida por la comunidad científica para mejorar las propiedades electrónicas de los sistemas biosensores. Especialmente aquéllos que son electroconductores poseen características únicas que justifican su empleo en el diseño de biosensores, puesto que mejoran sus características analíticas. Los nanomateriales pueden actuar como unidades de ensamblaje con propiedades funcionales únicas, permitiendo el diseño

de una gran variedad de arquitecturas sobre los electrodos, basándose en las siguientes propiedades:

Poseen una elevada relación área superficial/volumen, proporcionando grandes áreas superficiales electroquímicamente activas a los electrodos, y por tanto mayor capacidad de detección. Esta mayor área superficial favorece una mayor densidad de biomoléculas inmovilizadas sobre la superficie del electrodo, mejorando así la sensibilidad de los análisis.

Pueden acelerar los procesos de transferencia electrónica entre los electrodos y las moléculas objeto del análisis, reduciendo por tanto los tiempos de respuesta analítica.

### **2.35 Características de los nanomateriales en asfaltos**

La creciente necesidad de mejorar las propiedades de desempeño de los ligantes a lo largo de la vida útil del mismo, es imperante en la industria de las carreteras. Lo anterior en aras de minimizar la incidencia de mecanismos como la deformación permanente, la fatiga, el agrietamiento térmico, la adhesividad y el daño por humedad. Además de estas propiedades es de sumo interés el estudio de la cinética de envejecimiento y oxidación de los ligantes asfálticos y por ende la utilización de metodologías de ciencia e ingeniería de materiales para el diseño de los asfaltos.

Los nano-materiales han tomado un auge científico-industrial debido a sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, entre otras.

Adicionalmente, la producción masiva por parte de la industria de nano-materiales, ha generado que los precios de los mismos tiendan a la baja y a su vez, ha incidido en el auge de la modificación de asfaltos con nanos para tratar de mejorar el material. No obstante, la composición química del nano-material y por ende sus propiedades físicas inherentes, hacen que cada nano-material tenga un efecto propio sobre el asfalto y formas de incorporación variables de acuerdo a la naturaleza de ambos.

En este artículo se evalúa en efecto de la incorporación de nano-materiales a la matriz del ligante asfáltico en pro de mejorar la calidad del mismo. Los nanomateriales evaluados corresponden a nano silicio y grafito. El ligante asfalto evaluado corresponde a un RC-70.

Para poder cuantificar el efecto de la modificación se emplean técnicas de caracterización superficial, morfológicas, reológicas y de termoanálisis, tales como calorimetría de barrido diferencial (DSC), Análisis termo gravimétrico (TGA), además de análisis espectroscópicos como Infrarrojo FTIR, RAMAN y la técnica de microscopía de fuerza atómica AFM. Dichos métodos de ensayo proporcionan información física y química que permite inferir sobre las condiciones del proceso de modificación, con base en parámetros cualitativamente evaluados. Todo lo anterior con la finalidad de asegurar un desempeño adecuado del asfalto.

En el tema de carreteras se están investigando las nuevas propiedades que los nanomateriales les pueden aportar. Estas nano partículas podrían solucionar problemas como conseguir una gran estabilidad del material para que no se degrade al sol y la dispersión homogénea para pintura de asfalto.

### **2.36 Polvo de silicio**

El silicio es uno de los elementos químicos cuyo símbolo es "Si" y que se encuentra en la tabla periódica en el grupo 14 o IVA. Por su abundancia ( $2,57 \times 10^5$  p.p.m.) es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno ( $4,95 \times 10^5$  p.p.m.). Este material compone alrededor del 20% de la corteza terrestre.

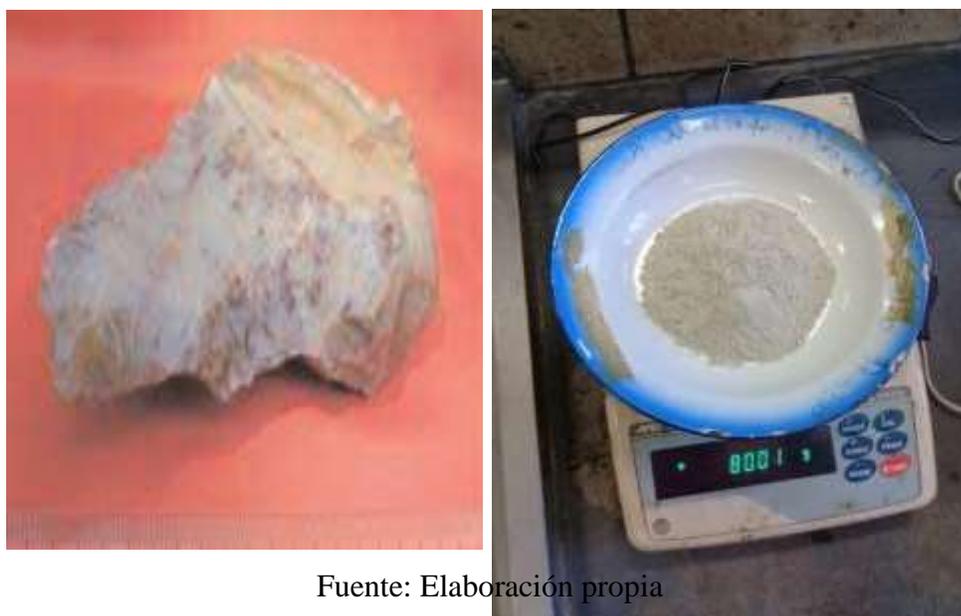
El silicio es una modificación de los silicatos a muy altas temperatura, pueden encontrarse en depósitos volcánicos.

La arena es en gran parte dióxido de silicio y la mayoría de las rocas corrientes, salvo calizas o dolomitas, contienen silicio.

Las nanoestructuras del silicio (Si) es un material casi 100% compuesto por dióxido de silicio en estado amorfo, como su nombre lo indica corresponde a un nanomaterial

de forma casi esférica y con una superficie porosa. Gracias a su proceso de síntesis se puede obtener en distintos rangos de tamaños, como producto final se encuentran en un medio líquido o en forma de polvo. Este rango de tamaño varía de unos pocos nanómetros hasta varios cientos otorgándole una gran área de superficie específica (SSA). Debido a este aumento de SSA, es que se presenta una mayor superficie activa, si bien facilitando una mayor interacción con los componentes de la matriz. Además gracias al tamaño de la nanosilice es posible que esta pueda actuar como relleno densificando la matriz.

**Figura 2.21.** Polvo de silicio



Fuente: Elaboración propia

### 2.36.1 Propiedades

El silicio tiene número atómico 14 lo cual significa que un átomo de *Si* aislado tiene 14 protones (partículas cargadas positivamente) en su núcleo y 14 electrones (partículas cargadas negativamente) orbitando alrededor de él como un sistema solar en miniatura. Los cuatro electrones restantes determinan cómo los átomos de silicio se organizan entre sí para formar el material de silicio sólido.

El *Si* es un pobre conductor de electricidad cuando todos los electrones están restringidos en enlaces; por lo que actúa como un aislante (no conduce electricidad).

Sin embargo, estos enlaces pueden romperse si se los excita lo suficiente, por ejemplo con un fotón proveniente del sol siempre que tenga suficiente energía.

En cuanto a sus propiedades químicas el *Si* en su forma cristalina es un material muy duro (6,5 en la escala de Moss) y su punto de fusión es 1687 K y el de ebullición es 3173 K.

El silicio en estado puro puede presentarse en forma cristalina o amorfa. Se denomina cristalina cuando existe un orden en la disposición de los átomos que, dependiendo del alcance de este orden, se denomina microcristalino (en este material el orden o los cristales alcanzan desde algunos nanómetros hasta el micrón (0.001mm)).

Este elemento tiene propiedades intermedias entre metales y no metales, es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre vital para la industria y construcción.

Es un material abrasivo muy importante, dentro de campo de la cerámica como del esmalte.

Esta propiedad de ser semiconductor que tiene el silicio, al igual que el germanio y otros materiales compuestos como el arseniuro de galio (GaAs), es fundamental para el funcionamiento de las celdas solares y para la microelectrónica.

Otra propiedad del polvo de silicio en contacto con cemento asfáltico produce un efecto beneficioso para el asfalto haciendo aumentar la temperatura de ablandamiento en 15 % con respecto a la tradicional.

### **2.36.2 El silicio en Bolivia**

Una prueba de laboratorio de la corporación minera de Bolivia (COMIBOL) determinó que arenas silíceas de Zudáñez (Chuquisaca) tiene una pureza del 92% lo

cual aventajara a este municipio para emplazar una fábrica de vidrios y comercialización de silicio.

Autoridades informaron que a fines de la gestión 2017 técnicos de COMIBOL llevaron muestras de silicio de Zudáñez, y tras un análisis de laboratorio, esta resulto tener una pureza del 92%.

En una reunión, técnicos del ministerio pidieron planos catastrales, coordenadas geodésicas a los pobladores de Zudáñez del área donde hay la materia prima.

Pobladores de Zudáñez identificaron 2 terrenos que podrían ser cedidos al ministerio de desarrollo productivo para la instalación de la fábrica.

Los técnicos del ministerio estiman que la construcción de la fábrica llevaría construirla un año según consultas que se hicieron sobre proyectos similares que se hicieron en Paraguay.

El gobierno nacional con este proyecto espera cubrir la demanda de botellas de la industria de vinos y singanis del sur del país.

Tarija también posee materia prima del silicio que podría ser explotado e industrializado para su uso, en la región de Padcaya en la provincia Avilés.

Hoy en día se encuentra el silicio en el mercado a un costo de 50 bs el kilogramo de este material.

### **2.37 El grafito**

El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono junto al diamante, a presión atmosférica y temperatura ambiente es más estable el grafito que el diamante.

La síntesis del carbono constituye una etapa básica del ciclo por el cual se forman muchos otros átomos. Se sabe que el grafito es ligeramente más estable que el

diamante. No es frecuente que existan materiales con características muy distintas formados por el mismo elemento químico.

En los años setenta del siglo pasado se estudiaron los compuestos intercalares de grafito. Constan de láminas muy finas de grafito, que pueden ser superconductoras, entre capas de otros materiales. En los noventa se descubrieron los nanotubos de carbono, laminas muy finas de grafito enrollado en forma de tubo. Finalmente, a principios del presente siglo, se demostró que podían aislarse y manipularse láminas de grafito con un espesor de un solo átomo: el grafeno.

El grafito natural es una forma alotrópica del carbón. Es un mineral suave, de color gris a negro, brillo metaloide, peso específico de 2.23, dureza de 1-2, cristaliza en el sistema hexagonal, estable y químicamente inerte a temperatura normal, inodoro, no tóxico, resistente al calor y excelente conductor de calor y electricidad.

El grafito es un apilamiento de capas de grafeno que se manifiestan juntas por una fuerza de atracción muy débil conocida fuerza de van der Waals.

Es extremadamente refractario, compresible y maleable; resiste el ataque químico, el choque térmico, la contracción y la oxidación.

El grafito se encuentra en yacimientos naturales y se lo puede extraer, pero también se lo puede producir artificialmente.

**Figura 2.22.** Grafito



Fuente: <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/publications/tackcoatguidelines.pdf>

### **2.37.1 Propiedades**

El grafito presenta propiedades físicas y químicas únicas comparadas con otros materiales de carbono de gran aplicación en áreas como la electrónica, química o electroquímica, entre las que destacan:

- Alta conductividad térmica (entre 3080 y 5150 W/m K) y eléctrica ((200 S/m) (ésta última nunca puede ser nula).
- Excelente estabilidad térmica con una temperatura de resistencia a la oxidación de hasta 601 °C.
- Alta elasticidad y dureza.
- Elevada área superficial (2600 cm<sup>2</sup>/g).
- Alta resistencia mecánica (200 veces mayor que la del acero).
- Puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades.
- Es el cristal de mayor elasticidad hasta un 20% sin quebrarse.
- Es impermeable a gases.
- Soporta la radiación ionizante.
- Es muy ligero y flexible.
- Bajo efecto Joule.
- Posee propiedades fotoeléctricas.

El grafito presenta además, excelentes propiedades electroquímicas entre las que se incluyen una amplia ventana de potencial, baja resistencia a la transferencia de carga y una excelente actividad electrocatalítica.

### **2.37.2 El grafito en el sector minero de Bolivia**

Actualmente el tema de la investigación más importante desde el punto de vista de la producción del grafito es encontrar una técnica reproducible que genere el producto sin defectos, de costo razonable y que produzca baja contaminación y que contribuya al mayor desarrollo económico de Bolivia.

Santa Cruz es uno de los departamentos que tiene grandes reservas naturales para producir grafito, las reservas de la materia prima son de 14.986,642 /Tm las mismas que se encuentran dentro del territorio del departamento de Santa Cruz, según estimaciones podemos decir que la piedra del grafito pesa 3 Kg, para una tonelada de grafito se requiere 344 piedras y además de una piedra se obtiene 1 metro de grafeno.

La planta de explotación de grafeno tendría una capacidad de procesar 40000 metros cuadrados de grafeno al año, el precio de venta en el mercado de grafeno es de 56 dólares el metro cuadrado.

Hoy en día el grafito se lo encuentra en el mercado a la venta en un precio de 80 bs el kilogramo.

### **2.38 Efecto físico-químico de polvo silicio y grafito en los riegos de liga**

Algunos ejemplos de estas fuerzas que se pueden dar en la ingeniería vial son, las fuerzas de atracción físico química que se dan entre las diferentes capas del pavimento, los agregados pétreos y las emulsiones asfálticas, la adherencia por fricción que se da por la aspereza de los áridos, esta aspereza es la responsable del contacto directo entre neumático y calzada, y la adherencia mecánica que se da en el fresado de una capa base con respecto a la colocación de una capa de refuerzo<sup>15</sup>.

### **2.39 Adherencia**

“Adherencia: Fuerza unitaria aplicada como tensión, compresión, corte, etc., requerida para romper un ensamble, ocurriendo la falla en el plano de la unión.”

A esta definición vale aclararle que la fuerza unitaria se calcula por unidad de área del plano que se desea evaluar. Una fuerza por unidad de área da como resultado una tensión que podrá ser cortante, de tracción, o de torsión según sea el esfuerzo aplicado al espécimen evaluado.

---

<sup>15</sup> “Nanomateriales en el desempeño de asfalto” Fabricio Leiva-Villacorta<sup>1</sup>, José Pablo Aguiar-Moyai, Rafael Ernesto Villegas-Villegas<sup>1</sup>, Jorge Salazar-Delgado<sup>1</sup>, Luis Guillermo Loría-Salazar<sup>1</sup>

A esta definición vale aclararle que la fuerza unitaria se calcula por unidad de área del plano que se desea evaluar. Una fuerza por unidad de área da como resultado una tensión que podrá ser cortante, de tracción, o de torsión según sea el esfuerzo aplicado al espécimen evaluado.

“Adherendo: Cuerpo unido a otro por un adhesivo.” Para paquetes estructurales de pavimentos los adherendos son los sustratos o capas asfálticas que deben estar íntimamente unidas.

“Adhesivo Estructural: Aquel capaz de soportar y transmitir cargas elevadas para mantener una estructura sometida a tensiones.”

# **CAPÍTULO III**

## **APLICACIÓN PRÁCTICA**

## 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 (capa base, agregados y cemento asfáltico), así también se realizará dosificación y caracterización de la mezcla asfáltica a utilizar para la confección de las probetas bicapa. La segunda etapa contemplará el diseño de las distintas probetas, para la realización de los ensayos de adherencia (para la determinación el porcentaje óptimo de polvo de silicio y grafito) y el ensayo de durabilidad (para demostrar la durabilidad del riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito). Se analizará el ligante de curado rápido.

Del ensayo de adherencia se seleccionará el porcentaje óptimo tanto del polvo de silicio como del grafito que garanticen una alta adherencia entre capas, esta tasa de ligante se utilizará para los ensayos de durabilidad, mediante el ensayo de desgaste de cántabro.

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.

#### 3.2 Procedencia de los materiales

##### 3.2.1 Capa base granular

La capa base para la realización de los ensayos en este proyecto fueron traídos del tramo caminero en construcción “comunidad Temporal-represa de San Jacinto”, del banco de material para capa base usado por la empresa que está ejecutando la obra SEDECA.

**Figura 3.1.** Ubicación de banco de capa base



Fuente: Google Earth

**Figura 3.2.** Capa base en el banco de SEDECA



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 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 3.3.** Ubicación de la planta de áridos “Garzón”



Fuente: Google earth

**Figura3.4.** Chancadora para la provisión de material



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.5.** Acopio de grava en la chancadora “Garzón”



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Cemento asfáltico

El betún como ligante asfáltico C.A. (85 – 100) con nombre Betunel proveniente del Brasil, fue proporcionado por SEDECA (servicio departamental de caminos).

**Figura 3.6.** Especificaciones del cemento asfáltico

STRATURA ASFALTOS					
BETUPEN PLUS (CA 85/100)					
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PRODUCTO	Limites	Método	Reproductibilidad	Encontradas	
Penetración a 25 °C 100gr	85-100	AASHTO T-49	4 dmm.	91	
Viscosidad Saybolt a 135°C	85 min.	AASHTO T-201	2 %	120	
Ensayo de la mancha (T-102)	Negativo	AASHTO T-102	ND	negativo	
Punto de ablandamiento (T-53)	43 a 46	AASHTO T-53	3 °C	45	
Ductilidad a 25 °C cm (T-51)	100 min.	AASHTO T-51	NBR	>100	
Viscosidad de brookfield a 135 °C, Cp	214 min.	AASHTO T-316	ND	290	
Viscosidad de brookfield a 150 °C, Cp	97 min.	AASHTO T-316	ND	152	
Viscosidad de brookfield a 177 °C, Cp	28 a 114	AASHTO T-316	ND	58	
Temperatura de mistura °C	Indicativo	Calculo	ND	141 a 147	
Temperatura de compactación °C	Indicativo	Calculo	ND	130 a 136	
Indice de penetración	1.5 a 0.5	Calculo/ Calculo	ND	-1.1	
Punto de inflamación C.O.C (T-48)	230 min.	AASHTO T-46	ND	>235	
Solubilidad (T-44)	99 min.	AASHTO T-44	0.26 %	99.9	
Densidad a 25 °C (T-228)	0.99 min	AASHTO T-228	0.005	1.012	
ENSAYO SOBRE EL RESIDUO DE PELÍCULA DELGADA 32 MM, 163 °C (AASHTO T-240)					
Pérdida de masa (T-240)	1 máx.	AASHTO T-240	NBR	0.41	
Penetración del residuo	50 min.	Calculo	ND	55	
Perdida por calentamiento (T-179)	1 min.	AASHTO T-179	4 dmm.	0.42	
Densidad a 25 °C (T-228)	1 a 1.05	AASHTO T-228	0.005	1	

Fuente: The asphalt Institute, Manual de Asfaltos

### 3.2.4 Emulsificante

Para el desarrollo de la investigación se utilizó gasolina especial adquirida de la estación de servicio PANAMERICANA, ubicado sobre la avenida Víctor Paz Estensoro pasando el coliseo universitario a un precio de 3.74 bs el litro.

Estos materiales a utilizar serán analizados en laboratorio de suelos, hormigones y asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

### 3.3 Ensayos de caracterización de los materiales

#### 3.3.1 Caracterización de la capa base

##### 3.3.1.1 Análisis granulométrico de la capa base (documento referencial ASTM D422 AASHTO T88)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría del suelo utilizado como capa base. Es aplicable a los suelos que se emplean en la elaboración de capas de la estructura de un pavimento flexible.

#### 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, Los agregados empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos de granulometría y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida.

**Figura 3.7.** Material para analizar



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.8.** Tamizado mediante lavado y secado

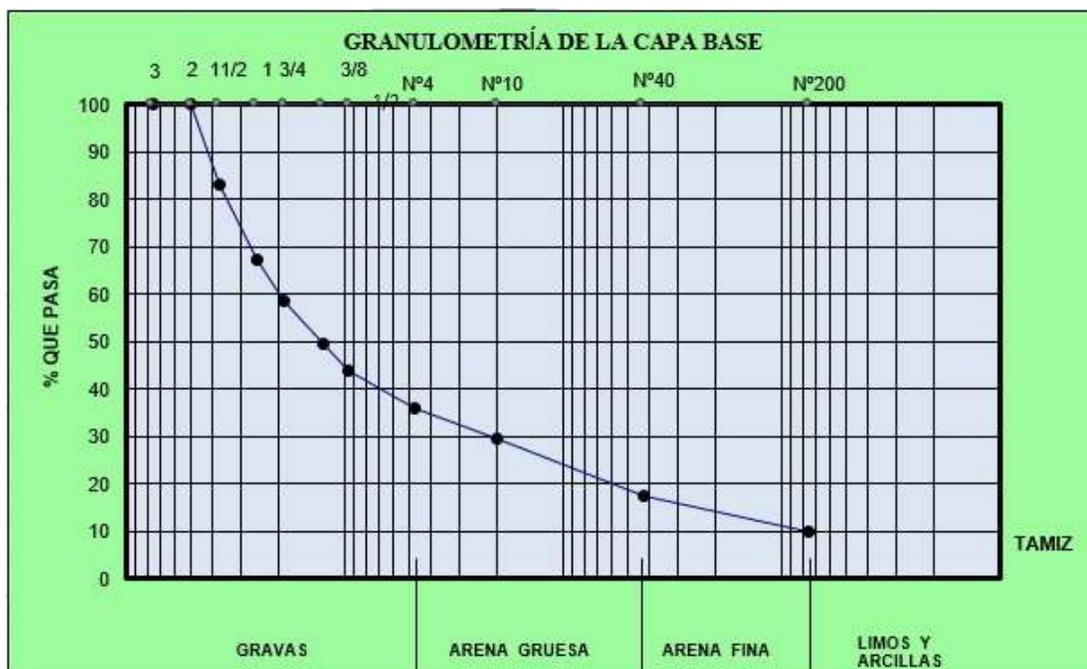
Fuente: Elaboración propia

**Resultados del ensayo****Granulometría de la capa Base****Tabla 3.1.** Resultados de la granulometría de la capa base

Tamices	Peso Total (gr.)		5000	A.S.T.M.	
	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
2"	50	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1 1/2"	37.50	843.90	843.90	16.88	<b>83.12</b>
1"	25.00	795.30	1639.20	32.78	<b>67.22</b>
3/4"	19.00	430.70	2069.90	41.40	<b>58.60</b>
1/2"	12.50	457.90	2527.80	50.56	<b>49.44</b>
3/8"	9.50	272.60	2800.40	56.01	<b>43.99</b>
N°4	4.75	400.90	3201.30	64.03	<b>35.97</b>
N°10	2.00	315.90	3517.20	70.34	<b>29.66</b>
N°40	0.425	600.40	4117.60	82.35	<b>17.65</b>
N°200	0.075	385.40	4503.00	90.06	<b>9.94</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.9.** Curva granulométrica de la capa base



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.2 Determinación de límite líquido del suelo de la capa base (Documento referencial ASTM D4318 AASHTO T89 y AASHTO T90)

El límite líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de masa de suelo seco en el horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados límite y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la tasa de bronce de la maquina casa grande y dividida en 2 pociones simétricas separadas 2mm entre sí, fluya y entre en contacto en una longitud de 10 mm. aplicando 25 golpes.

#### Objetivo

Tiene por objetivo determinar el límite líquido de suelo que conformara la capa base mediante la maquina casa grande, que nos permitirá deducir si nuestro suelo en estudio es plástico o no plástico y ver su comportamiento del suelo en presencia de humedad.

**Figura 3.10.** Material preparado para límites de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.11.** Realización de ensayo de límites de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

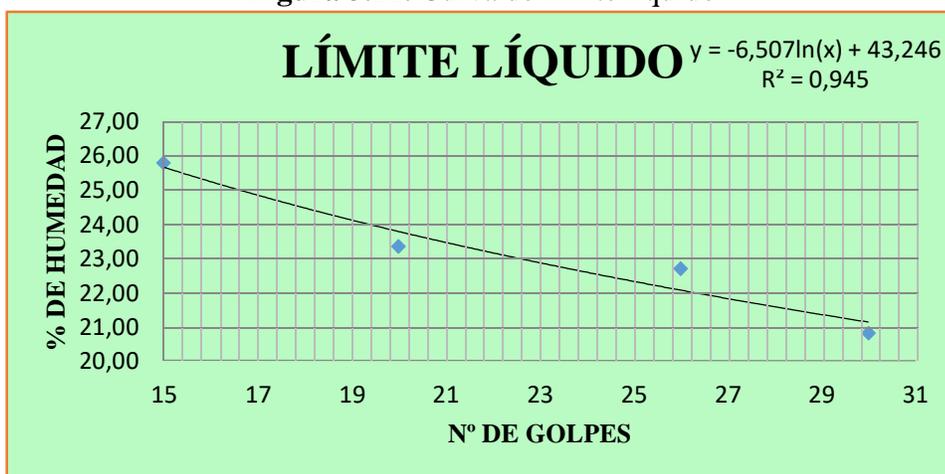
## Resultados del ensayo

**Tabla 3.2.** Resultados de límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	15	20	26	30
Suelo Húmedo + Cápsula	55.00	71.00	60.40	76.00
Suelo Seco + Cápsula	48.10	61.60	53.10	66.60
Peso del agua	6.90	9.40	7.30	9.40
Peso de la Cápsula	21.30	21.30	20.90	21.40
Peso Suelo seco	26.80	40.30	32.20	45.20
Porcentaje de Humedad	25.75	23.33	22.67	20.80

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.12.** Curva de límite líquido



Límite Líquido (LL)  
**22**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.3.** Resultados de límite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	23.60	31.10	23.30
Peso de suelo seco + Cápsula	23.20	30.60	22.80
Peso de cápsula	21.10	27.80	19.80
Peso de suelo seco	2.10	2.80	3.00
Peso del agua	0.40	0.50	0.50
Contenido de humedad	19.05	17.86	16.67

Límite Plástico (LP)

**18**

Índice de Grupo (IG)

**0**

Fuente: Elaboración propia

### **3.3.1.3 Ensayo de compactación considerando familias de curvas método de un punto (documento referencial AASHTO T272)**

La compactación es el proceso realizado generalmente por medios mecánicos por lo cual se obliga a las partículas de suelo a ponerse más en contacto con otras, mediante la expulsión de aire de los poros, lo que implica una reducción de los vacíos lo que produce cambios de volumen de importancia, siendo por lo tanto la condición de un suelo compactado a una humedad óptima.

#### **Objetivo**

Este ensayo se emplea para la determinación rápida del peso unitario máxima y de la humedad optima de una muestra de suelo empleando familia de curvas y un punto.

#### **Resumen del método**

Se hizo el método C, se toma una muestra representativa de suelo que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ '' 5000 gr, la cual se la hace secar previamente durante 24 horas en un horno industrial, posteriormente se mezcla con agua suficiente para humedecerla hasta obtener 4 puntos de porcentaje por debajo del contenido de humedad optimo, se obtendrá una mayor precisión en la determinación del peso unitario máximo, a medida que la humedad se aproxime al contenido de agua óptimo.

Luego se forma un espécimen con el suelo preparado en un molde de 5'' de diámetro con collar ajustado en 3 capas aproximadamente iguales, compactándose cada capa con 56 golpes con el martillo T-180 uniformemente distribuidos en el área del molde de compactación.

De cada porcentaje de humedad se deberá extraer una muestra representativa luego de la compactación para para hacerla secar en el horno por 24 horas para obtener el contenido de humedad de la muestra en estudio que nos permitirá elaborar nuestra gráfica.

**Figura 3.13.** Preparación del suelo para su compactación



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.14.** Realización del ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

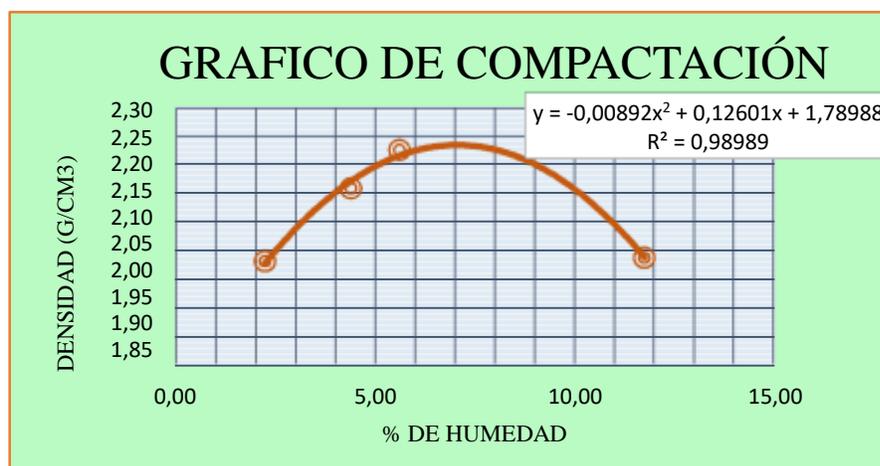
## Resultados del ensayo

**Tabla 3.4.** Resultados de la compactación

<b>Muestra:</b> Única		<b>Volumen:</b>	2112.5	cm <sup>3</sup>
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10844.80	11219.20	11425.30	11268.20
Peso del molde	6459.5	6459.50	6459.50	6459.50
Peso suelo húmedo	4385.3	4759.70	4965.80	4808.70
Volumen de la muestra	2112.5	2112.50	2112.50	2112.50
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2.08	2.25	2.35	2.28
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	76.50	90.90	74.90	68.80
Peso suelo seco + cápsula	75.30	87.90	72.00	63.60
Peso del agua	1.20	3.00	2.90	5.20
Peso de la cápsula	21.60	19.6	20.30	19.40
Peso suelo seco	53.70	68.30	51.70	44.20
Contenido de humedad (%h)	2.23	4.39	5.61	11.76
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2.03	2.16	2.23	2.04

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.15.** Grafica de compactación



Densidad máxima	2.23	gr/cm <sup>3</sup>
Humedad óptima	7.06	%

Fuente: Elaboración propia

#### **3.3.1.4 Determinación de la relación de soporte del suelo del laboratorio (CBR de laboratorio) (documento referencial ASTM D1883 AASHTO T193)**

Este método se establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como razón de soporte de california (CBR), el ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio con la humedad óptima.

##### **Objetivo**

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos subrasante como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, capa sub base, base y carpeta de rodadura granulares.

##### **Resumen del método**

Una vez conocida la humedad óptima del suelo en estudio a través de la compactación, se mezcla con agua cada una de las tres porciones de suelo para ensayar, previo secado al horno a una temperatura constante. Se agrega la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Cada porción tendrá 5000 gr de suelo en estudio la cual se mezcla hasta obtener una distribución uniforme de humedad.

Posteriormente para cada molde coloque el disco espaciador sobre la capa base. Fije el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y se coloca un disco de papel filtro sobre el espaciador, luego se compacta cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde en 3 capas cada molde, cada probeta se debe compactar con distinta energía de tal manera que la densidad en la cual se desee.

El primer molde será a 12 golpes cada capa, el segundo molde será a 25 golpes y el tercer molde será a 56 golpes.

Una vez compactada la muestra se enrasa el suelo con la ayuda de una regla metálica rellenando con material fino y se invierte el molde para colocar papel filtro y quitar el disco espaciador, se procede a pesar el molde con el suelo compactado para obtener

el peso húmedo, posteriormente se colocara un vástago ajustable y la placa perforada sobre la probeta de suelo compactado y se aplica las cargas hasta producir una sobrecarga igual a la ejercida por la estructura del pavimento sobre el material en estudio esta debe ser igual a 10 lb en ningún caso debe ser menor y luego se la someterá a sumergimiento en agua para ver la expansión volumétrica del suelo.

**Figura 3.16.** Preparación de la suelo para ensayo de CBR



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.17.** Realización del ensayo de CBR



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo CBR 1

**Tabla 3.5.** Datos de contenido de humedad y peso unitario CBR1

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11697.50		11950	12905		13040	12950		13030
Peso Molde	7254.10		7254.10	8003.80		8003.80	8038.30		8038.30
Peso muestra húmeda	4443.40		4695.90	4901.20		5036.20	4911.70		4991.70
Volumen de la muestra	2121		2121	2121		2121	2121		2121
Peso Unit. Muestra Húm.	2.09		2.21	2.31		2.37	2.31		2.35
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	59.80	58.80	86.90	67.70	53.80	82.10	67.80	70.00	83.60
Peso muestra seca + tara	54.80	54.20	81.20	51.20	50.70	77.80	64.20	65.80	81.00
Peso del agua	5.00	4.60	5.70	16.50	3.10	4.30	3.60	4.20	2.60
Peso de tara	19.10	17.60	19.50	18.40	18.00	18.20	20.30	17.80	17.90
Peso de la muestra seca	35.70	36.60	61.70	32.80	32.70	59.60	43.90	48.00	63.10
Contenido humedad %	14.01	12.56	9.23	50.30	9.48	7.21	8.20	8.75	4.12
Promedio cont. Humedad	13.29		9.23	29.89		7.21	8.48		4.12
Peso Unit. muestra seca	1.85		2.02	1.77		2.21	2.13		2.26

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.6.** Datos y cálculos de expansión de CBR 1

Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde nº 1			Molde nº 2			Molde nº 3			C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
			Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión			
			Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%		
06-mar	10:20	1	17	1.70	0	23	2.30	0	10	1	0	5.90	1.84
07-mar	10:20	2	18.10	1.81	0.61	24	2.40	0.562	10.50	1.05	0.28	13.20	1.77
08-mar	10:20	3	18.10	1.81	0.61	24	2.40	0.562	10.50	1.05	0.28	38.90	2.13
09-mar	10:20	4	18.20	1.82	0.67	24	2.40	0.562	10.50	1.05	0.28		

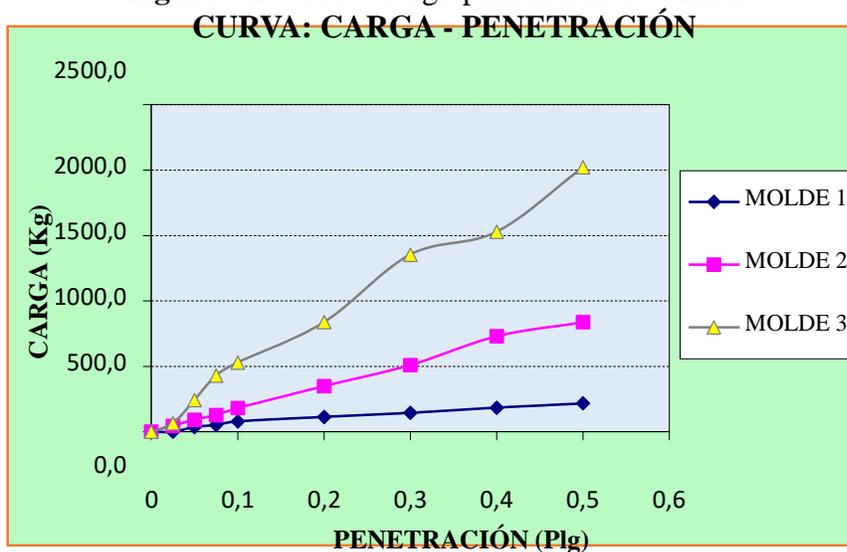
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.7.** Resultados de CBR 1

Penetración		Carga Normal	Molde nº 1				Molde nº 2				Molde nº 3			
			Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
Pulg.	mm	Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0.0	0			0.0	0			0.0	0		
0.025	0.63		0.00	0.00			45.71	2.40			63.35	3.30		
0.05	1.27		36.21	1.90			91.84	4.70			242.46	12.50		
0.075	1.9		52.49	2.70			127.12	6.60			429.71	22.20		
0.1	2.54	1360	79.63	4.10		<b>5.90</b>	180.04	9.30		<b>13.2</b>	528.76	27.30		<b>38.90</b>
0.2	5.08	2040	113.55	5.90		<b>5.60</b>	348.30	18.00		<b>17.1</b>	836.78	43.20		<b>41.00</b>
0.3	7.62		144.76	7.50			509.77	26.30			1353.76	69.90		
0.4	10.16		184.11	9.50			729.58	37.70			1528.80	79.00		
0.5	12.7		216.68	11.20			836.78	43.20			2021.35	104.40		

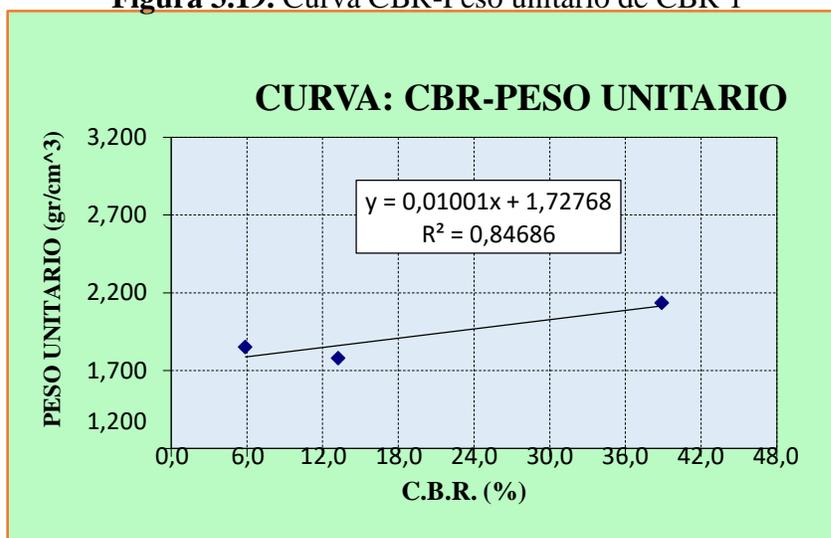
Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.18.** Curva carga-penetración de CBR 1



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.19.** Curva CBR-Peso unitario de CBR 1



Fuente: Elaboración propia

CBR 100% D.máx	
<b>50.67</b>	<b>%</b>
CBR 95% D.Máx.	
<b>39.51</b>	<b>%</b>

## Resultados del ensayo CBR 2

**Tabla 3.8.** Datos y resultados de humedad y peso unitario de CBR 2

N° capas	5			5			5		
N° golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11705.20		11965	11685		11795	12210		12270
Peso Molde	7412.60		7412.60	6920.90		6920.90	7277.80		7277.80
Peso muestra húmeda	4292.60		4552.40	4764.10		4874.10	4932.20		4992.20
Volumen de la muestra	2121		2121	2121		2121	2121		2121
Peso Unit. Muestra Húm.	2.02		2.14	2.24		2.29	2.32		2.35
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	79.60	67.40	107.60	64.10	85.10	89.20	81.50	67.30	68.20
Peso muestra seca + tara	72.70	62.00	99.70	58.90	79.10	84.60	74.80	63.50	65.30
Peso del agua	6.90	5.40	7.90	5.20	6.00	4.60	6.70	3.80	2.90
Peso de tara	18.30	18.70	18.20	19.60	17.70	21.00	18.70	16.40	19.30
Peso de la muestra seca	54.40	43.30	81.50	39.30	61.40	63.60	56.10	47.10	46
Contenido humedad %	12.68	12.47	9.69	13.23	9.77	7.23	11.93	8.06	6.30
Promedio cont. Humedad	12.58		9.69	11.50		7.23	10.01		6.30
Peso Unit. muestra seca	1.79		1.95	2.01		2.14	2.11		2.21

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9.** Datos y cálculos de expansión de CBR 2

Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde n° 1			Molde n° 2			Molde n° 3			C.B.R %	Peso Unit. gr/cm3
			Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión			
			Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%		
12-mar	16:40	1	13	1.3	0	9.1	0.91	0	17.1	1.71	0	6.20	1.79
13-mar	16:40	2	15	1.5	1.124	10.2	1.02	0.618	17.6	1.76	0.281	14.90	2.01
14-mar	16:40	3	15.2	1.52	1.237	10.5	1.05	0.787	18	1.8	0.506	41.50	2.11
15-mar	16:40	4	15.2	1.52	1.237	10.5	1.05	0.787	18	1.8	0.506		

Fuente: Elaboración propia

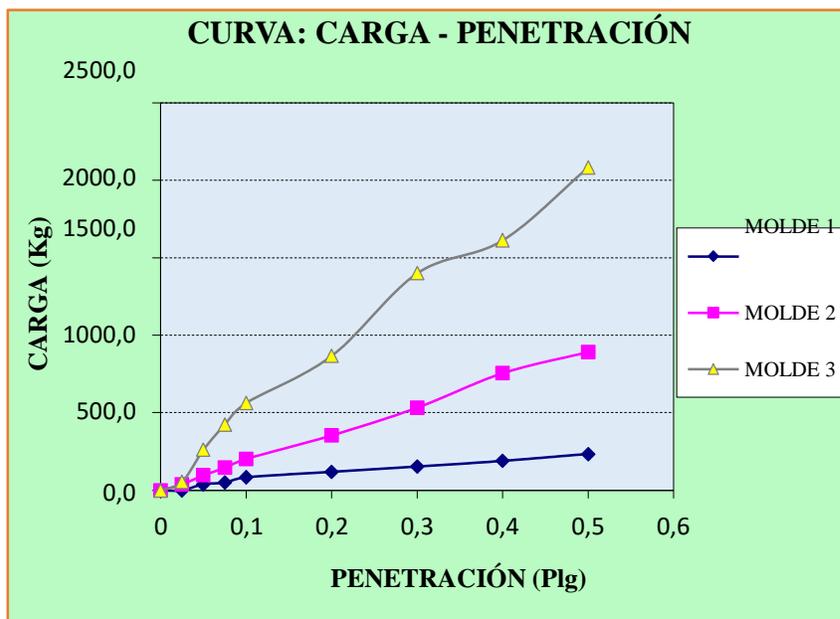
**Tabla 3.10.** Resultados de CBR 2

Penetración		Carga normal	Molde n° 1				Molde n° 2				Molde n° 3			
			Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
Pulg.	mm	Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0.0	0			0.0	0			0.0	0		
0.025	0.63		0.00	0.00			38.92	2.00			53.85	2.80		
0.05	1.27		38.92	2.00			97.27	5.00			261.45	13.50		
0.075	1.9		49.78	2.60			146.12	7.50			424.28	21.90		
0.1	2.54	1360	83.70	4.30			6.2	203.11	10.50		14.9	564.04	29.10	41.5
0.2	5.08	2040	118.98	6.10			5.8	355.08	18.30		17.4	867.99	44.80	42.5

0.3	7.62		152.90	7.90		534.19	27.60			1401.25	72.40		
0.4	10.16		189.54	9.80		756.72	39.10			1614.28	83.40		
0.5	12.7		234.32	12.10		893.77	46.20			2085.13	107.70		

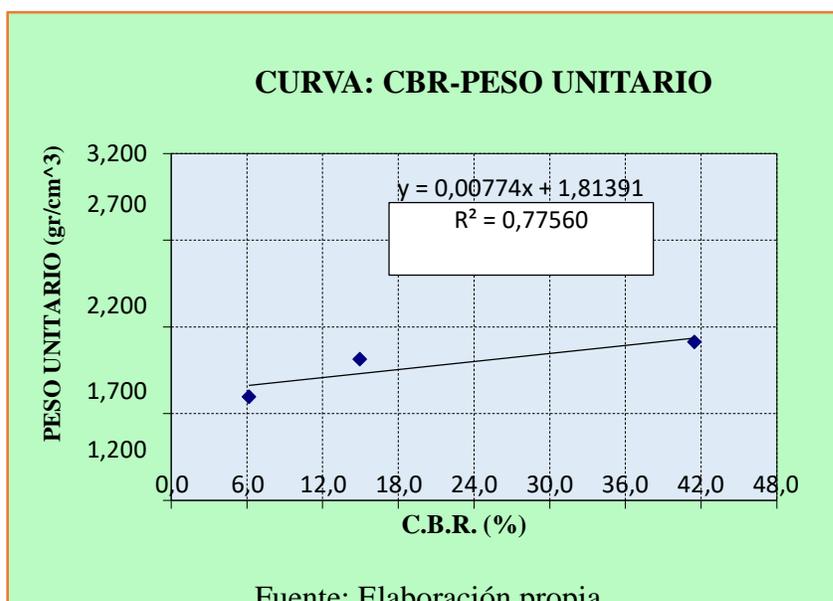
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. Curva carga-penetración de CBR 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Curva CBR-Peso unitario de CBR 2



Fuente: Elaboración propia

CBR 100% D.máx	
<b>54.39</b>	<b>%</b>
CBR 95% D.Máx.	
<b>39.95</b>	<b>%</b>

### Resultados del ensayo CBR 3

**Tabla 3.11.** Datos y resultados de humedad y peso unitario de CBR 3

N° capas	5			5			5		
N° golpes por capa	12			25			56		
condición de muestra	Antes de mojar	D. de M		Antes de mojar	D. de M		Antes de mojar	D. de M	
Peso muestra húm.+molde	11586.10	11860		10848.20	11049		10299.30	10461	
Peso Molde	7237.40	7237.40		6269.90	6269.90		5552.30	5552.30	
Peso muestra húmeda	4348.70	4622.60		4578.30	4779.30		4747.00	4908.20	
Volumen de la muestra	2121	2121		2121	2121		2121	2121	
Peso Unit. Muestra Húm.	2.05	2.17		2.15	2.25		2.23	2.31	
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	55.80	46.40	51.90	61.10	50.20	65.90	55.30	49.20	52.30
Peso muestra seca + tara	51.50	42.80	48.10	57.60	47.00	62.20	52.60	47.00	50.00
Peso del agua	4.30	3.60	3.80	3.50	3.20	3.70	2.70	2.20	2.30
Peso de tara	19.80	19.70	20.80	21.50	21.10	21.10	21.80	21.40	19.10
Peso de la muestra seca	31.70	23.10	27.30	36.10	25.90	41.10	30.80	25.60	30.90
Contenido humedad %	13.56	15.58	13.91	9.69	12.36	9.00	8.76	8.59	7.44
Promedio cont. Humedad	14.57		13.91	11.03		9.00	8.68		7.44
Peso Unit. muestra seca	1.78		1.91	1.94		2.06	2.05		2.15

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12.** Datos y cálculos de expansión de CBR 3

Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde n° 1			Molde n° 2			Molde n° 3			C.B.R %	Peso Unit. gr/cm3
			lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión			
			Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%	Extens.	cm.	%		
19-mar	11:40	1	17.50	1.75	0	15.00	1.50	0	16.00	1.60	0	6.50	1.78
20-mar	11:40	2	18.00	1.80	0.28	16.00	1.60	0.56	17.00	1.70	0.56	14.60	1.94
21-mar	11:40	3	18.00	1.80	0.28	16.00	1.60	0.56	17.50	1.75	0.84	42.10	2.05
22-mar	11:40	4	18.00	1.80	0.28	16.00	1.60	0.56	17.50	1.75	0.84		

Fuente: Elaboración propia

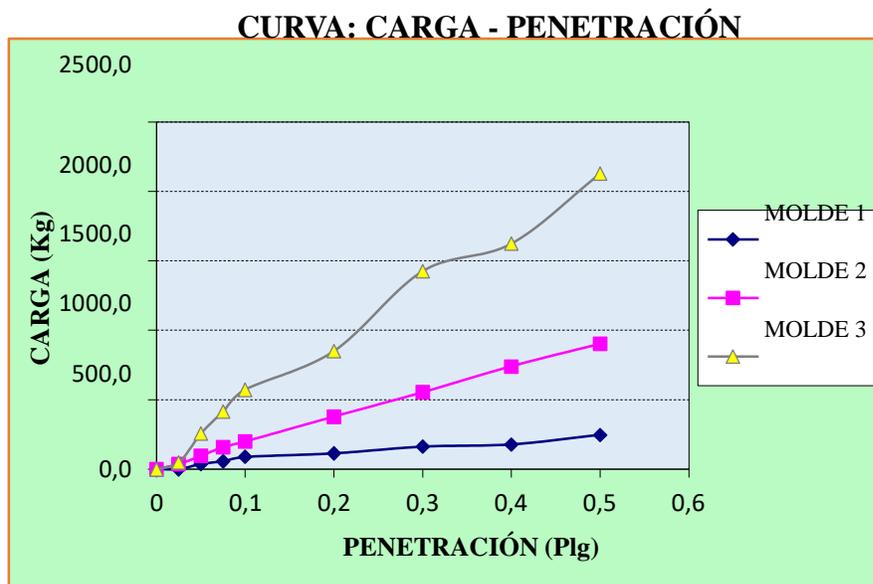
**Tabla 3.13.** Resultados de CBR 3

Penetración		Carga normal	Molde n° 1				Molde n° 2				Molde n° 3			
			Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
Pulg.	mm	Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0.0	0			0.0	0			0.0	0		
0.025	0.63		0.00	0.00			36.21	1.90			47.06	2.40		

0.05	1.27		36.21	1.90		94.56	4.90		256.03	13.20		
0.075	1.9		56.56	2.90		158.33	8.20		414.78	21.40		
0.1	2.54	1360	87.77	4.50	<b>6.50</b>	199.04	10.30	<b>14.60</b>	572.18	29.60	<b>42.1</b>	
0.2	5.08	2040	113.55	5.90	<b>5.60</b>	378.15	19.50	<b>18.50</b>	850.35	43.90	<b>41.7</b>	
0.3	7.62		162.40	8.40		553.19	28.60		1425.67	73.70		
0.4	10.16		178.68	9.20		740.44	38.30		1623.78	83.90		
0.5	12.7		247.89	12.80		901.91	46.60		2128.55	110.00		

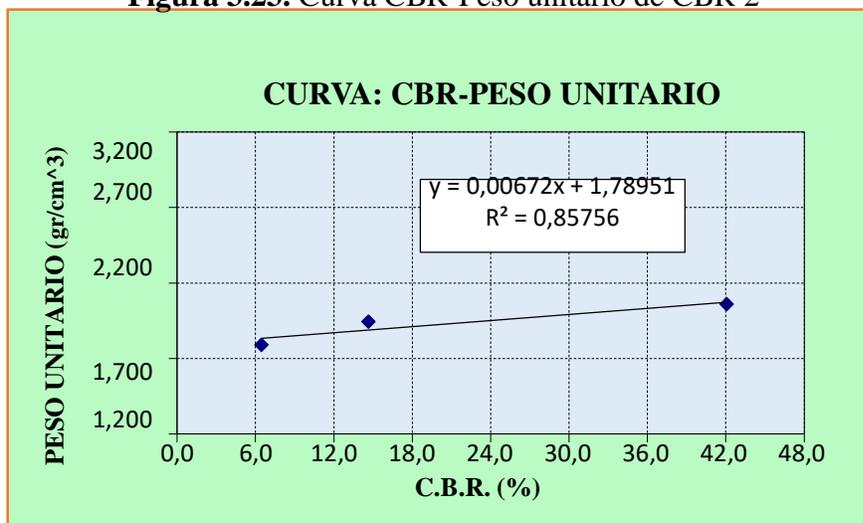
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22. Curva carga-penetración de CBR 3



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23. Curva CBR-Peso unitario de CBR 2



Fuente: Elaboración propia

CBR 100% D.máx	
<b>66.28</b>	<b>%</b>
CBR 95% D.Máx.	
<b>49.65</b>	<b>%</b>

### 3.3.1.5 Clasificación del suelo de la capa base método AASHTO Y SUCS

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada. Actualmente, dos sistemas de clasificación que usan la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos son usados comúnmente por los ingenieros de suelos. Estos son el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS.

Para la clasificación del suelo solo se usó la granulometría del suelo y el ensayo de límites, con estos dos ensayos se procedió a clasificar el suelo a través del uso de tablas referidas a los dos sistemas de clasificación de suelos usados en nuestro medio.

**Tabla 3.14.** Clasificación de suelo método AASHTO

DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM #200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Subgrupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b> (% que pasa por cada tamiz)												
Serie ASTM	#10	≤ 50										
	#40	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
	#200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
<b>ESTADO DE CONSISTENCIA</b> (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)												
Límite líquido			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	>41 {IP<LL-30}	>41 {IP>LL-30}
Índice de plasticidad	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11
ÍNDICE DE GRUPO	0	0	0	0	≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA						ACEPTABLE A MALA					

Fuente: Principles of geotechnical Engineering, Braja M. Das. 1988

**Tabla 3.15.** Clasificación de suelo método SUCS

Símbolo de grupo	Criterios
GW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para GW
GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12) o el índice de plasticidad menor que 4
GC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC

Fuente: Principles of geotechnical Engineering, Braja M. Das. 1988

## Resultados de la clasificación

**Tabla 3.16.** Clasificación del suelo de la capa base

<b>Clasificación del suelo</b>	<b>SUCS: GW</b> <b>AASHTO: A-1-a(0)</b>
<b>Descripción</b>	Fragmentos de piedra, grava y arena

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.2 Caracterización de los agregados

#### 3.3.2.1 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 3.24.** Materiales para ser tamizado



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.25.** Tamizado mediante los tamices normalizados ASTM



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

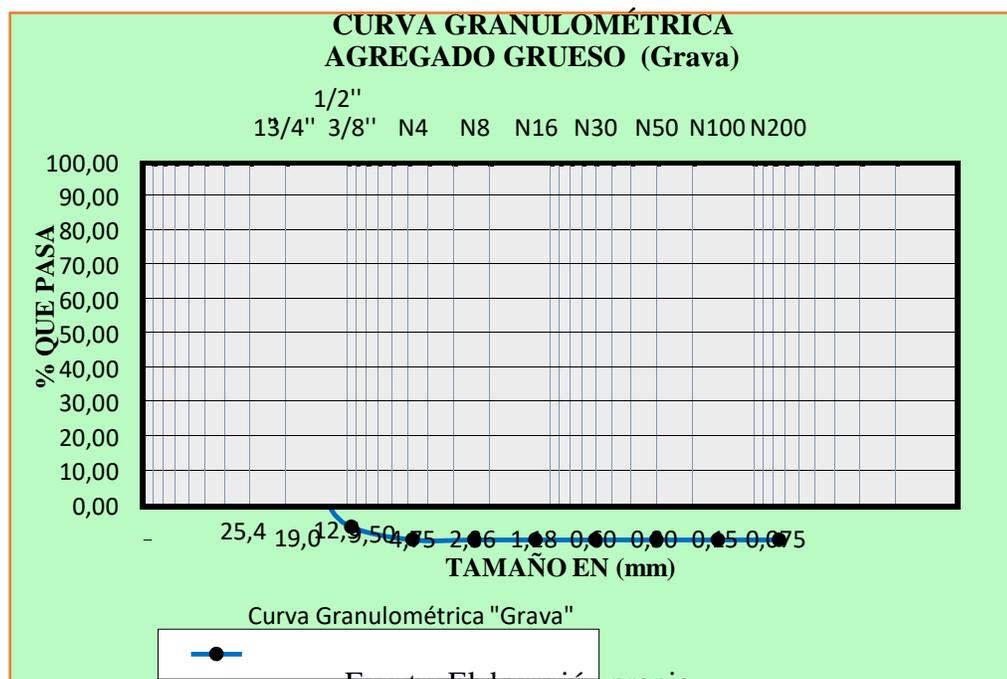
### Granulometría agregado grueso (grava)

**Tabla 3.17.** Resultados de la granulometría del agregado grueso (grava)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	120.00	120.00	2.40	97.60
3/4"	19.0	2625.40	2745.40	54.91	45.09
1/2"	12.5	1682.70	4428.10	88.56	11.44
3/8"	9.50	376.20	4804.30	96.09	3.91
Nº4	4.75	187.30	4991.60	99.83	0.17
Nº8	2.36	0.10	4991.70	99.83	0.17
Nº16	1.18	0.20	4991.90	99.84	0.16
Nº30	0.60	0.10	4992.00	99.84	0.16
Nº50	0.30	0.12	4992.12	99.84	0.16
Nº100	0.15	0.10	4992.22	99.84	0.16
Nº200	0.075	0.20	4992.42	99.85	0.15
BASE	-	7.50	4999.92	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.26.** Curva granulométrica del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

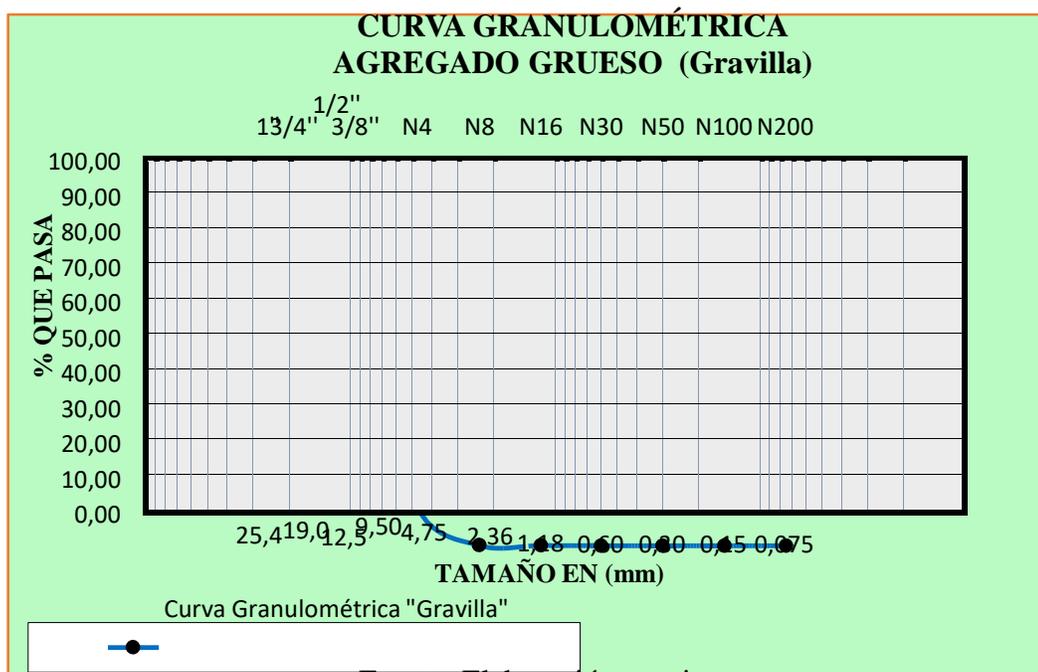
### Granulometría agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.18.** Resultados del análisis granulométrico de la gravilla

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	6.30	6.30	0.13	99.87
3/8"	9.50	380.00	386.30	7.73	92.27
N°4	4.75	3971.20	4357.50	87.15	12.85
N°8	2.36	571.10	4928.60	98.57	1.43
N°16	1.18	4.20	4932.80	98.66	1.34
N°30	0.60	2.40	4935.20	98.70	1.30
N°50	0.30	1.20	4936.40	98.73	1.27
N°100	0.15	0.50	4936.90	98.74	1.26
N°200	0.075	0.12	4937.02	98.74	1.26
BASE	-	62.80	4999.82	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.27.** Curva granulométrica del agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

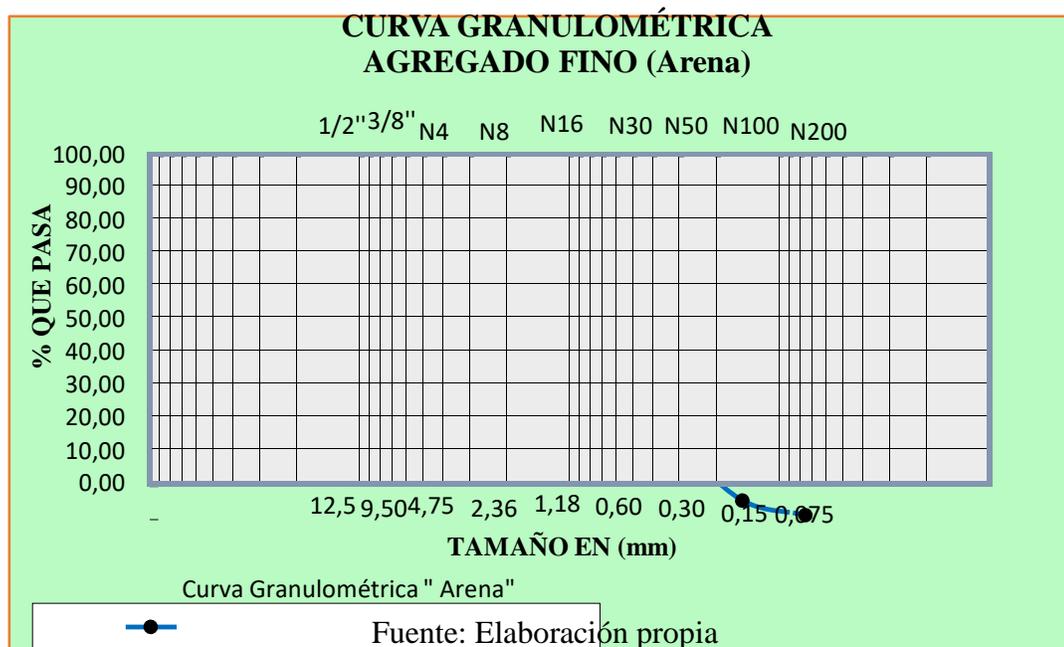
### Granulometría agregado fino (arena)

**Tabla 3.19.** Resultados del análisis granulométrico del agregado fino

Peso Total (gr.)			2000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
Nº4	4.75	137.70	137.70	6.89	<b>93.12</b>
Nº8	2.36	395.10	532.80	26.64	<b>73.36</b>
Nº16	1.18	321.70	854.50	42.73	<b>57.28</b>
Nº30	0.60	280.60	1135.10	56.76	<b>43.25</b>
Nº50	0.30	405.70	1540.80	77.04	<b>22.96</b>
Nº100	0.15	343.10	1883.90	94.20	<b>5.80</b>
Nº200	0.075	89.20	1973.10	98.66	<b>1.35</b>
BASE	-	26.60	1999.70	99.99	<b>0.02</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.28.** Curva granulométrica del agregado fino (arena)



### 3.3.2.2 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 del agregado grueso como ser la grava y la gravilla, y el porcentaje de absorción del agregado grueso.

#### Resumen del método

Prioramente se realizara la preparación de la muestra pesando porciones de 5000 gr de agregado, tanto de la grava como de la gravilla en estado seco, se sumergirá el material retenido en el tamiz N° 4 con la cantidad especificada durante 24 horas para quitar las impurezas y el material fino del agregado, después del periodo de inmersión se secará la muestra con un paño con el fin de eliminar el agua superficial, se pesará y se asignara como B, se vuelve a sumergir y se determina el peso sumergido, se designara 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 realizara el cálculo del peso específico.

**Figura 3.29.** Muestra sumergida por 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.30.** Muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.31.** Obtención del peso sumergido de la muestra



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

### Peso específico agregado grueso (grava)

**Tabla 3.20.** Resultados del peso específico del agregado grueso (grava)

	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.54	2.59	2.66	1.77
2	2.57	2.61	2.69	1.76
3	2.55	2.59	2.67	1.78
<b>PROM.</b>	<b>2.55</b>	<b>2.60</b>	<b>2.67</b>	<b>1.77</b>

Fuente: Elaboración propia

### Peso específico agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.21.** Resultados de peso específico del agregado grueso (gravilla)

	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.50	2.59	2.73	3.37
2	2.51	2.60	2.74	3.39
3	2.51	2.59	2.74	3.37
<b>PROM.</b>	<b>2.51</b>	<b>2.59</b>	<b>2.74</b>	<b>3.38</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.2.3 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 3.32.** Material sumergido por un tiempo de 24 hrs.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.33.** Verificación de la condición de saturado con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.34.** Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

**Tabla 3.22.** Resultados del peso específico del agregado fino (arena)

	<b>P. e. a granel (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P. e. saturado con sup. seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P. e. aparente (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de absorción</b>
1	2.61	2.68	2.80	2.58
2	2.60	2.66	2.78	2.36
3	2.62	2.68	2.80	2.46
<b>PROM.</b>	<b>2.61</b>	<b>2.67</b>	<b>2.79</b>	<b>2.47</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.4 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 3.35.** Peso unitario del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.36.** Peso unitario del agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.37.** Peso unitario del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

### Peso unitario de agregado grueso (grava)

**Tabla 3.23.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (grava)

Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )
1.39	1.51

Fuente: Elaboración propia

### Peso unitario de agregado grueso (gravilla)

**Tabla 3.24.** Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso (gravilla)

Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )
1.41	1.54

Fuente: Elaboración propia

### Peso unitario de agregado fino (arena)

**Tabla 3.25.** Peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena)

Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> )
1.48	1.72

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.2.5 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 3.38.** Muestra de arena consolidada en la solución química



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.39.** Medición del nivel de arena



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

**Tabla 3.26.** Resultados de equivalencia de arena

N° de muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de Arena (%)
1	10.1	10.80	93.52
2	10.9	11.50	94.78
3	11.4	12.00	95.00
<b>Promedio</b>			<b>94.43</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.6 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 3.27., 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 de acuerdo al tipo de gradación del material a ser analizado, 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 3.40.** Preparación de material para el ensayo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.41.** Descripción de desgaste dentro de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.27.** 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		15	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

## Resultados del ensayo

**Tabla 3.28.** Resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles (grava)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de desgaste (%)	Especificación astm
A	5000	3842.70	23.15	35% Max
B				35% Max
C				35% Max
D				35% Max

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.29.** 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	4166.10	16.68	35% Max
D				35% Max

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.7 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 MPi
- Calcular el índice de lajas de cada fracción i (ILi), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I_i = \frac{M_{Pi}}{M} * 100$$

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 3.42.** Determinación del porcentaje de lajas



Fuente: Elaboración propia

### Resultados del ensayo

**Tabla 3.30.** Resultados del ensayo de índice de lajas

	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	<b>3.21</b>
1/2-3/8	0.273	798.50	62.10	860.60	<b>2.10</b>
3/8-1/4	0.184	887.70	53.60	941.30	<b>1.82</b>
<b>Total</b>		<b>2785.10</b>	<b>213.00</b>	<b>2998.10</b>	<b>7.13</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.8 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 (agregado grueso grava y gravilla), mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

#### Resumen del método

Cada fracción de material retenido en los tamices  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", 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 3.43.** Fracción de material retenido en los diferentes tamices



Fuente: Elaboración propia



## Resultados del ensayo

### Durabilidad a los sulfatos del agregado grueso

**Tabla 3.31.** 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	<b>0.01</b>
3/4"	1/2"	503.10	501.00	2.10	0.42	75.10	<b>0.31</b>
1/2"	3/8"	301.30	299.90	1.40	0.46	95.00	<b>0.44</b>
3/8"	N° 4	100.30	99.70	0.60	0.60	99.90	<b>0.59</b>
Pérdidas totales					1.60		<b>1.36</b>

Fuente: Elaboración propia

## Durabilidad a los sulfatos del agregado fino

**Tabla 3.32.** Resultados de la durabilidad a los sulfatos del agregado fino

<b>Análisis del agregado fino (arena)</b>							
<b>Tamiz</b>		<b>Peso inicial</b>	<b>Peso final</b>	<b>Pérdidas peso</b>		<b>% retenido de la granulometría inicial</b>	<b>Pérdidas corregidas</b>
<b>Pasa</b>	<b>Retiene</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>3/8"</b>	<b>Nº 4</b>	100.30	99.70	0.60	0.60	85.30	<b>0.51</b>
<b>Nº 4</b>	<b>Nº 8</b>	100.20	99.50	0.70	0.70	98.10	<b>0.69</b>
<b>Nº 8</b>	<b>Nº 16</b>	100.00	98.80	1.20	1.20	98.90	<b>1.19</b>
<b>Nº 16</b>	<b>Nº 30</b>	100.10	98.60	1.50	1.50	98.90	<b>1.48</b>
<b>Nº 30</b>	<b>Nº 50</b>	100.00	99.10	0.90	0.90	98.90	<b>0.89</b>
<b>Pérdidas totales</b>					<b>4.90</b>		<b>4.75</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Caracterización del cemento asfáltico

#### 3.3.3.1 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 3.46.** Realización de la penetración de la muestra



Fuente: Elaboración propia

### Resultados del ensayo

**Tabla 3.33.** Resultados del ensayo de penetración

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
92	85	100

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.3.2 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 de 25°C, 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 3.47.** Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

### Resultados del ensayo

**Tabla 3.34.** Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
109 cm	>100 cm	-

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.3 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 3.48.** Realización del ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

#### Resultados del ensayo

**Tabla 3.35.** Resultados del ensayo de punto de inflamación

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
288 °C	>230 °C	-

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.4 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 3.49.** Realización del ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

#### Resultados del ensayo

**Tabla 3.36.** Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
47 °C	43 °C	53 °C

Fuente: Elaboración propia

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

#### Objetivo

Este método de ensayo describe los procedimientos que deben seguirse paso a paso para la determinación de la gravedad específica o densidad relativa de los materiales bituminosos (cemento asfáltico 85-100), que es 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 a continuación con la siguiente fórmula que describe cada una de las variables que son necesarias:

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

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, en gr.

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

**Figura 3.50.** Picnómetros utilizados para determinar el peso específico



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.51.** Determinación del peso del picnómetro + C.A. + agua



Fuente: Elaboración propia

### Resultados del ensayo

**Tabla 3.37.** Resultados del ensayo de gravedad específica

Promedio	Especificaciones	
	Min	Max
1.006	1	1.05

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.38.** Resumen de los ensayos del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promed.	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	33.8	34.1	32.9			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	81.25	81.3	78.5			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	63.55	62.6	61.1			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	81.55	81.6	78.7			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>1.007</b>	<b>1.008</b>	<b>1.004</b>	<b>1.006</b>	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>280	>290	>295	<b>&gt;288</b>	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	115	105	107	<b>109</b>	>100	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	100	99	91			
	Lectura N°2	92	93	85			
	Lectura N°3	87	90	87			
	Promedio	mm.	93	94	88	92	85
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	-	-	-	-	250	-
Ensayo de la mancha					No se realizo	negativo	
Solvente gasolina standart					No se realizo	negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol					No se realizo	negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol					No se realizo	negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.					No se realizo		
* Pérdida en masa	%				-	-	1
* Penetración del residuo, penetración original	%				No se realizo	47	
Índice de susceptibilidad térmica					No se realizo	-1	1
Punto de ablandamiento	°C	48.0	47.0	45.0	47	42	53

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.

### **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.

**Mordaza.-** Consiste de dos semicilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado que sirve 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 de acero 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 el cual debe estar debidamente 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  $10^{\circ}\text{C}$  a  $232^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$  a  $450^{\circ}\text{F}$ ) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de  $3^{\circ}\text{C}$ . Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  y sensibilidad de  $0.2^{\circ}\text{C}$  ( $68^{\circ}\text{F}$  a  $158^{\circ}\text{F} + 0.4^{\circ}\text{F}$ ).

**Balanza.-** Para pesar agregado y asfalto de 5 kg. de capacidad y con una sensibilidad de 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg. de capacidad y sensibilidad de la misma.

#### **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 según el contenido mínimo del cemento asfáltico a utilizar.

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 briqueta reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas a temperatura ambiente.

### **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 3.39.** 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"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; fina)				Porcentaje en peso				
2 ½" (63mm)	100	-		-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100		-	-	-	-	-
1 ½" (37,5mm)	-	90-100		-	-	-	-	-
1" (25,0mm)	60-80	-		-	-	-	-	-
¾" (19,0mm)	-	56-80		100	-	-	-	-
½" (12,5mm)	35-65	-		90-100	100	-	-	-
3/8" (9,5mm)	-	-		-	90-100	100	-	-
Nº4 (4,75mm)	17-47	23-53		44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2,36mm)	10-36	15-41		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		5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-		-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75 µm)	0-5	0-6		2-10	2-10	2-10	-	9-20

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

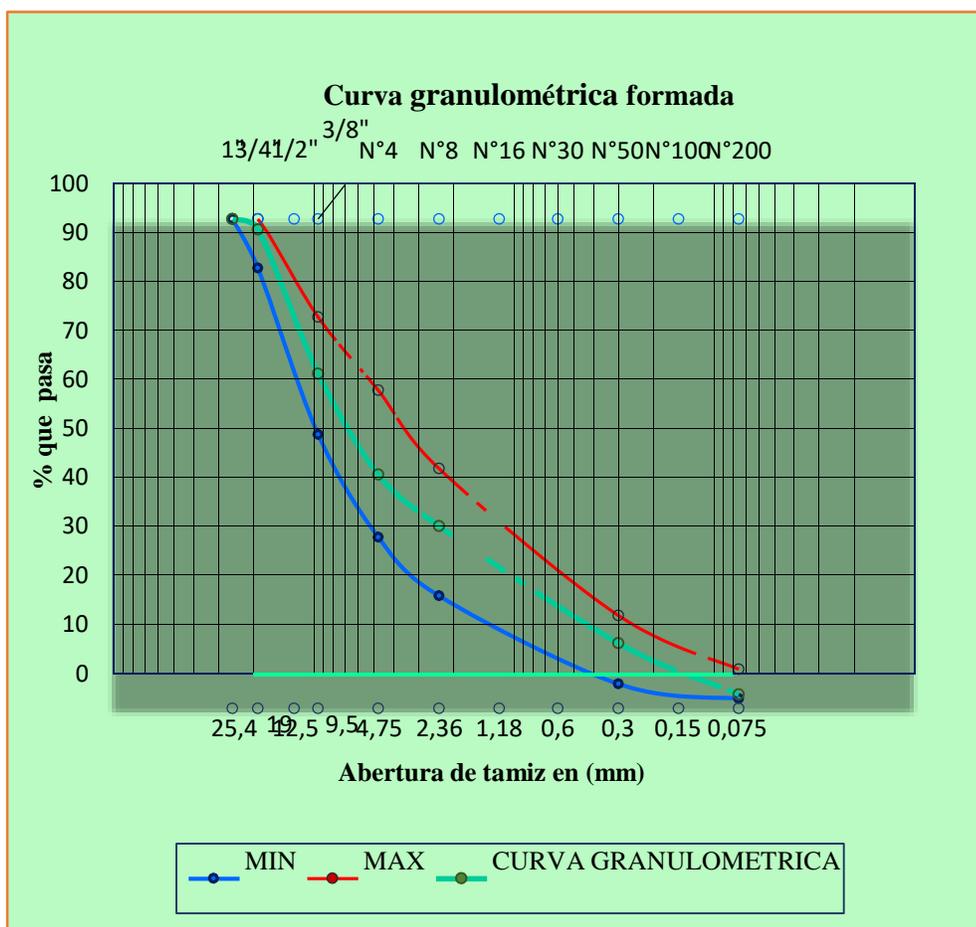
En base a los parámetros de granulometría exigidos en la tabla 3.39., con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de agregados (grava, gravilla, arena) para cumplir con los requisitos planteadas, ya que casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con estos requisitos granulométricos.

**Tabla 3.40.** Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas

Tamices	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Especificaciones	
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0.25	al 0.3	al 0.45	Peso Ret. 1				Mínimo	Máximo
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1"	25.4	120.00	0.00	0.00	30.00	0.00	0.00	30.00	30.00	0.60	99.40	90	100
3/4"	19.0	2625.40	0.00	0.00	656.35	0.00	0.00	656.35	686.35	13.73	86.27	-	-
1/2"	12.5	1682.70	6.30	0.00	420.68	1.89	0.00	422.57	1108.92	22.18	77.82	56	80
3/8"	9.50	376.20	380.00	0.00	94.05	114.00	0.00	208.05	1316.97	26.34	73.66	-	-
Nº4	4.75	187.30	3971.20	344.25	46.83	1191.36	154.91	1393.10	2710.06	54.21	45.79	29	59
Nº8	2.36	0.10	571.10	987.75	0.03	171.33	444.49	615.84	3325.91	66.52	33.48	19	45
Nº16	1.18	0.20	4.20	804.25	0.05	1.26	361.91	363.22	3689.13	73.79	26.21	-	-
Nº30	0.60	0.10	2.40	701.5	0.03	0.72	315.68	316.42	4005.55	80.12	19.88	-	-
Nº50	0.30	0.12	1.20	1014.25	0.03	0.36	456.41	456.80	4462.35	89.25	10.75	5	17
Nº100	0.15	0.10	0.50	857.75	0.03	0.15	385.99	386.16	4848.51	96.98	3.02	-	-
Nº200	0.075	0.20	0.12	223	0.05	0.04	100.35	100.44	4948.95	98.99	1.01	1	7
BASE	-	7.50	62.80	66.5	1.88	18.84	29.93	50.64	4999.59	100.00	0.00	-	-
	<b>SUMA</b>	4999.9	4999.8	4999.3	1249.98	1499.946	2249.66	4999.6					
	<b>PÉRDIDAS</b>	0.1	0.2	0.8									

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.52.** 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 con 75 golpes por lado con el martillo de compactación 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.

### 3.5.2 Contenido mínimo de cemento asfáltico

El cemento asfáltico interviene en las mezclas asfálticas en proporciones diferentes según el tipo de formulación, generalmente este valor oscila entre el 3% y el 10 % sobre la masa de los agregados pétreos. Generalmente los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su antigua clasificación de acuerdo al ensayo de penetración, como aquéllos de penetración intermedia (50/60 y 85/100) y actualmente también tienen un uso generalizado los asfaltos modificados. Según ensayos realizados anteriormente para un asfalto 85-100 el contenido óptimo oscila entre 5 y 7%, pariremos del 5% con intervalos de 0.5% mayores a 5 y menores a 5.

**Tabla 3.41.** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para la preparación de la mezcla

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.00%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de Agregado (%)	96.0%	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%
Peso del Cemento Asfáltico (gr.)	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de Grava (gr.)	288.00	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50
Peso de Gravilla (gr.)	345.60	343.80	342.00	340.20	338.40	336.60
Peso de Arena (gr.)	518.40	515.70	513.00	510.30	507.60	504.90
Peso total de la briqueta (gr.)	1200.00	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 briqueta para un porcentaje determinado. Seguidamente se realiza el mezclado hasta obtener una mezcla homogénea, a una temperatura no inferior de 140°C.

**Figura 3.53.** Colocación de cantidades de agregados y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.54.** Mezcla preparada



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.2.1 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 3.55.** Martillo para compactación



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.56.** 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 3.57.** Extracción de las briquetas de los moldes



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3 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 3.58.** Determinación de las dimensiones de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

#### 3.5.3.1 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 ( $W_{ss}$ ), y se determina la masa para esta condición.

**Figura 3.59.** Determinación del peso de la briqueta en estado seco



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.60.** Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.61.** Determinación del peso saturado superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.2 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 3.62.** Briquetas sumergidas en baño maría a  $60\text{ °C}$



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.63.** Determinación de la estabilidad y fluencia de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo Marshall

**Tabla 3.42.** Pesos específicos de los materiales

<b>Pesos específicos</b>			
	Material	P.E. (gr/cm <sup>3</sup> )	%
<b>Agregados</b>	Grava	2.67	25
	Gravilla	2.74	30
	Arena	2.79	45
	Filler	0	0
<b>C.A. Stratura Betupen (85-100)</b>	Numero de golpes 75		
	P.E. Cemento asfáltico (gr/cm <sup>3</sup> )		1,006
<b>Peso específico total</b>			
		P.E. (gr/cm <sup>3</sup> )	% de agregado
	Mat retenido tamiz N° 4	2.705	54.21
	Mat. pasa tamiz N° 4	2.79	45.79
	<b>Peso específico total</b>	<b>2.75</b>	<b>100</b>

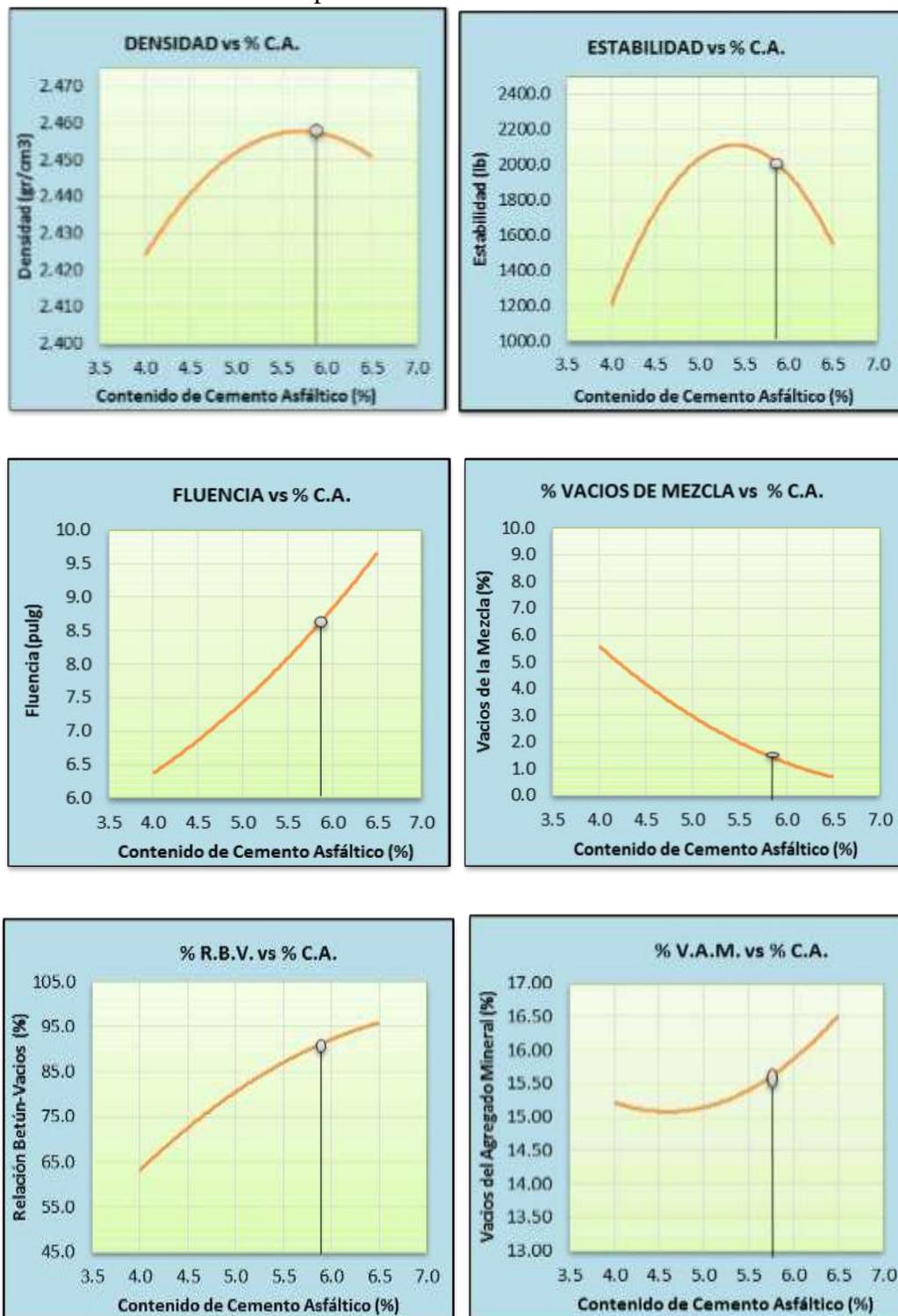
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.43.** Resultados obtenidos del ensayo por el método Marshall

METODO MARSHALL																						
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia				
		Base Mezcla	Base Agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia real	Fluencia promedio	
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg	
1	7.19			1305.3	1308.1	762	546.1	2.39					568	1511.3	0.825	1246.81		150	0.059			
2	7.11	4.00	4.17	1281.1	1283.6	765	518.6	2.47	2.43	2.67	9.18	18.81	51.18	582	1549	0.838	1297.43	1245	170	0.067	6.430	
3	7.15			1290.7	1294.2	760	534.2	2.42						540	1435.9	0.830	1191.79		170	0.067		
4	7.08			1297.2	1300.5	772	528.5	2.45						785	2095.6	0.843	1766.82		165	0.0650		
5	7.12	4.50	4.71	1301.5	1305.4	785	520.4	2.50	2.44	2.65	7.94	18.82	57.81	703	1874.8	0.836	1566.78	1667	170	0.0669	6.76	
6	7.18			1299.8	1333.3	782	551.3	2.36						756	2017.5	0.826	1667.09		180	0.0709		
7	7.02			1302.4	1304.2	780	524.2	2.48						876	2340.7	0.854	1999.87		195	0.0768		
8	6.89	5.00	5.26	1315.7	1319.7	773	546.7	2.41	2.45	2.63	6.59	18.76	64.85	904	2416.1	0.879	2123.24	2022	180	0.0709	7.41	
9	6.93			1317.0	1319.0	785	534.0	2.47						835	2230.3	0.871	1943.23		190	0.0748		
10	7.00			1310.7	1315.1	783	532.1	2.46						965	2580.3	0.858	2214.18		210	0.0827		
11	7.04	5.50	5.82	1300.5	1305.0	777	528.0	2.46	2.46	2.60	5.54	18.96	70.77	937	2504.9	0.851	2130.95	2156	205	0.0807	8.20	
12	7.01			1298.2	1304.5	775	529.5	2.45						928	2480.7	0.856	2124.22		210	0.0827		
13	6.99			1333.7	1334.4	782	552.4	2.41						856	2286.8	0.860	1966.66		230	0.0906		
14	6.83	6.00	6.38	1296.0	1304.3	774	530.3	2.44	2.46	2.58	4.88	19.50	74.98	889	2375.7	0.890	2114.35	1964	225	0.0886	8.79	
15	7.12			1279.0	1282.6	773	509.6	2.51						812	2168.3	0.836	1812.08		215	0.0846		
16	7.17			1318.5	1325.8	789	536.8	2.46						735	1961	0.828	1622.72		250	0.0984		
17	7.05	6.50	6.95	1324.1	1331.8	792	539.8	2.45	2.45	2.56	4.30	20.10	78.62	688	1834.4	0.849	1557.06	1524	235	0.0925	9.65	
18	7.09			1316.0	1323.7	785	538.7	2.44						621	1654	0.841	1391.52		250	0.0984		
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	75					750				8
				máximo							5	-	82					-				16

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.64.** Gráficas del método Marshall para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.3 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 3.44.** Resumen de resultados para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico (%)	Densidad promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (libras)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4.0	2.43	1245.30	6.43	9.18	51.18	18.81
4.5	2.44	1666.90	6.76	7.94	57.81	18.82
5.0	2.45	2022.10	7.41	6.59	64.85	18.76
5.5	2.46	2156.40	8.20	5.54	70.77	18.96
6.0	2.46	1964.40	8.79	4.88	74.98	19.50
6.5	2.45	1523.80	9.65	4.30	78.62	20.10
<b>Obtenido del gráfico</b>	<b>2.45</b>	<b>2199.7</b>	<b>8.14</b>	<b>4.91</b>	<b>70.55</b>	<b>19.15</b>
<b>Porcentaje de cemento asfáltico para cada valor (%)</b>	<b>6.10</b>	<b>5.47</b>	<b>5.11</b>	<b>6.80</b>	<b>5.99</b>	<b>5.70</b>
<b>Promedio final (%)</b>	<b>5.88</b>					

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 5.88 %.

### **3.6 Caracterización del polvo de silicio y grafito**

#### **3.6.1 Caracterización del polvo de silicio**

##### **3.6.1.1 Peso específico del polvo de silicio ASTM D854 AASHTO T100**

El peso específico es el peso de una sustancia por unidad de volumen y se la obtiene a partir de la división de una masa conocida del material en cuestión por su volumen, cuando el suelo o material se compone de partículas mayores a 5mm se debe aplicar el método de determinación de densidad neta de los gruesos, según método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

#### **Objetivo**

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro (matraz), la densidad de partículas solidad de suelos compuestos por partículas menores que 5mm.

#### **Procedimiento**

Primeramente se debe proceder a calibrar el matraz, se debe obtener el peso del matraz seco y limpio, luego se debe llenar con agua a temperatura ambiente hasta la marca de calibración, posteriormente se debe insertar un termómetro hasta el centro del matraz para determinar la temperatura de calibración.

Se debe preparar una tabla de valores de la masa del matraz más el agua para una serie de temperaturas que probablemente prevalezcan durante el ensayo, esto se lo debe hacer con la ayuda de una hornilla eléctrica y cubos de hielo.

Con los datos de masa del matraz más el agua a diferentes temperaturas se elaborara una gráfica de calibración de la cual obtendremos una ecuación que nos permita obtener la masa del matraz más el agua a cualquier temperatura.

Una vez calibrado el frasco se procede a trabajar con el suelo o material en estudio, en nuestro caso el polvo de silicio, pesamos 80 gramos de silicio seco para introducirlo dentro del matraz evitando las pérdidas y se le agrega agua cuidadosamente hasta  $\frac{3}{4}$  de su capacidad, para luego sacar todas las burbujas de aire.

Colocar el matraz en un baño María para reducir la temperatura inicial del ensayo, una vez alcanzado la temperatura de ensayo se procede a trabajar con distintas temperaturas con la ayuda de una hornilla obteniendo para cada intervalo de temperatura la más del matraz más agua más el polvo de silicio siempre teniendo en cuenta el nivel de enrase del matraz ya que el agua a menor temperatura reduce volumen y a mayor temperatura el volumen aumenta.

**Figura 3.65.** Calibración del matraz en baño María



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.66.** Incremento de temperatura del matraz en la hornilla eléctrica



Fuente: Elaboración propia

Peso del frasco seco y limpio = 173.36 gr

Wfw = Peso del frasco + agua en ( gr )

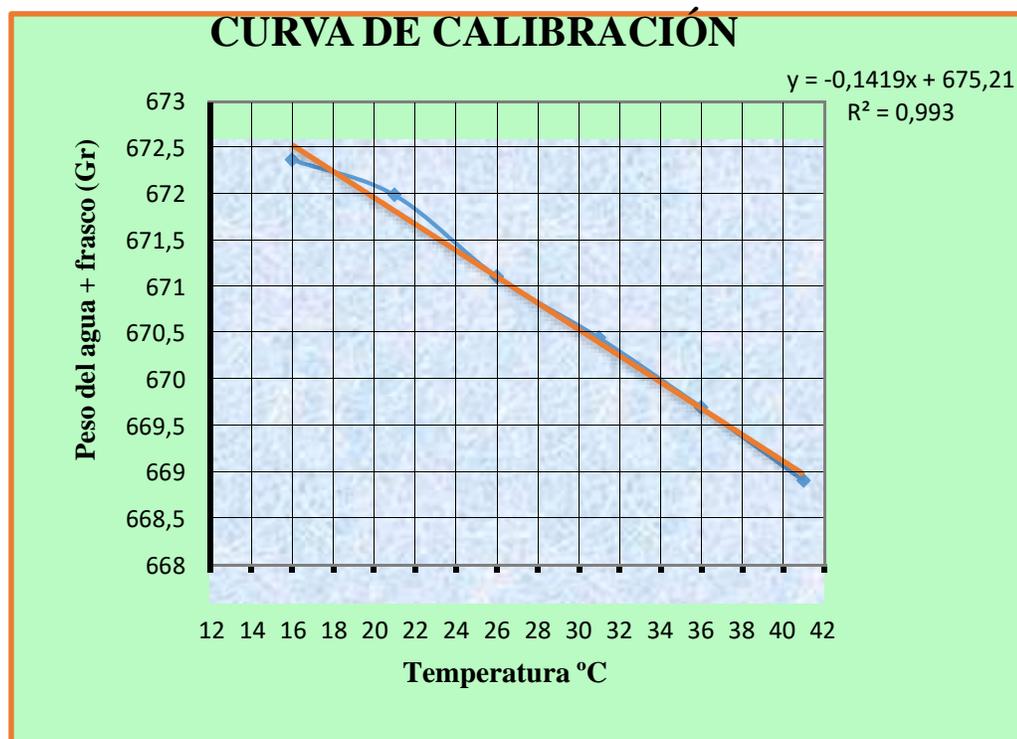
T = Temperatura en ° C

**Tabla 3.45.** Peso y temperatura de calibración del matraz

Número de Ensayo	Wfw ( Gr )	T ( ° C )
1	672.78	16
2	672.4	21
3	671.52	26
4	670.86	31
5	670.11	36
6	669.32	41

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.67.** Gráfica de la curva de calibración del matraz



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.68.** Polvo de silicio para el peso específico

Fuente: Elaboración propia

**Resultados de ensayo****Tabla 3.46.** Determinación del peso específico del polvo de silicio

Numero de ensayo	1	2	3	4	5	6	Promedio
Temperatura ensayada °C	17.00	22.00	25.00	31.00	35.00	42.00	
Peso del suelo seco $W_s$	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	
Peso del frasco + agua $W_{fw}$	672.80	672.09	671.66	670.81	670.24	669.25	
Peso del frasco + agua + suelo $W_{fws}$	718.52	717.20	716.84	716.19	715.94	714.9	
Peso específico	2.334	2.293	2.297	2.311	2.332	2.329	
Factor de corrección $K=$	1.0009	1.0001	0.9990	0.9970	0.9960	0.9940	
Peso específico corregido (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.33</b>	<b>2.29</b>	<b>2.30</b>	<b>2.31</b>	<b>2.34</b>	<b>2.34</b>	<b>2.32</b>

Fuente: Elaboración propia

### **3.6.1.2 Ensayo del hidrómetro para la granulometría del polvo de silicio ASTM D422**

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelo u otro material suelto dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2.00 mm (N 10). Cuando se requieren más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75  $\mu$ m (N 200).

#### **Objetivo**

Determinar el tamaño de partículas basándose en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera.

#### **Procedimiento**

Se pesa 80 gramos de silicio seco, se lo vierte a un plato pequeño donde se procede a mezclar con un agente dispersante que es el silicato de sodio, se mezcla bien con la ayuda de una espátula y se lo deja reposar por una noche, posteriormente se debe vaciar la muestra a una probeta de 1000 ml. y se la debe llenar con agua hasta llegar a los 1000 ml, se procede a batir la probeta con el material para la dispersión de las partículas, se debe colocar la probeta en una superficie plana y se procede a medir la temperatura del agua y luego se procede a realizar el ensayo con el hidrómetro leyendo la profundidad y el tiempo transcurrido para cada lectura y la temperatura de cada lectura, este procedimiento se lo debe realizar hasta que el hidrómetro marque cero y se asienten todas las partículas.

Para empeorar el ensayo se debe empezar cada 2 minutos, posteriormente cada 5 minutos y luego cada 20 a 30 minutos y si es necesario cada 24 hrs.

Se debe realizar una corrección por temperatura y por menisco de la lectura del hidrómetro a la hora de realizar los cálculos, esto se lo hace a través de tablas para cada corrección.

**Figura 3.69.** Preparación del silicio con defloculante



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.70.** Lectura del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.47.** Valores de profundidad efectiva basados en hidrómetros y cilindros de sedimentación dados

Hidrómetro 151 H		Hidrómetro 152 H			
Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)
1.000	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.1	32	11.1
1.002	15.8	2	16.0	33	10.9
1.003	15.5	3	15.8	34	10.7
1.004	15.2	4	15.6	35	10.6
1.005	15.0	5	15.5	36	10.4
1.006	14.7	6	15.3	37	10.2
1.007	14.4	7	15.2	38	10.1
1.008	14.2	8	15.0	39	9.9
1.009	13.9	9	14.8	40	9.7
1.010	13.7	10	14.7	41	9.6
1.011	13.4	11	14.5	42	9.4
1.012	13.1	12	14.3	43	9.2
1.013	12.9	13	14.2	44	9.1
1.014	12.6	14	14.0	45	8.9
1.015	12.3	15	13.8	46	8.8
1.016	12.1	16	13.7	47	8.6
1.017	11.8	17	13.5	48	8.4
1.018	11.5	18	13.3	49	8.3
1.019	11.3	19	13.2	50	8.1
1.020	11.0	20	13.0	51	7.9
1.021	10.7	21	12.9	52	7.8
1.022	10.5	22	12.7	53	7.6
1.023	10.2	23	12.5	54	7.4
1.024	10.0	24	12.4	55	7.3
1.025	9.7	25	12.2	56	7.1
1.026	9.4	26	12.0	57	7.0
1.027	9.2	27	11.9	58	6.8
1.028	8.9	28	11.7	59	6.6
1.029	8.6	29	11.5	60	6.5
1.030	8.4	30	11.4		
1.031	8.1				
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				
1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales de la Administradora Boliviana de carreteras

### Resultados del ensayo

Modelo Hidróm.: **152 H**

Peso específico: **2.32** gr/cm<sup>3</sup>

Peso suelo seco: **80 gr**

Factor (a) = **1.102**

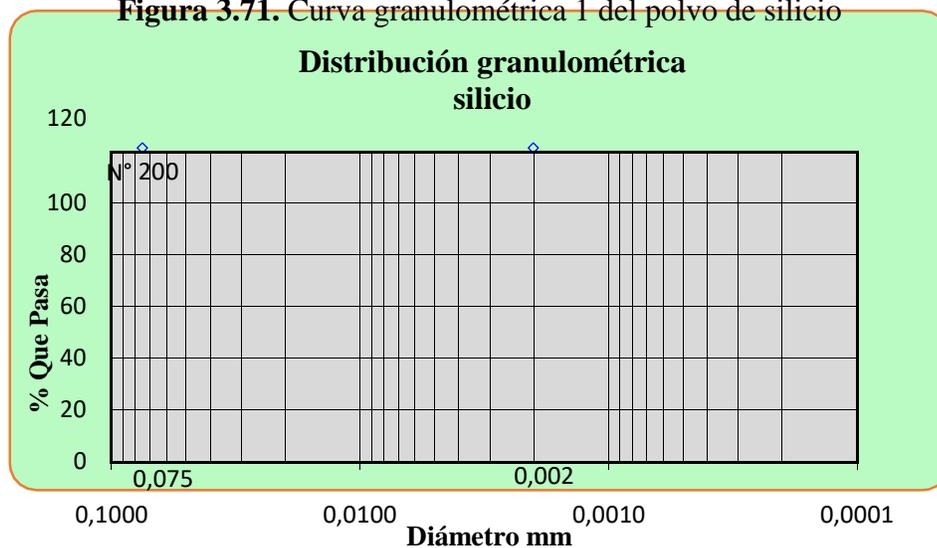
Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.48.** Hidrómetro 1 del polvo de silicio

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
17:02	0	22	55	56	7.10	0.015	0	0.40	56.40	0.075	77.69
17:04	2	22	52	53	7.60	0.015	3.800	0.40	53.40	0.0292	73.56
17:06	4	22	49	50	8.10	0.015	2.025	0.40	50.40	0.0213	69.43
17:08	6	22	46	47	8.60	0.015	1.433	0.40	47.40	0.0180	65.29
17:10	8	22	44	45	8.90	0.015	1.113	0.40	45.40	0.0158	62.54
17:12	10	22	42	43	9.20	0.015	0.920	0.40	43.40	0.0144	59.78
17:14	12	22	41	42	9.40	0.015	0.783	0.40	42.40	0.0133	58.41
17:16	14	22	40	41	9.60	0.015	0.686	0.40	41.40	0.0124	57.03
17:21	19	22	37	38	10.10	0.015	0.532	0.40	38.40	0.0109	52.90
17:26	24	22	35	36	10.40	0.015	0.433	0.40	36.40	0.0099	50.14
17:31	29	22	34	35	10.60	0.015	0.366	0.40	35.40	0.0091	48.76
17:36	34	22	33	34	10.70	0.015	0.315	0.40	34.40	0.0084	47.39
17:41	39	22	31	32	11.10	0.015	0.285	0.40	32.40	0.0080	44.63
17:51	49	22	30	31	11.20	0.015	0.229	0.40	31.40	0.0072	43.25
18:01	59	22	29	30	11.40	0.015	0.193	0.40	30.40	0.0066	41.88
18:21	79	22	25	26	12.00	0.015	0.152	0.40	26.40	0.0058	36.37
18:41	99	22	24.5	25.5	12.10	0.015	0.122	0.40	25.90	0.0052	35.68
08:44	936	20	13	14	14.00	0.016	0.015	0.00	14.00	0.0020	19.29
16:00	1372	25	9	10	14.70	0.015	0.011	1.30	11.30	0.0016	15.57
08:27	2359	21	7	8	15.00	0.016	0.006	0.20	8.20	0.0013	11.30
08:11	8103	22	4	5	15.50	0.015	0.002	0.40	5.40	0.0007	7.44
18:46	10199	24	2	3	15.80	0.015	0.002	1.00	4.00	0.0006	5.51
15:30	11443	28	0.5	1.5	16.05	0.014	0.001	2.50	4.00	0.0005	5.51

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.71.** Curva granulométrica 1 del polvo de silicio



Fuente: Elaboración propia

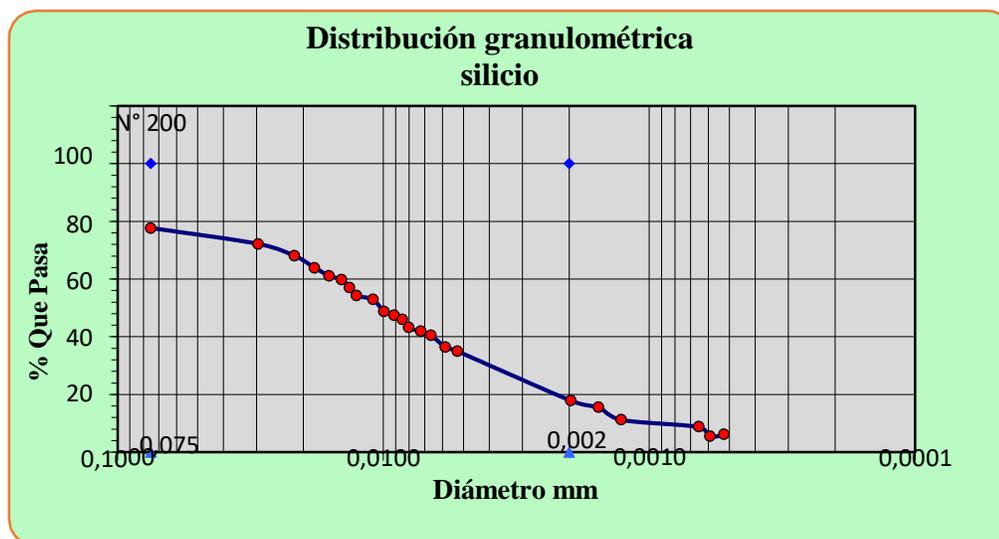
Modelo Hidróm.: **152 H**Peso específico: **2.32** gr/cm<sup>3</sup>Peso suelo seco: **80 gr**Factor (a) = **1.102**

Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.49.** Hidrómetro 2 del polvo de silicio

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
17:05	0	22	55	56	7.1	0.015	0	0.400	56.40	0.0750	77.69
17:07	2	22	51	52	7.8	0.015	3.900	0.40	52.40	0.0296	72.18
17:09	4	22	48	49	8.3	0.015	2.075	0.40	49.40	0.0216	68.05
17:11	6	22	45	46	8.8	0.015	1.467	0.40	46.40	0.0182	63.92
17:13	8	22	43	44	9.1	0.015	1.138	0.40	44.40	0.0160	61.16
17:15	10	22	42	43	9.2	0.015	0.920	0.40	43.40	0.0144	59.78
17:17	12	22	40	41	9.6	0.015	0.800	0.40	41.40	0.0134	57.03
17:19	14	22	38	39	9.9	0.015	0.707	0.40	39.40	0.0126	54.27
17:24	19	22	37	38	10.1	0.015	0.532	0.40	38.40	0.0109	52.90
17:29	24	22	34	35	10.6	0.015	0.442	0.40	35.40	0.0100	48.76
17:34	29	22	33	34	10.7	0.015	0.369	0.40	34.40	0.0091	47.39
17:39	34	22	32	33	10.9	0.015	0.321	0.40	33.40	0.0085	46.01
17:44	39	22	30	31	11.2	0.015	0.287	0.40	31.40	0.0080	43.25
17:54	49	22	29	30	11.4	0.015	0.233	0.40	30.40	0.0072	41.88
18:04	59	22	28	29	11.5	0.015	0.195	0.40	29.40	0.0066	40.50
18:24	79	22	25	26	12	0.015	0.152	0.40	26.40	0.0058	36.37
18:44	99	22	24	25	12.2	0.015	0.123	0.40	25.40	0.0053	34.99
08:45	936	20	12	13	14.2	0.016	0.015	0.00	13.00	0.0020	17.91
16:01	1372	25	9	10	14.7	0.015	0.011	1.30	11.30	0.0016	15.57
08:28	2359	21	7	8	15	0.016	0.006	0.20	8.20	0.0013	11.30
08:12	8103	22	5	6	15.3	0.015	0.002	0.40	6.40	0.0007	8.82
18:47	10199	24	2	3	15.8	0.015	0.002	1.00	4.00	0.0006	5.51
15:31	11443	28	1	2	16	0.014	0.001	2.50	4.50	0.0005	6.20

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.72.** Curva granulométrica 2 del polvo de silicio

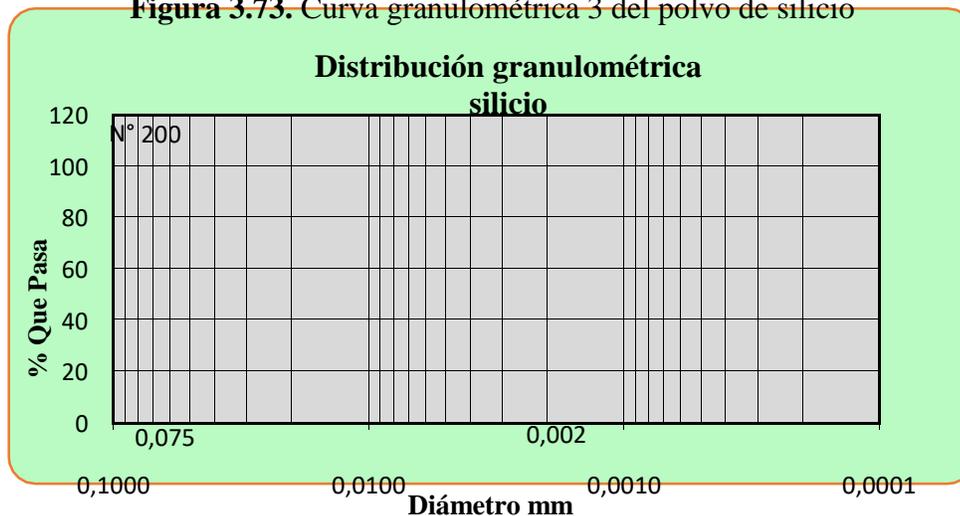
Modelo Hidró.: **152 H**Peso específico: **2.32** gr/cm<sup>3</sup>Peso suelo seco: **80 gr**Factor (a) = **1.102**

Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.50.** Hidrómetro 3 del polvo de silicio

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
17:18	0	22	57	58	6.80	0.015	0	0.40	58.40	0.075	80.45
17:20	2	22	52	53	7.60	0.015	3.800	0.40	53.40	0.0292	73.56
17:22	4	22	50	51	7.90	0.015	1.975	0.40	51.40	0.0211	70.80
17:24	6	22	46	47	8.60	0.015	1.433	0.40	47.40	0.0180	65.29
17:26	8	22	44	45	8.90	0.015	1.113	0.40	45.40	0.0158	62.54
17:28	10	22	42	43	9.20	0.015	0.920	0.40	43.40	0.0144	59.78
17:30	12	22	40	41	9.60	0.015	0.800	0.40	41.40	0.0134	57.03
17:32	14	22	38	39	9.90	0.015	0.707	0.40	39.40	0.0126	54.27
17:37	19	22	36	37	10.20	0.015	0.537	0.40	37.40	0.0110	51.52
17:42	24	22	34	35	10.60	0.015	0.442	0.40	35.40	0.0100	48.76
17:47	29	22	32	33	10.90	0.015	0.376	0.40	33.40	0.0092	46.01
17:52	34	22	31	32	11.10	0.015	0.326	0.40	32.40	0.0086	44.63
17:57	39	22	30	31	11.20	0.015	0.287	0.40	31.40	0.0080	43.25
18:07	49	22	28	29	11.50	0.015	0.235	0.40	29.40	0.0073	40.50
18:27	59	22	25	26	12.00	0.015	0.203	0.40	26.40	0.0068	36.37
18:47	79	22	24	25	12.20	0.015	0.154	0.40	25.40	0.0059	34.99
08:46	859	22	12	13	14.20	0.015	0.017	0.40	13.40	0.0019	18.46
16:02	1355	20	8	9	14.80	0.016	0.011	0.00	9.00	0.0017	12.40
08:29	2344	25	7	8	15.00	0.015	0.006	1.30	9.30	0.0012	12.81
08:13	6679	21	4	5	15.50	0.016	0.002	0.20	5.20	0.0008	7.16
18:48	8099	22	2	3	15.80	0.015	0.002	0.40	3.40	0.0007	4.68
15:32	10179	24	1	2	16.00	0.015	0.002	1.00	3.00	0.0006	4.13

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.73.** Curva granulométrica 3 del polvo de silicio

### 3.6.2 Caracterización del grafito

#### 3.6.2.1 Peso específico del grafito ASTM D854 AASHTO T100

El procedimiento es el descrito anteriormente para la caracterización del polvo de silicio.

**Figura 3.74.** Matraz más muestra sometido a baño María



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.75.** Determinación de temperatura y peso del matraz más muestra



Fuente: Elaboración propia

## Resultados del ensayo

**Tabla 3.51.** Determinación del peso específico del grafito

Numero de ensayo	1	2	3	4	5	6	Promedio
Temperatura ensayada °C	17.00	22.00	26.00	31.00	37.00	42.00	
Peso del suelo seco $W_s$	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	
Peso del frasco + agua $W_{fw}$	672.80	672.09	671.52	670.81	669.96	669.25	
Peso del frasco + agua + suelo $W_{fws}$	716.57	716.13	715.49	715.07	714.56	713.93	
Peso específico	2.208	2.225	2.220	2.238	2.260	2.265	
Factor de corrección $K=$	1.0009	1.0001	0.9986	0.9970	0.9960	0.9940	
Peso específico corregido (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.21</b>	<b>2.22</b>	<b>2.22</b>	<b>2.24</b>	<b>2.26</b>	<b>2.27</b>	<b>2.24</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.2.2 Ensayo de Hidrómetro para granulometría del Grafito ASTM D422

**Figura 3.76.** Preparación y reposo del grafito con defloculante



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.77.** Lectura del hidrómetro en la probeta

Fuente: Elaboración propia

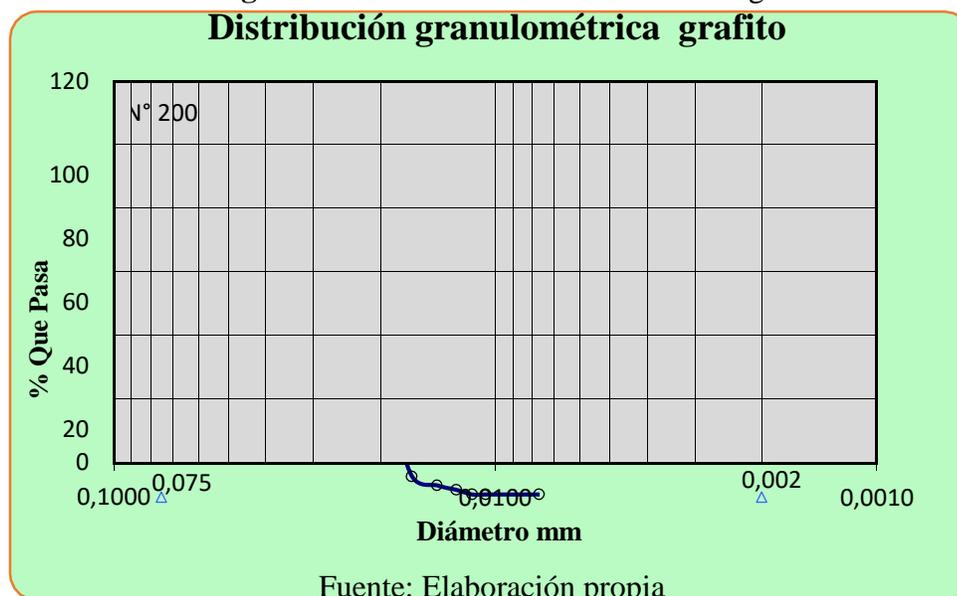
**Resultados del ensayo**

Modelo Hidróm.: **152 H**                      Peso específico: **2.24** gr/cm<sup>3</sup>  
 Peso suelo seco: **80 gr**                      Factor (a) = **1.134**  
 Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.52.** Hidrómetro 1 del grafito

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
10:43	0	26	60	61	6.40	0.015	0	1.65	62.65	0.075	88.81
10:45	2	26	53	54	7.40	0.015	3.700	1.65	55.65	0.029	78.88
10:47	4	26	40	41	9.60	0.015	2.400	1.65	42.65	0.023	60.46
10:49	6	26	28	29	11.50	0.015	1.917	1.65	30.65	0.021	43.45
10:51	8	26	19	20	13.00	0.015	1.625	1.65	21.65	0.019	30.69
10:56	13	26	2	3	15.80	0.015	1.215	1.65	4.65	0.017	6.59
11:01	18	26	0	1	16.10	0.015	0.894	1.65	2.65	0.014	3.76
11:06	23	26	-1	0	16.30	0.015	0.709	1.65	1.65	0.013	2.34
11:11	28	26	-2	-1	16.40	0.015	0.586	1.65	0.65	0.011	0.92
11:16	33	26	-2	-1	16.40	0.015	0.497	1.65	0.65	0.011	0.92
11:46	63	26	-2	-1	16.40	0.015	0.260	1.65	0.65	0.008	0.92

Fuente: Elaboración propia

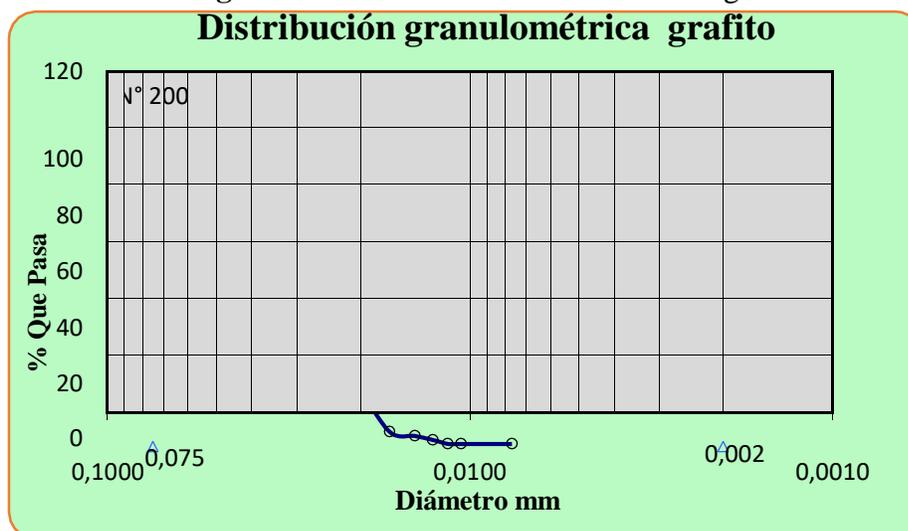
**Figura 3.78.** Curva Granulométrica 1 del grafitoModelo Hidróm.: **152 H**Peso específico: **2.24** gr/cm<sup>3</sup>Peso suelo seco: **80 gr**Factor (a) = **1.134**

Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.53.** Hidrómetro 2 del grafito

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
10:44	0	26	52	53	7.80	0.0150	0.00	1.65	54.65	0.075	77.47
10:46	2	26	49	50	8.30	0.0150	4.15	1.65	51.65	0.031	73.21
10:48	4	26	35	36	10.40	0.0150	2.60	1.65	37.65	0.024	53.37
10:50	6	26	21	22	12.70	0.0150	2.12	1.65	23.65	0.022	33.52
10:52	8	26	12	13	14.20	0.0150	1.78	1.65	14.65	0.020	20.77
10:57	13	26	1	2	16.00	0.0150	1.23	1.65	3.65	0.017	5.17
11:02	18	26	0	1	16.10	0.0150	0.89	1.65	2.65	0.014	3.76
11:07	23	26	-1	0	16.30	0.0150	0.71	1.65	1.65	0.013	2.34
11:12	28	26	-2	-1	16.40	0.0150	0.59	1.65	0.65	0.011	0.92
11:17	33	26	-2	-1	16.40	0.0150	0.50	1.65	0.65	0.011	0.92
11:47	63	26	-2	-1	16.40	0.0150	0.26	1.65	0.65	0.008	0.92

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.79.** Curva Granulométrica 2 del grafito

Modelo Hidróm.: **152 H**                      Peso específico: **2.24** gr/cm<sup>3</sup>

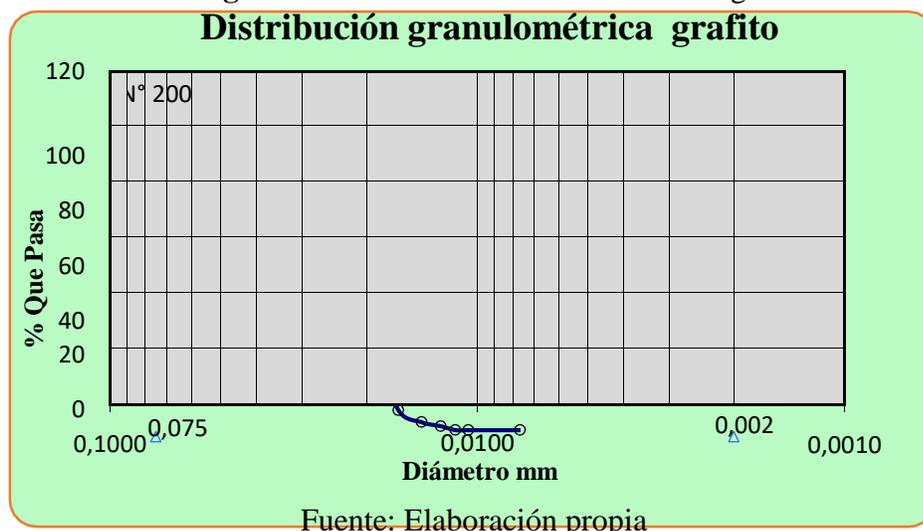
Peso suelo seco: **80 gr.**                      Factor (a) = **1.134**

Agente Dispersante = Silicato de Sodio

**Tabla 3.54.** Hidrómetro 3 del grafito

Hora de lectura	Tiempo transc. min.	Temp. °C.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K Tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% Mas fino
10:45	0	26	60	61	6.40	0.015	0.00	1.65	62.65	0.075	88.81
10:47	2	26	51	52	7.80	0.015	3.90	1.65	53.65	0.030	76.05
10:49	4	26	40	41	9.60	0.015	2.40	1.65	42.65	0.023	60.46
10:51	6	26	28	29	11.50	0.015	1.92	1.65	30.65	0.021	43.45
10:53	8	26	20	21	12.90	0.015	1.61	1.65	22.65	0.019	32.11
10:57	13	26	4	5	15.50	0.015	1.19	1.65	6.65	0.016	9.43
11:03	18	26	1	2	16.00	0.015	0.89	1.65	3.65	0.014	5.17
11:08	23	26	0	1	16.10	0.015	0.70	1.65	2.65	0.013	3.76
11:13	28	26	-1	0	16.30	0.015	0.58	1.65	1.65	0.011	2.34
11:18	33	26	-1	0	16.30	0.015	0.49	1.65	1.65	0.011	2.34
11:48	63	26	-1	0	16.30	0.015	0.26	1.65	1.65	0.008	2.34

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.80.** Curva Granulométrica 3 del grafito

### 3.7 Descripción y características de los asfaltos líquidos o cortados a utilizar como riego de liga

En esta investigación se estudiará un tipo de asfalto líquido utilizado como riego de liga, este es el asfalto líquido o rebajado de curado rápido (RC), los cuales tienen como solvente a la gasolina.

**Tabla 3.55.** Cantidades de cemento asfáltico y solvente para fabricación del asfalto líquido

Tipo	Asfalto (%)	Solvente (%)
RC		
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 será el de curado rápido RC-70, con una tasa de aplicación adoptada de 0.5 lt/m<sup>2</sup>.

### 3.7.1 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 3.56. 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.			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.			15+	10+	-	-	-	-
A 225 °C.	T-78	D-402	55+	50+	40+	25+	8+	-
A 270 °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 CCl <sub>4</sub> %	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

### 3.7.2 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).

**Tabla 3.57.** Dosificación seleccionada para riego de liga

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

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.2.1 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 0.5 lt/m<sup>2</sup>, en litros.**

Para determinar las cantidades de asfalto y solvente para una dotación de 0.5 lt/m<sup>2</sup> será de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \text{Cemento asfáltico (63 \%)} \\ \text{Solvente (37 \%)} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Cemento asfáltico (63 \%)} \\ \text{Solvente (37 \%)} \end{array}} \right\} 100 \% = 0.5 \text{ lt/m}^2$$

**Para cemento asfáltico**

$$0.5 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} = 0.5 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} * 0.63$$

$$A. = 0.315 \text{ litros}$$

**Para solvente**

$$0.5 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} = 0.5 \frac{\text{lt}}{\text{m}^2} * 0.37$$

$$B. = 0.185 \text{ litros}$$

Entonces para una dosis de 0.5 lt/m<sup>2</sup> se tiene las siguientes cantidades:

Cemento asfáltico (63 %) = 0.315 litros

Solvente (37 %) = 0.185 litros

### Cantidades de cemento asfáltico y solvente para una dotación de riego de 0.5 lt/m<sup>2</sup>, en gramos.

El cálculo se realizará de la siguiente manera:

#### Para cemento asfáltico

Densidad del cemento asfáltico:  $1.006 \frac{g}{cm^3}$  (determinado en laboratorio)

Es decir que cada 1 centímetro cúbico de C.A. se tiene un peso equivalente a 1,006 gramos. Y como  $1cm^3 = 0,001$  litros, la relación que se tiene será la siguiente:

$$1.006g \frac{g}{cm^3} \quad 0.001 \frac{litros}{cm^3}$$

$$x \frac{g}{cm^3} \quad 0.315 \frac{litros}{cm^3}$$

$$x = \frac{1.006 g \cdot 0.315}{0.001}$$

$$Ca = 315.186 g = 315.186 g$$

#### Para el solvente

Los mismos pasos de cálculo se seguirán para determinar la cantidad de solvente analizado (gasolina).

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

Densidad de la gasolina =  $0.68 \frac{g}{cm^3}$

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

$$0.68g \frac{g}{cm^3} \quad 0.001 \frac{litros}{cm^3}$$

$$x \frac{g}{cm^3} \quad 0.185 \frac{litros}{cm^3}$$

$$x = \frac{0.68 g \cdot 0.185}{0.001}$$

$$Ga = 125.2 g = 125.2 g$$

### 3.7.2.2 Resultado de la cantidad de cemento asfáltico y solvente para la dosis de riego de liga

**Tabla 3.58.** Cantidad de asfalto y solvente para riego de liga de curado rápido (RC-70)

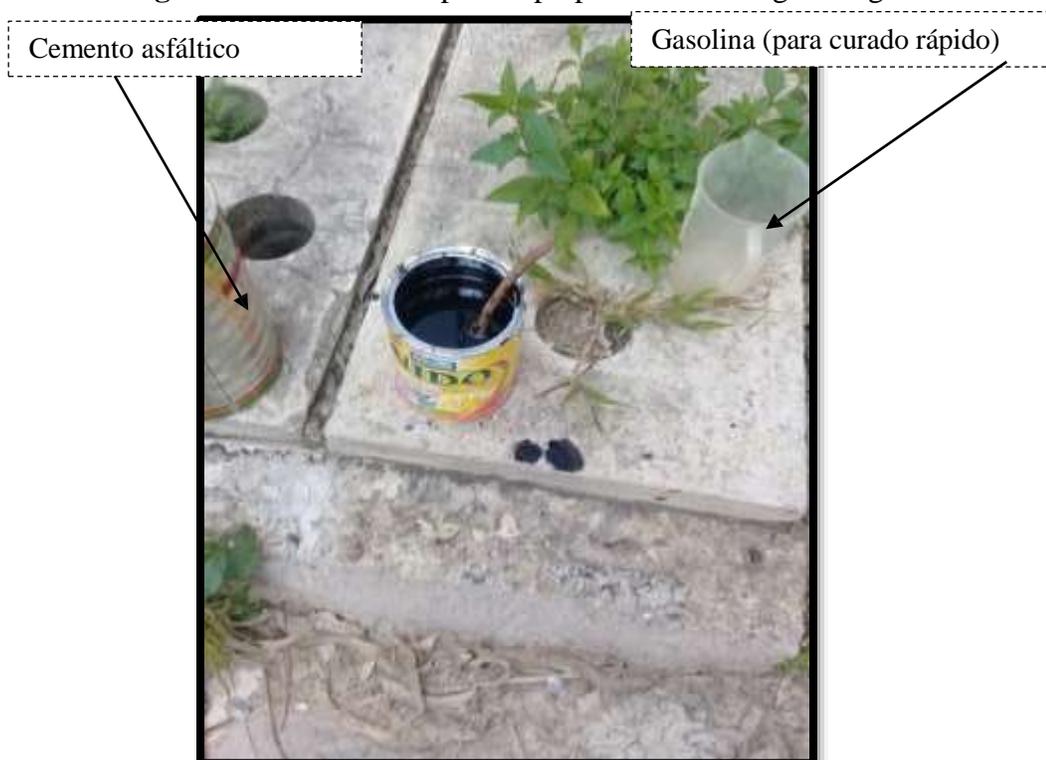
Riego de liga de curado rápido (RC-70)				
Tasa de aplicación	Cemento asfáltico (63 %)		Gasolina (37 %)	
lt/m <sup>2</sup>	lts	gr	lts	gr
0.5	0.315	318.89	0.185	125.8

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.3 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 ensayo de compresión 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 3.81.** Materiales para la preparación del riego de liga



Fuente: Elaboración propia

### 3.7.3.1 Determinación de la cantidad de ligante a aplicar

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

#### Área superficial de las probetas construidas

El diámetro de cada briqueta construida será de 9.5 cm.

$$A = \frac{\pi * 9.5^2}{4} = 70.88 \text{ cm}^2$$

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

Tasa de aplicación: 0.5 litros por cada metro cuadrado.

Cálculo de 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 4.57, se tiene las siguientes cantidades por cada metro cuadrado:

Cemento asfáltico 63 % = 318.89 gramos

Solvente (Gasolina) 37 % = 125.8 gramos

#### Cantidad de cemento asfáltico

$$x = \frac{318.89 \text{ g} * 0.00708}{1} = 2.258 \text{ g}$$

$$x = 2.258 \text{ g}$$

### Cantidad de solvente (gasolina)

$$125.8 \text{ g} \times \frac{1}{1000} = 0.1258 \text{ kg}$$

$$0.1258 \text{ kg} \times 0.00708 = 0.00089 \text{ kg}$$

$$x = \frac{125.8 \text{ g} \times 0.00708}{1000}$$

$$x = 0.00089 \text{ kg}$$

### Cantidad total en gramos de riego de liga a aplicar en cada probeta

$$\text{Total} = 2.26 \text{ gr} + 0.89 \text{ gr}$$

$$3.15 \text{ gr}$$

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

**Tabla 3.59.** Cantidad de riego de liga de curado rápido para cada probeta

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.	gr.	Lt.	gr	
0,5	0.00708	0.00394	2.26	0.00089	0.89	3.15

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.4 Calculo de cantidad de polvo de silicio como modificador de riego de liga

La cantidad de polvo de silicio estará basada en 5 porcentajes de aplicación que varía de 2% al 10% para posteriormente obtener el mejor porcentaje que nos de las mejores

condiciones de adherencia, se trabajara con 5 probetas para cada porcentaje de polvo de silicio.

**Tabla 3.60.** Cantidad de riego de liga y polvo de silicio

<b>Riego de liga de curado rápido (RC-70) modificado con polvo de silicio al 0.5 lt/m2</b>						
<b>Porcentaje de aplicación de silicio</b>	<b>Riego a aplicar a cada probeta</b>	<b>Área probeta</b>	<b>Número de probetas</b>	<b>Área total para cada porcentaje</b>	<b>Total de riego a aplicar</b>	<b>Cantidad a aplicar de silicio</b>
<b>%</b>	<b>gr</b>	<b>m2</b>	<b>N</b>	<b>m2</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>
<b>2</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	18.90	<b>0.37</b>
<b>4</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	18.10	<b>0.79</b>
<b>6</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.71	<b>1.19</b>
<b>8</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.38	<b>1.51</b>
<b>10</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.01	<b>1.89</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.5 Calculo de cantidad de Grafito como modificador de riego de liga.

Al igual que el anterior caso se realiza el cálculo con cinco porcentajes diferentes de grafito para 6 probetas.

**Tabla 3.61.** Cantidad de riego de liga y Grafito

<b>Riego de liga de curado rápido (RC-70) modificado con polvo de silicio al 0.5 lt/m2</b>						
<b>Porcentaje de aplicación de silicio</b>	<b>Riego a aplicar a cada probeta</b>	<b>Área probeta</b>	<b>Número de probetas</b>	<b>Área total para cada porcentaje</b>	<b>Total de riego a aplicar</b>	<b>Cantidad a aplicar de silicio</b>
<b>%</b>	<b>gr</b>	<b>m2</b>	<b>N</b>	<b>m2</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>
<b>2</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	18.90	<b>0.37</b>
<b>4</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	18.10	<b>0.79</b>
<b>6</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.71	<b>1.19</b>
<b>8</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.38	<b>1.51</b>
<b>10</b>	<b>3.15</b>	0.00708	6	0.042	17.01	<b>1.89</b>

Fuente: Elaboración propia

También se realizó el cálculo de cantidad de riego de liga convencional para 5 probetas para hacer una comparación con el riego de liga modificado.

### 3.8 Construcción de probetas

La construcción de las probetas de la capa base se realizara mediante la metodología de compactación T180, y para la capa de pavimento flexible se realizará usando la metodología y parámetros Marshall.

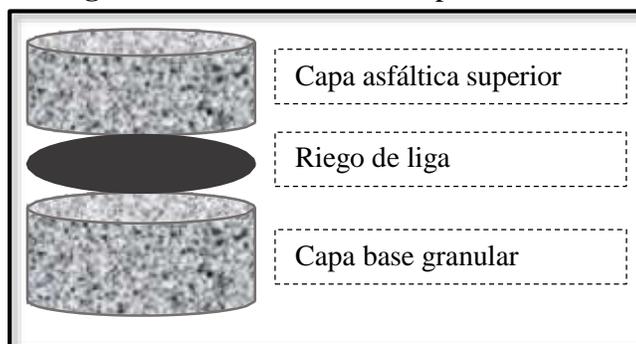
Para ello se utilizará el porcentaje óptimo de humedad para la capa de suelo granular que fue calculado en la etapa de caracterización del suelo como capa base y también se trabajara con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, el cual fue calculado fabricando probetas con diferentes porcentajes de 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 fue de 5.88 %.

#### 3.8.1 Elaboración de las probetas para el ensayo de corte

Para este ensayo de corte con la cual se pretende obtener dotaciones más adecuadas de polvo de silicio y grafito que garanticen una mejora en la adherencia entre capas modificando el riego de liga con polvo de silicio y grafito, se elaboraron probetas cilíndricas de 9.5 cm de diámetro. Estas probetas estarán conformadas por dos capas, una de suelo como capa base y otra capa de mezcla asfáltica densa unidas por el riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito y también probetas con riego de liga convencional. Cada probeta tendrá una altura aproximada de 20 cm.

**Figura 3.82.** Estructura de la probeta cilíndrica



Fuente: Elaboración propia

### 3.8.1.1 Metodología de fabricación de la capa base granular de la probeta

La capa base estará compuesta de un suelo granular A-1a que fue clasificado anteriormente, esta capa tendrá una altura de 15 cm de altura considerando la altura de nuestros moldes cilíndricos, lo que se hace primeramente es tamizar el material con el tamiz 3/4 ”, posteriormente se debe pesar una cantidad adecuada de 10 kg y se vierte agua para su humedad optima calculado anteriormente que es de 7.07 % para su densidad máxima.

Se procede al mezclado del agua y el suelo para obtener una humedad uniforme en todo el suelo, una vez realizado el mezclado correspondiente se procederá a su compactación en cada molde con la ayuda del martillo de compactación T-180, se lo realizara en 3 capas para cada molde a 56 golpes para cada capa, viendo que quede una superficie uniforme para la posterior aplicación del riego de liga.

El suelo con que se trabajara estará seco ya que se lo pondrá al horno eléctrico un día antes de realizar cada compactación de las probetas para evitar errores que afecten a la humedad del suelo.

**Figura 3.83.** Tamizado del suelo



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.84.** Preparación del suelo para su humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.85.** Compactación del suelo en los moldes



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.86.** Probetas compactadas de suelo 15cm



Fuente: Elaboración propia

### 3.8.1.2 Aplicación del riego de liga

La aplicación del riego de liga será manualmente utilizando una brocha delgada para evitar pérdidas. Se utilizará una dotación de riego de liga de  $0.5 \text{ lt/m}^2$ , usando ligante, de curado rápido (RC-70).

Las cantidades a aplicar para cada dosis de riego serán de acuerdo a lo presentado en las tablas 3.59 y 3.60 de acuerdo al cada porcentaje de modificador tanto para el polvo de silicio como para el grafito.

**Figura 3.87.** Aplicación del riego de liga modificado con la cantidad calculada



Fuente: Elaboración propia

Una vez aplicado el riego de liga se dejará reposar durante un tiempo de 12 a 24 horas para la evaporación de la emulsión y la penetración en la capa base.

Transcurrido el tiempo se procederá a la realización de la conformación de la capa asfáltica (capa superior), el cual estará adherida por el riego de liga aplicado a la capa.

**Figura 3.88.** Probetas después de la aplicación del riego de liga modificado



Fuente: Elaboración propia

### **3.8.1.3 Elaboración de la capa de pavimento flexible**

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

Se calculará la cantidad de agregados para un peso total de 1200 gr que se necesita para el volumen de una probeta para el Marshall para a capa de pavimento flexible de grava, gravilla, arena y cemento asfáltico.

El mezclado de los agregados con el cemento asfáltico se lo realizara a una temperatura de 140 a 150 grados centígrados con ayuda de una hornalla eléctrica o una cocina a gas para el incremento de la temperatura.

**Tabla 3.62.** Cantidad de material para cada probeta en función al porcentaje óptimo de asfalto

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico				5.88 %
Material	grava	gravilla	arena	al 94.1 %
Porcentaje	25%	30%	45%	
Cantidades de material para un peso de 1200 gr				
Peso de material		Capa Asfáltica		
Cemento asfáltico (gr.)		70.56		
Grava (gr.)		282.36		
Gravilla (gr.)		338.83		
Arena (gr.)		508.25		
<b>Peso de la briqueta (gr.)</b>		<b>1200</b>		

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 probetas.

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 la capa asfáltica.

**Figura 3.89.** Preparado de la muestra previo al mezclado



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.90.** Proceso de mezclado



Fuente: Elaboración propia

#### **3.8.1.4 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, en nuestro caso al tratarse de moldes que contienen capa base no se los podrá precalentar.

Se colocará papel un poquito de aceite sucio a las probetas para poder desmoldarlas luego, 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 ya que no se podrá voltear la cara para realizar los 75 golpes por lado, conformando así la capa superior de la probeta.

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 probeta durante al menos 20 días después de construida para su posterior análisis de acuerdo a la investigación que se está realizando en laboratorio.

**Figura 3.91.** Compactado de la muestra con 150 golpes



Fuente: Elaboración propia

### 3.9 Mejoramiento de puesta en obra del riego de liga

#### 3.9.1 Dotación de riego de liga

La determinación de la dotación del riego de liga debe que utilizara para una mejor adherencia según estudios anteriores para la colocación de sobrecapas será de 0.5 litros por metro cuadrado según el valor indicado de acuerdo a estudios que se hicieron en obra, ajustada en el tramo de prueba, dependiendo de la condición de la superficie a regar. El mismo surge de la verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en la *Tabla N°3.63* para el ensayo de adherencia entre capas, sobre los testigos extraídos del tramo de prueba.

**Tabla 3.63.** Ensayo de adherencia entre capas

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Exigencia</b>
Ensayo de adherencia entre capas de rodadura (MPa)	UNE-EN 12697-48, ensayo SBT	>0.70
Ensayo de adherencia entre capa base y capas de rodadura (MPa)	UNE-EN 12697-48, ensayo SBT	>0.30

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### 3.9.2 Presentación de dotación en obra

La distribución regular del riego de liga no se debe iniciar hasta que el inspector de calidad haya aprobado la correspondiente dotación de obra presentada por el contratista. Para la aprobación de la dotación de obra, es necesario verificar y ajustar la misma en el Tramo de Prueba correspondiente.

La dotación de obra debe emplearse durante todo el proceso constructivo de la obra, siempre que se mantengan las características de los materiales que la componen. Toda vez que cambie alguno de los materiales o se excedan sus tolerancias de calidad, su composición debe ser reformulada y reaprobada nuevamente siguiendo los lineamientos de especificaciones técnicas generales.

Los informes de presentación de la dotación de obra deben incluir como mínimo los requerimientos establecidos en la Tabla N°3.64.

**Tabla 3.64.** Requisitos que debe cumplir la dotación de obra.

<b>Parámetro</b>	<b>Información que debe ser consignada</b>
Emulsión asfáltica	Identificación, características, hoja técnica del producto, hoja de seguridad y dotación (en g/m <sup>2</sup> ) de residuo asfáltico sobre la capa regada
Temperaturas	Se debe iniciar el rango de temperatura de almacenamiento y de aplicación de la emulsión, la cual es suministrada por el proveedor de la emulsión asfáltica.
Ajustes en el tramo de prueba	La dotación informada debe incluir los posibles ajustes realizados durante el tramo de prueba.

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### 3.9.3 Equipos de obra

No se puede utilizar en la ejecución regular de un riego ningún equipo que no haya sido previamente empleado en el Tramo de Prueba y aprobado por el Inspector de Calidad de la obra en construcción.

#### 3.9.3.1 Tanques de almacenamiento de la emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas se deben almacenar en tanques que se ajusten a los requisitos que se establecen en la *Tabla N°3.65*.

**Tabla 3.65.** Requisitos que deben cumplir los elementos de transporte y almacenamiento de emulsiones asfálticas

Características	Requisitos
Tanques de almacenamiento	<p>Los tanques de almacenamiento de la emulsión asfáltica deben ser, idealmente, cilíndricos y verticales y estar térmicamente aislados del medio ambiente.</p> <p>El tanque de almacenamiento debe tener un sistema que permita mantener la temperatura de almacenamiento de la emulsión asfáltica dentro del entorno indicado por el proveedor de la emulsión asfáltica.</p> <p>Para evitar la rotura de la capa de la emulsión en contacto con el aire y la formación de espuma, el caño de alimentación debe llegar hasta el fondo del tanque.</p> <p>El sistema de bombeo empleado debe ser tal que no ingresen aire a la emulsión asfáltica.</p> <p>Todas las tuberías directas y bombas, preferiblemente rotativas, utilizadas para el traspaso de la emulsión asfáltica desde la cisterna de transporte al tanque de almacenamiento, y de éste al equipo de aplicación en obra o mezclado, deben estar dotados de un sistema que permita la perfecta limpieza y barrido de los conductos después de cada jornada de trabajo.</p>

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### 3.9.3.2 Equipos para la distribución

Las emulsiones asfálticas para riego de curado se deben distribuir con equipos que se ajusten a los requisitos que se establecen en la Tabla 3.66.

**Tabla 3.66.** Requisitos que deben cumplir los elementos distribuidores de emulsiones asfálticas

Características	Requisitos
Distribución De la emulsión asfáltica	<p>El equipo de distribución del riego de liga debe tener un sistema que regule la dotación en función de la velocidad de avance, de manera de obtener un riego uniforme sobre la superficie, cumpliendo la dotación definida. El equipo para la distribución de la emulsión asfáltica debe ir montado sobre neumáticos, el mismo debe ser capaz de mantener la emulsión dentro del rango de temperatura prescrita.</p> <p>La bomba debe generar una presión suficiente en la barra de distribución, de manera que los picos rieguen de forma pareja.</p>

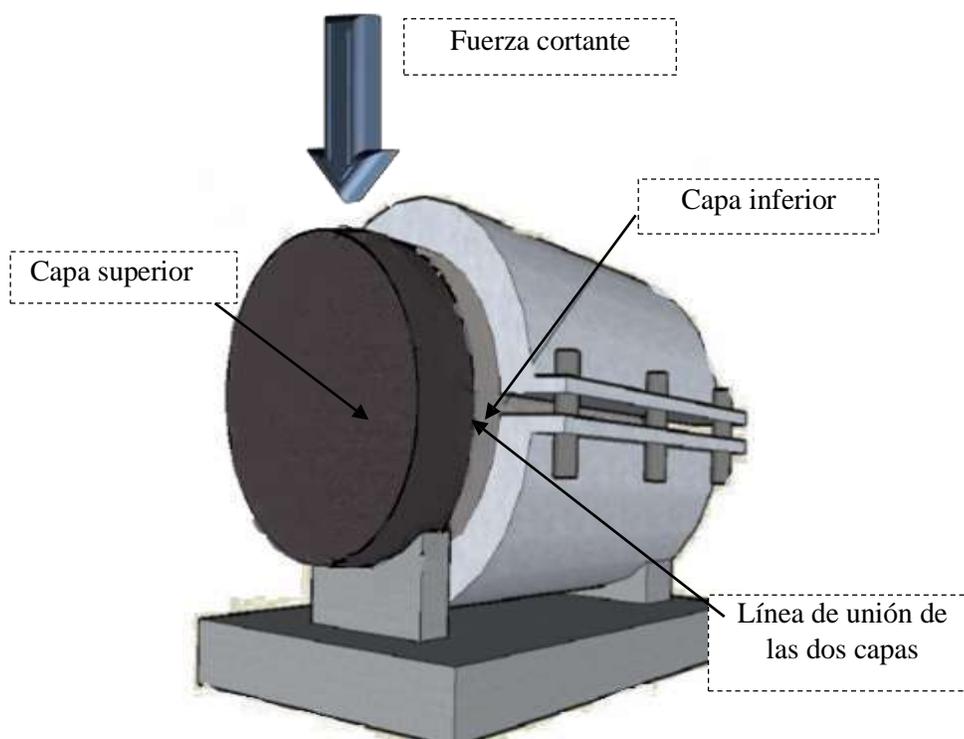
Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### 3.10 Desarrollo de los ensayos

#### 3.10.1 Ensayo de adherencia de capas (UNE-EN 12697-48 ensayo SBT)

Este ensayo servirá para el análisis y evaluación del efecto de la mejora de la adherencia entre capas y durabilidad del riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito, mediante la rotura de los especímenes (probetas) fabricadas en laboratorio, para verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supera el valor de 0.60 MPa, cuando una de las capas sea de rodadura, o de 0.30 Mpa en el resto de casos que es la resistencia de un riego de liga convencional, para esto se utilizara el método de corte (UNE-EN 12697-48 ensayo SBT), 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 y las deformaciones producidas hasta llegar a la falla. Con estos resultados se podrá evaluar la adherencia conseguida de cada espécimen construido.

**Figura 3.92.** Esquema del ensayo de adherencia



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.67.** Porcentajes de nanomateriales con los que se trabajara

Porcentaje de silicio (%)	Porcentaje de grafito (%)
0	0
2	2
4	4
6	6
8	8
10	10

Fuente: Elaboración propia

### 3.10.1.1 Instrumentos y equipos utilizados

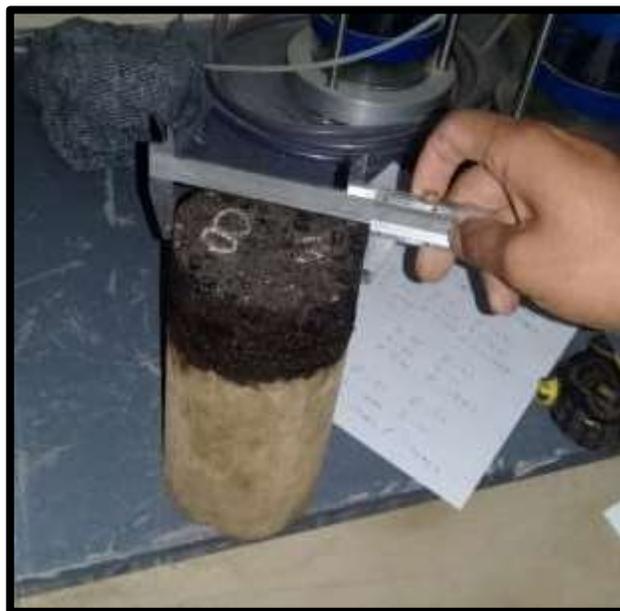
**Prensa de carga.-** Este equipo será una prensa de compresión, de funcionamiento mecánico, el cual proporcione una carga de compresión y una velocidad uniforme de desplazamiento durante la aplicación de carga, además cuente con un dispositivo (dial) el cual registre la deformación en función de la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

**Figura 3.93.** Dispositivo de carga (prensa)

Fuente: Elaboración propia

**Vernier o calibrador.-** Este instrumento servirá para medir con precisión el diámetro de cada probeta.

**Figura 3.94** Probeta a someter a corte



Fuente: Elaboración propia

**Aparato como 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 la estructura capa base que conforman a la probeta, 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 3.95.** Dispositivo de ensayo de corte



Fuente: Elaboración propia

### 3.10.1.2 Procedimiento del ensayo de corte

Una vez que se tienen las probetas de dos capas listas, se procede a colocar dentro de la mordaza del dispositivo de corte. Dentro de la mordaza se coloca la capa base, dejando la capa de pavimento flexible 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 3.96.** 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 porcentaje de modificación con silicio y grafito 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 3.97.** Realización del ensayo de corte



Fuente: Elaboración propia

**Resistencia a corte:**

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

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  $mm^2$ .

### 3.10.2 Ensayo de resistencia a carga con la prensa de hormigón de probetas cilíndricas (ASTM C39 AASHTO T22)

Este ensayo servirá para el análisis y evaluación del efecto de la mejora de la adherencia entre capas y durabilidad del riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito, mediante la rotura por compresión de los especímenes (probetas) fabricadas en laboratorio con la máquina de la prensa hidráulica de hormigón, para verificar que la resistencia al esfuerzo a compresión de las probetas donde el riego de liga fue modificado con polvo de silicio y grafito es mayor en comparación con las probetas realizadas con riego de liga convencional, ya que esta es una metodología de fácil ejecución, que permite determinar la resistencia a compresión aplicada para las dos capas y las deformaciones producidas hasta llegar a la falla. Con estos resultados se podrá evaluar el efecto de la mejora de la adherencia conseguida de cada espécimen construido.

**Figura 3.98.** Esquema del ensayo



Fuente: Elaboración propia

#### 3.10.2.1 Instrumentos y equipos utilizados

**Prensa hidráulica.-** La prensa hidráulica es una máquina que nos permite generar y medir una fuerza en el sentido de tracción, compresión u ambos, además de mostrarnos la curva de deformación que sufre la probeta una vez que llega a su primera fisura.

Estos instrumentos permiten su integración en las maquinas generadoras de fuerza conformando una maquina universal de ensayos.

**Figura 3.99.** Esquema del ensayo



Fuente: Elaboración propia

**Flexometro.-** Instrumento que nos permitirá determinar los diámetros y alturas de las probetas a ensayar.

**Balanza.-** Instrumento que nos permitirá determinar el peso de cada una de las probetas a ensayar.

**Figura 3.100.** Pesaje de cada probeta para ensayo de compresión



Fuente: Elaboración propia

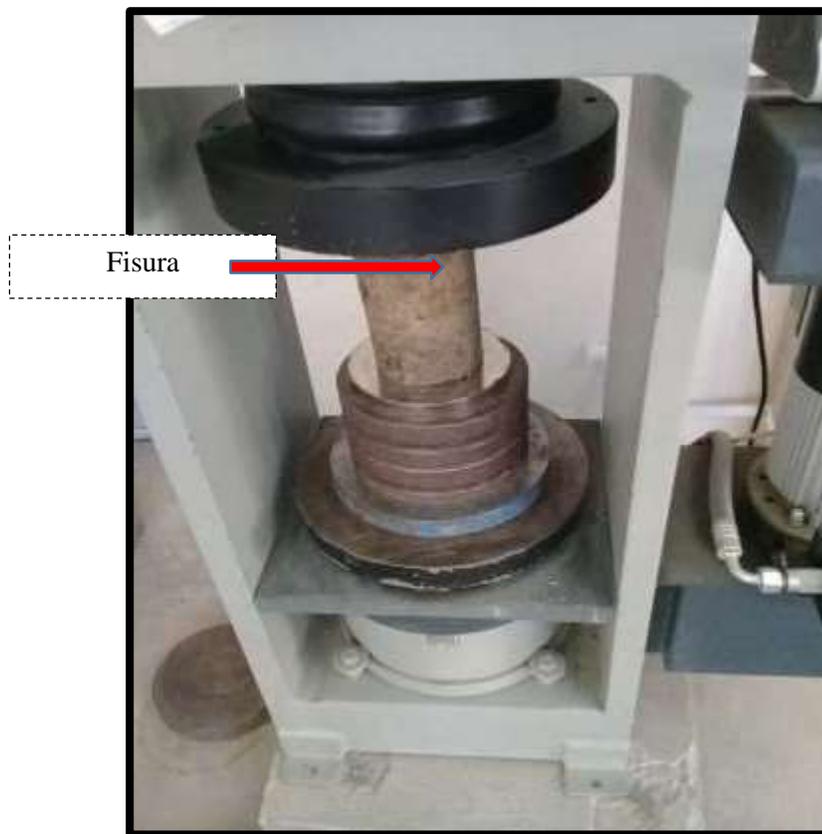
### 3.10.2.2 Procedimiento del ensayo de compresión

Primeramente se procederá al obtener el peso de todas las probetas a ser sometidas a compresión, posteriormente se determinara el diámetro de las probetas y su altura ya que son datos que no pide la prensa hidráulica.

Se debe introducir los datos de peso, altura, diámetro y edad de las probetas antes de someter a presión a la probeta.

Una vez introducido los datos se cola la probeta en la prensa teniendo en cuenta la altura de subida que tiene la prensa para realizar el ensayo, una vez colocado correctamente la probeta en el centro de la prensa se procede a realizar el ensayo de compresión hasta la primera fisura que sufre cada probeta.

**Figura 3.101.** Rotura de la probeta a compresión



Fuente: Elaboración propia

Con los datos del ensayo se podrá realizar un diagrama de carga vs porcentaje de modificación con silicio y grafito para cada probeta ensayada.

Mediante este ensayo 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.

### 3.10.3 Ensayo de peso volumétrico

Es la relación entre el peso de la masa y el volumen que ocupa expresándose de la siguiente:

$$Pv = \frac{Wm}{Vm}$$

Donde:

Pv = Peso volumétrico.

Wm = Peso de la masa de la probeta (Kg).

Vm = Volumen de la masa de la probeta (m<sup>3</sup>).

Este ensayo nos sirve como parámetro de compactación seco de las probetas donde el riego de liga ha sido modificado con nano materiales polvo de silicio y grafito en relación con el riego de liga convencional.

#### 3.10.3.1 Instrumentos y Equipos utilizados para el ensayo

**Vernier.-** Instrumento que nos permitirá medir los diámetros de las probetas con mejor precisión.

**Flexometro.-** Instrumento que nos permitirá determinar la altura de cada una de las probetas a realizar en el ensayo.

**Balanza.-** Equipo que nos permitirá determinar el peso de la probeta en estudio con una precisión de 0.05 kg.

### 3.10.3.2 Procedimiento del ensayo

Primeramente se determinara el diámetro de las probetas con la ayuda del vernier, luego se procederá a determinar su altura de cada probeta y finalmente se obtendrá el peso de cada probeta en la balanza.

**Figura 3.102.** Medición y pesaje de las probetas



Fuente: Elaboración propia

### 3.10.4 Ensayo de cántabro

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse en la elaboración de probetas para el ensayo cántabro, tanto en probetas fabricadas con mezclas en frío como con mezclas en caliente, con el fin de reducir y limitar las dispersiones en los resultados de los ensayos de unión entre las dos capas y demostrar que mejorara la durabilidad del riego de liga con la modificación del mismo con polvo de silicio y grafito en un porcentaje optimo tanto del silicio como del grafito y conseguir una buena repetibilidad y reproducibilidad del mismo.

La fórmula que se utilizara será la siguiente:

$$P = \frac{P1 - P2}{P2} * 10$$

Donde:

P = Valor de la pérdida por desgaste de cántabro (%).

P1 = Masa inicial de la probeta (g).

P2 = Masa final de la probeta (g).

#### **3.10.4.1 Instrumentos y equipos utilizados**

**Balanza.-** Instrumento que nos permitirá determinar el peso inicial y final de cada una de las probetas a ensayar.

**Máquina de desgaste de los ángeles.-** Équido debidamente calibrado que nos permitirá determinar el desgaste de las probetas con revoluciones por minuto sin la utilización de las esferas.

#### **3.10.4.2 Procedimiento de la práctica**

Una vez que se haya compactado las 2 capas en el molde de cada probeta con el riego de liga modificado con porcentaje óptimo de polvo de silicio y grafito se procederá a desmoldarlo y posterior recubrimiento de la probeta con parafina para que la misma no pierda sus propiedades de humedad de compactación.

Se dejó reposar por 15 días a temperatura ambiente las probetas, luego una vez que se realizó el ensayo a una temperatura ambiente de 27 grados se procedió a quitar el papel parafinado para posteriormente obtener su peso.

Una vez obtenido el peso de cada probeta se procedió a introducir la probeta a la máquina de los ángeles sellando bien la tapa de la máquina y se hace girar el tambor a una velocidad normalizada durante 300 vueltas, y su posterior pesaje luego del ensayo.

**Figura 3.103.** Proceso de colocación a la máquina de desgaste



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el ensayo se podrá observar el desgaste que tuvo la probeta con las dos capas introducido a la máquina de desgaste de los ángeles.

**Figura 3.104.** Probetas después del ensayo de desgaste



Fuente: Elaboración propia

### 3.10.5 Ensayo de resistencia a la penetración del agua a la capa base

Este ensayo solo se lo hizo con la capa de conformación de la capa base y la aplicación de riego modificado con polvo de silicio y grafito al mejor porcentaje y con riego de liga convencional.

A la probeta de capa base con riego de liga una vez que la emulsión hizo su rompimiento se procedió a colocar con masilla de plastilina para crear una superficie cóncava de la probeta de capa base y así pueda retener agua en su superficie superior al echarle agua.

Con el fin de observar a los 7 días si el agua penetra en la capa base ya que el riego de liga también funciona como impermeabilizante de la capa base para evitar que la presencia de humedad deteriore la capa.

**Figura 3.105.** Probetas sometidas al ensayo penetración del agua



Fuente: Elaboración propia

### 3.11 Presentación de resultados

En este punto se muestran los resultados que se obtuvieron de los ensayos realizados, como son el ensayo de adherencia (para la determinación del mejor porcentaje de

modificación de riego de liga con polvo de silicio y grafito, para mejorar la adherencia entre capas) y el ensayo carga o compresión (para el control de adherencia y función conjunta de las 2 capas) para determinar la idoneidad de la metodología propuesta.

### 3.11.1 Ensayo de Adherencia

Los resultados del ensayo se lo hace sometiendo la probeta a estado de corte utilizando en método UNE-EN 12697-48, ensayo SBT se muestran a continuación, realizado los cálculos necesarios, y diagramas comparativos de las cargas de corte vs porcentaje de polvo de silicio y grafito para las diferentes dosis de silicio y grafito al riego de liga de curado rápido utilizado.

#### 3.11.1.1 Asfalto líquido o rebajado RC-70 (curado rápido) modificado con polvo de silicio

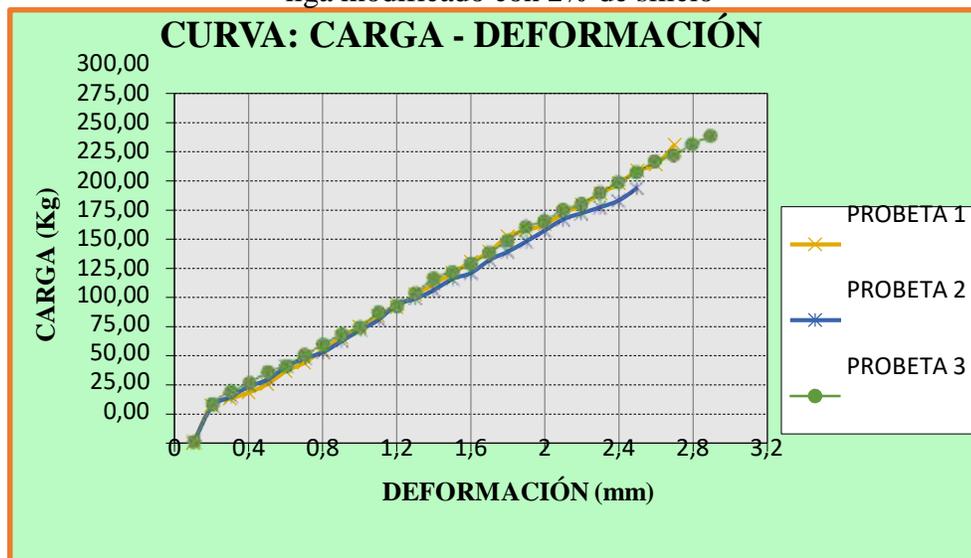
**Tabla 3.68.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 2% de polvo de silicio

Penetración	Probeta nº 1				Probeta nº 2				Probeta nº 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	30.97	0.44	42864.16	0.04	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	38.30	0.54	53010.07	0.05	39.77	0.56	55039.25	0.06	43.53	0.61	60250.60	0.06
0.4	43.43	0.61	60112.20	0.06	48.56	0.69	67214.33	0.07	50.90	0.72	70451.87	0.07
0.5	50.76	0.72	70258.10	0.07	54.43	0.77	75331.06	0.08	60.49	0.85	83713.51	0.08
0.6	61.76	0.87	85476.96	0.09	65.42	0.92	90549.91	0.09	65.64	0.93	90854.40	0.09
0.7	69.09	0.97	95622.86	0.10	72.76	1.03	100695.82	0.10	75.23	1.06	104116.04	0.10
0.8	80.09	1.13	110841.72	0.11	77.89	1.10	107797.95	0.11	84.07	1.19	116357.56	0.12
0.9	91.08	1.29	126060.58	0.13	87.42	1.23	120987.62	0.12	92.92	1.31	128599.08	0.13
1	99.88	1.41	138235.66	0.14	96.95	1.37	134177.30	0.13	98.81	1.39	136760.09	0.14
1.1	109.41	1.54	151425.34	0.15	105.74	1.49	146352.38	0.15	112.08	1.58	155122.37	0.16
1.2	116.74	1.65	161571.24	0.16	118.94	1.68	164615.01	0.16	117.24	1.65	162263.25	0.16
1.3	127.74	1.80	176790.10	0.18	124.07	1.75	171717.14	0.17	128.30	1.81	177565.15	0.18

1.4	136.53	1.93	188965.18	0.19	131.40	1.85	181863.05	0.18	141.56	2.00	195927.43	0.20
1.5	146.06	2.06	202154.86	0.20	140.93	1.99	195052.72	0.20	146.72	2.07	203068.31	0.20
1.6	155.59	2.20	215344.53	0.22	146.06	2.06	202154.86	0.20	154.09	2.17	213269.58	0.21
1.7	164.39	2.32	227519.62	0.23	157.06	2.22	217373.71	0.22	163.68	2.31	226531.22	0.23
1.8	177.58	2.51	245782.24	0.25	164.39	2.32	227519.62	0.23	173.99	2.45	240813.00	0.24
1.9	182.72	2.58	252884.38	0.25	173.19	2.44	239694.70	0.24	185.79	2.62	257135.02	0.26
2	187.85	2.65	259986.51	0.26	182.72	2.58	252884.38	0.25	190.95	2.69	264275.91	0.26
2.1	197.38	2.78	273176.18	0.27	192.25	2.71	266074.05	0.27	200.53	2.83	277537.55	0.28
2.2	204.71	2.89	283322.09	0.28	197.38	2.78	273176.18	0.27	205.69	2.90	284678.44	0.28
2.3	214.24	3.02	296511.76	0.30	202.51	2.86	280278.32	0.28	215.27	3.04	297940.08	0.30
2.4	223.03	3.15	308686.85	0.31	208.37	2.94	288395.04	0.29	224.11	3.16	310181.60	0.31
2.5	234.03	3.30	323905.70	0.32	219.37	3.09	303613.89	0.30	232.96	3.29	322423.12	0.32
2.6	239.16	3.37	331007.84	0.33					242.54	3.42	335684.76	0.34
2.7	256.02	3.61	354343.41	0.35					247.70	3.49	342825.65	0.34
2.8									257.28	3.63	356087.29	0.36
2.9									264.65	3.73	366288.56	0.37

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.106.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 2% de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con polvo de silicio.

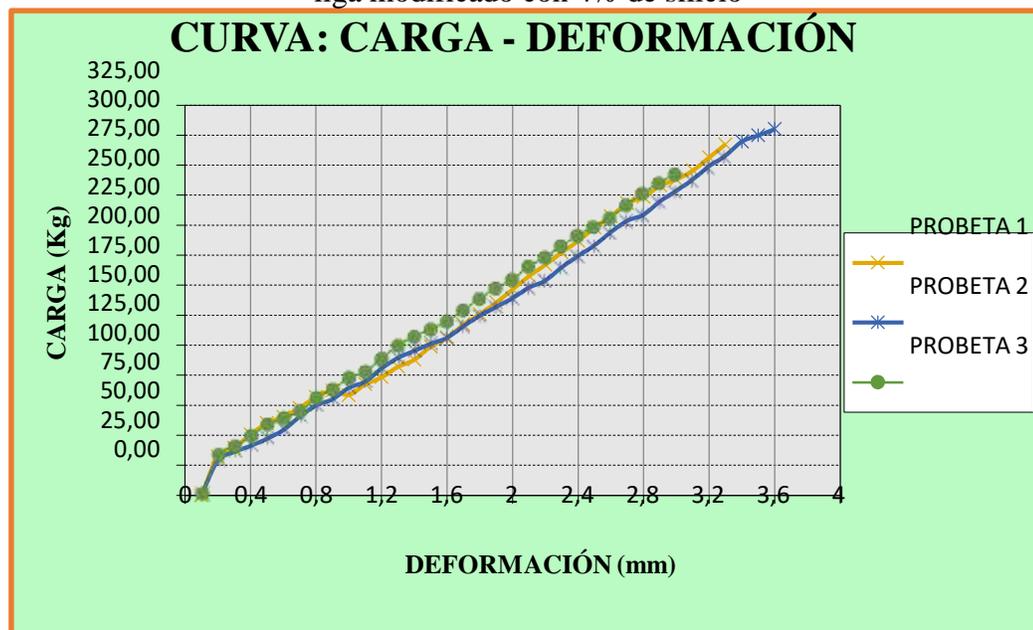
**Tabla 3.69.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 4% de polvo de silicio

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	28.77	0.41	39820.39	0.04	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	39.77	0.56	55039.25	0.06	36.10	0.51	49966.30	0.05	39.85	0.56	55149.97	0.06
0.4	50.76	0.72	70258.10	0.07	41.23	0.58	57068.43	0.06	48.69	0.69	67391.49	0.07
0.5	60.29	0.85	83447.78	0.08	47.10	0.66	65185.15	0.07	58.27	0.82	80653.13	0.08
0.6	65.42	0.92	90549.91	0.09	54.43	0.77	75331.06	0.08	63.43	0.89	87794.02	0.09
0.7	72.76	1.03	100695.82	0.10	65.42	0.92	90549.91	0.09	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.8	82.29	1.16	113885.49	0.11	74.95	1.06	103739.59	0.10	80.39	1.13	111256.93	0.11
0.9	87.42	1.23	120987.62	0.12	80.09	1.13	110841.72	0.11	87.76	1.24	121458.19	0.12
1	83.75	1.18	115914.67	0.12	89.62	1.26	124031.40	0.12	97.34	1.37	134719.84	0.13
1.1	92.55	1.31	128089.76	0.13	94.75	1.34	131133.53	0.13	102.50	1.45	141860.72	0.14
1.2	98.41	1.39	136206.48	0.14	105.74	1.49	146352.38	0.15	113.55	1.60	157162.62	0.16
1.3	107.21	1.51	148381.56	0.15	114.54	1.62	158527.47	0.16	124.61	1.76	172464.52	0.17
1.4	113.07	1.60	156498.29	0.16	120.41	1.70	166644.19	0.17	131.98	1.86	182665.78	0.18
1.5	124.07	1.75	171717.14	0.17	126.27	1.78	174760.91	0.17	137.88	1.95	190826.80	0.19
1.6	131.40	1.85	181863.05	0.18	131.40	1.85	181863.05	0.18	144.51	2.04	200007.94	0.20
1.7	142.40	2.01	197081.90	0.20	140.93	1.99	195052.72	0.20	154.09	2.17	213269.58	0.21
1.8	151.19	2.13	209256.99	0.21	149.73	2.11	207227.81	0.21	163.68	2.31	226531.22	0.23
1.9	160.72	2.27	222446.66	0.22	157.06	2.22	217373.71	0.22	172.52	2.43	238772.74	0.24
2	171.72	2.42	237665.52	0.24	164.39	2.32	227519.62	0.23	179.89	2.54	248974.01	0.25
2.1	182.72	2.58	252884.38	0.25	173.19	2.44	239694.70	0.24	190.95	2.69	264275.91	0.26
2.2	192.25	2.71	266074.05	0.27	179.05	2.53	247811.42	0.25	198.32	2.80	274477.17	0.27

2.3	202.51	2.86	280278.32	0.28	190.05	2.68	263030.28	0.26	207.90	2.93	287738.82	0.29
2.4	212.04	2.99	293467.99	0.29	199.58	2.82	276219.95	0.28	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.5	223.03	3.15	308686.85	0.31	208.37	2.94	288395.04	0.29	224.11	3.16	310181.60	0.31
2.6	232.56	3.28	321876.52	0.32	219.37	3.09	303613.89	0.30	231.49	3.27	320382.86	0.32
2.7	243.56	3.44	337095.38	0.34	228.90	3.23	316803.57	0.32	242.54	3.42	335684.76	0.34
2.8	248.69	3.51	344197.51	0.34	234.03	3.30	323905.70	0.32	252.12	3.56	348946.41	0.35
2.9	258.22	3.64	357387.19	0.36	245.03	3.46	339124.56	0.34	260.97	3.68	361187.92	0.36
3	263.35	3.72	364489.32	0.36	253.82	3.58	351299.64	0.35	268.34	3.79	371389.19	0.37
3.1	270.68	3.82	374635.22	0.37	263.35	3.72	364489.32	0.36				
3.2	281.68	3.97	389854.08	0.39	274.35	3.87	379708.17	0.38				
3.3	292.68	4.13	405072.93	0.41	283.15	3.99	391883.26	0.39				
3.4					294.88	4.16	408116.71	0.41				
3.5					300.01	4.23	415218.84	0.42				
3.6					305.14	4.31	422320.97	0.42				

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.107.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 4% de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con polvo de silicio.

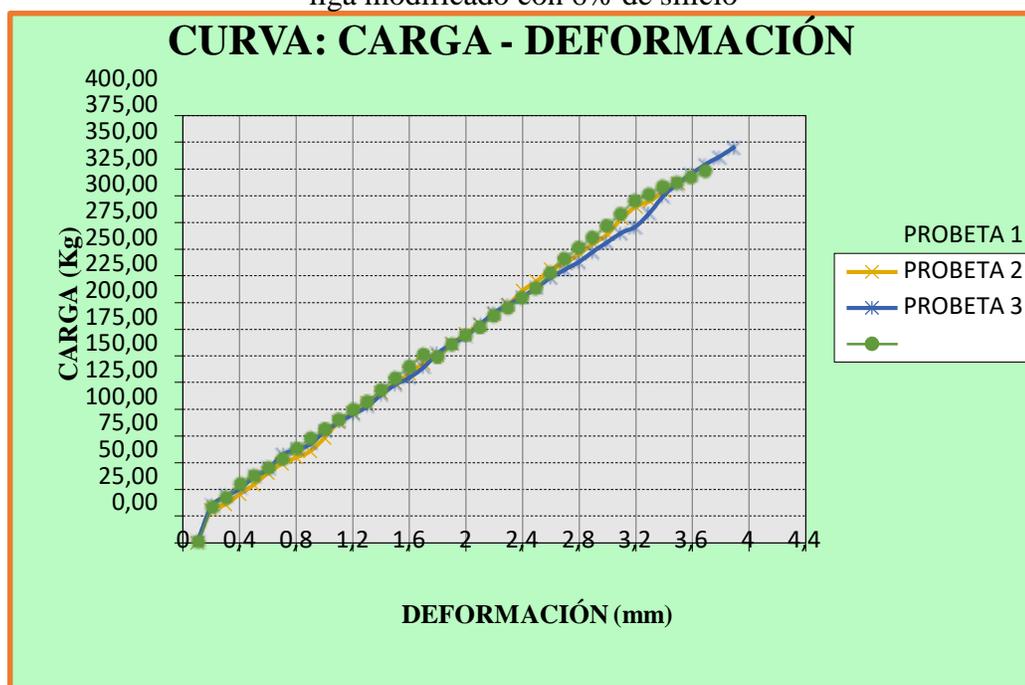
**Tabla 3.70.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 6% de polvo de silicio

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	30.97	0.44	42864.16	0.04	33.90	0.48	46922.53	0.05	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	36.10	0.51	49966.30	0.05	43.43	0.61	60112.20	0.06	41.32	0.58	57190.22	0.06
0.4	45.63	0.64	63155.97	0.06	50.76	0.72	70258.10	0.07	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.5	54.43	0.77	75331.06	0.08	61.76	0.87	85476.96	0.09	61.96	0.87	85753.77	0.09
0.6	65.42	0.92	90549.91	0.09	69.09	0.97	95622.86	0.10	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.7	74.22	1.05	102725.00	0.10	82.29	1.16	113885.49	0.11	78.18	1.10	108196.55	0.11
0.8	80.09	1.13	110841.72	0.11	87.42	1.23	120987.62	0.12	87.76	1.24	121458.19	0.12
0.9	85.95	1.21	118958.44	0.12	92.55	1.31	128089.76	0.13	97.34	1.37	134719.84	0.13
1	98.41	1.39	136206.48	0.14	104.28	1.47	144323.20	0.14	106.18	1.50	146961.36	0.15
1.1	113.07	1.60	156498.29	0.16	113.07	1.60	156498.29	0.16	115.03	1.62	159202.87	0.16
1.2	121.87	1.72	168673.37	0.17	120.41	1.70	166644.19	0.17	124.61	1.76	172464.52	0.17
1.3	131.40	1.85	181863.05	0.18	127.74	1.80	176790.10	0.18	131.98	1.86	182665.78	0.18
1.4	140.93	1.99	195052.72	0.20	138.73	1.96	192008.95	0.19	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.5	149.73	2.11	207227.81	0.21	148.26	2.09	205198.63	0.21	154.09	2.17	213269.58	0.21
1.6	158.52	2.24	219402.89	0.22	154.86	2.18	214329.94	0.21	165.15	2.33	228571.48	0.23
1.7	168.05	2.37	232592.57	0.23	164.39	2.32	227519.62	0.23	176.21	2.49	243873.38	0.24
1.8	175.39	2.47	242738.47	0.24	177.58	2.51	245782.24	0.25	173.99	2.45	240813.00	0.24
1.9	186.38	2.63	257957.33	0.26	186.38	2.63	257957.33	0.26	185.79	2.62	257135.02	0.26
2	195.91	2.76	271147.00	0.27	193.71	2.73	268103.23	0.27	194.63	2.75	269376.54	0.27
2.1	204.71	2.89	283322.09	0.28	204.71	2.89	283322.09	0.28	202.00	2.85	279577.80	0.28
2.2	214.24	3.02	296511.76	0.30	215.70	3.04	298540.94	0.30	213.06	3.01	294879.70	0.29
2.3	223.03	3.15	308686.85	0.31	223.03	3.15	308686.85	0.31	220.43	3.11	305080.97	0.31
2.4	236.23	3.33	326949.47	0.33	230.37	3.25	318832.75	0.32	230.01	3.25	318342.61	0.32

2.5	245.03	3.46	339124.56	0.34	239.16	3.37	331007.84	0.33	238.86	3.37	330584.13	0.33
2.6	256.02	3.61	354343.41	0.35	248.69	3.51	344197.51	0.34	253.60	3.58	350986.66	0.35
2.7	261.89	3.69	362460.14	0.36	256.02	3.61	354343.41	0.35	266.86	3.77	369348.94	0.37
2.8	270.68	3.82	374635.22	0.37	263.35	3.72	364489.32	0.36	277.18	3.91	383630.71	0.38
2.9	280.21	3.95	387824.90	0.39	272.88	3.85	377678.99	0.38	286.77	4.05	396892.35	0.40
3	289.01	4.08	399999.98	0.40	281.68	3.97	389854.08	0.39	297.82	4.20	412194.25	0.41
3.1	303.67	4.28	420291.79	0.42	290.48	4.10	402029.16	0.40	308.88	4.36	427496.15	0.43
3.2	314.67	4.44	435510.65	0.44	296.34	4.18	410145.89	0.41	321.41	4.53	444838.30	0.44
3.3	319.95	4.51	442815.70	0.44	309.54	4.37	428408.51	0.43	327.30	4.62	452999.31	0.45
3.4	329.33	4.65	455802.45	0.46	325.66	4.59	450729.50	0.45	334.68	4.72	463200.57	0.46
3.5	336.66	4.75	465948.36	0.47	336.66	4.75	465948.36	0.47	338.36	4.77	468301.21	0.47
3.6					346.19	4.88	479138.03	0.48	343.52	4.85	475442.09	0.48
3.7					354.99	5.01	491313.12	0.49	349.42	4.93	483603.10	0.48
3.8					362.32	5.11	501459.02	0.50				
3.9					371.12	5.24	513634.11	0.51				

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.108.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 6% de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con polvo de silicio.

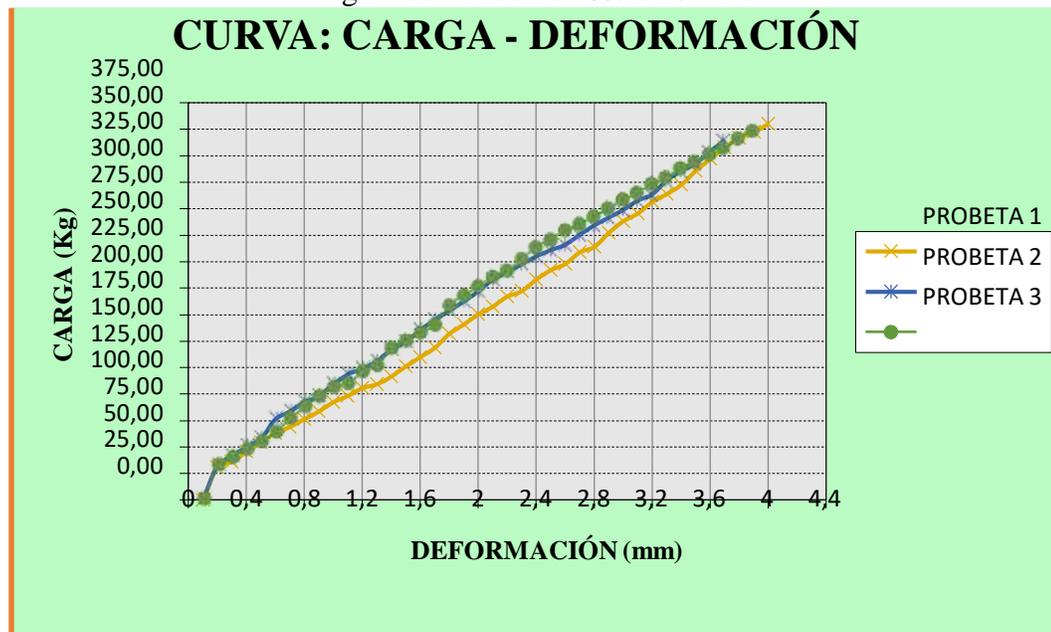
**Tabla 3.71.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 8% de polvo de silicio

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	30.97	0.44	42864.16	0.04	32.44	0.46	44893.34	0.04	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	36.10	0.51	49966.30	0.05	41.23	0.58	57068.43	0.06	39.85	0.56	55149.97	0.06
0.4	45.63	0.64	63155.97	0.06	50.76	0.72	70258.10	0.07	47.22	0.67	65351.24	0.07
0.5	54.43	0.77	75331.06	0.08	58.09	0.82	80404.01	0.08	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.6	63.23	0.89	87506.14	0.09	76.42	1.08	105768.77	0.11	63.43	0.89	87794.02	0.09
0.7	69.09	0.97	95622.86	0.10	83.75	1.18	115914.67	0.12	76.70	1.08	106156.30	0.11
0.8	76.42	1.08	105768.77	0.11	92.55	1.31	128089.76	0.13	87.76	1.24	121458.19	0.12
0.9	83.75	1.18	115914.67	0.12	98.41	1.39	136206.48	0.14	97.34	1.37	134719.84	0.13
1	92.55	1.31	128089.76	0.13	109.41	1.54	151425.34	0.15	106.18	1.50	146961.36	0.15
1.1	98.41	1.39	136206.48	0.14	118.94	1.68	164615.01	0.16	109.87	1.55	152061.99	0.15
1.2	105.74	1.49	146352.38	0.15	124.07	1.75	171717.14	0.17	120.93	1.71	167363.89	0.17
1.3	109.41	1.54	151425.34	0.15	131.40	1.85	181863.05	0.18	126.82	1.79	175524.90	0.18
1.4	116.74	1.65	161571.24	0.16	142.40	2.01	197081.90	0.20	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.5	126.27	1.78	174760.91	0.17	149.73	2.11	207227.81	0.21	150.41	2.12	208168.95	0.21
1.6	135.07	1.91	186936.00	0.19	160.72	2.27	222446.66	0.22	157.78	2.23	218370.21	0.22
1.7	143.86	2.03	199111.08	0.20	170.25	2.40	235636.34	0.24	165.15	2.33	228571.48	0.23
1.8	157.06	2.22	217373.71	0.22	179.05	2.53	247811.42	0.25	183.58	2.59	254074.64	0.25
1.9	165.86	2.34	229548.80	0.23	187.85	2.65	259986.51	0.26	193.16	2.73	267336.28	0.27
2	175.39	2.47	242738.47	0.24	197.38	2.78	273176.18	0.27	202.00	2.85	279577.80	0.28
2.1	182.72	2.58	252884.38	0.25	208.37	2.94	288395.04	0.29	210.85	2.97	291819.32	0.29
2.2	192.25	2.71	266074.05	0.27	215.70	3.04	298540.94	0.30	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.3	197.38	2.78	273176.18	0.27	223.03	3.15	308686.85	0.31	227.80	3.21	315282.23	0.32
2.4	208.37	2.94	288395.04	0.29	230.37	3.25	318832.75	0.32	238.86	3.37	330584.13	0.33

2.5	217.17	3.06	300570.12	0.30	236.23	3.33	326949.47	0.33	246.23	3.47	340785.39	0.34
2.6	223.03	3.15	308686.85	0.31	241.36	3.41	334051.61	0.33	255.07	3.60	353026.91	0.35
2.7	234.03	3.30	323905.70	0.32	250.89	3.54	347241.28	0.35	260.97	3.68	361187.92	0.36
2.8	239.16	3.37	331007.84	0.33	259.69	3.66	359416.37	0.36	268.34	3.79	371389.19	0.37
2.9	252.36	3.56	349270.46	0.35	267.02	3.77	369562.27	0.37	275.71	3.89	381590.45	0.38
3	263.35	3.72	364489.32	0.36	274.35	3.87	379708.17	0.38	284.55	4.01	393831.97	0.39
3.1	270.68	3.82	374635.22	0.37	283.15	3.99	391883.26	0.39	290.45	4.10	401992.98	0.40
3.2	281.68	3.97	389854.08	0.39	289.01	4.08	399999.98	0.40	299.30	4.22	414234.50	0.41
3.3	289.01	4.08	399999.98	0.40	302.21	4.26	418262.61	0.42	305.19	4.31	422395.51	0.42
3.4	297.81	4.20	412175.07	0.41	311.00	4.39	430437.69	0.43	314.04	4.43	434637.03	0.43
3.5	311.00	4.39	430437.69	0.43	318.33	4.49	440583.60	0.44	319.93	4.51	442798.04	0.44
3.6	322.00	4.54	445656.55	0.45	329.33	4.65	455802.45	0.46	327.30	4.62	452999.31	0.45
3.7	333.00	4.70	460875.41	0.46	340.33	4.80	471021.31	0.47	333.20	4.70	461160.32	0.46
3.8	341.79	4.82	473050.49	0.47					342.05	4.83	473401.84	0.47
3.9	347.66	4.90	481167.21	0.48					349.42	4.93	483603.10	0.48
4	354.99	5.01	491313.12	0.49								

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.109.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 8% de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con polvo de silicio.

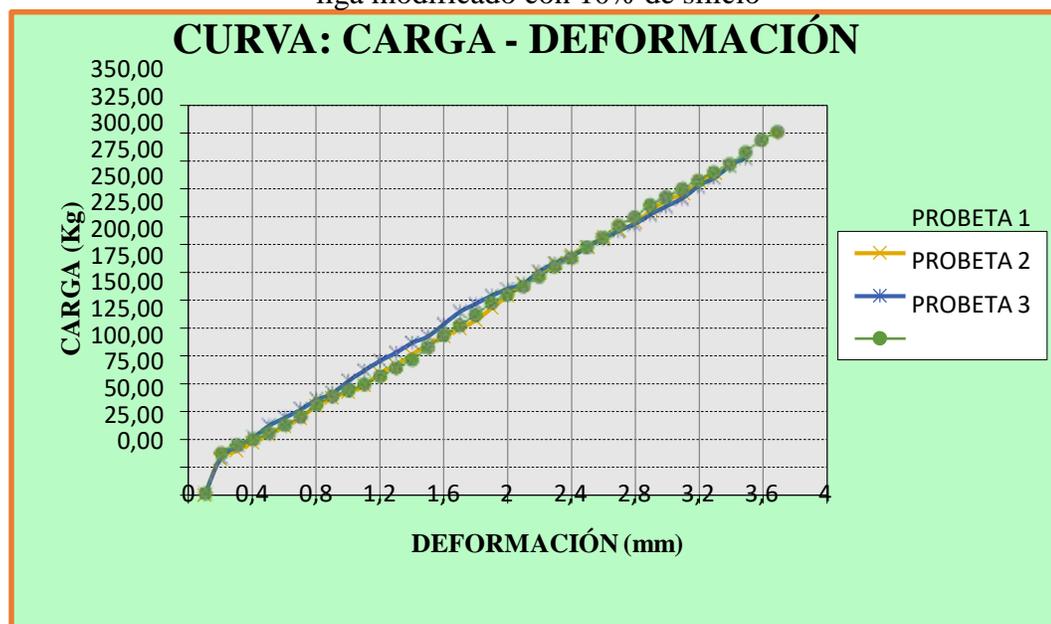
**Tabla 3.72.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 10% de polvo de silicio

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	32.44	0.46	44893.34	0.04	36.16	0.51	50049.34	0.05
0.3	39.77	0.56	55039.25	0.06	43.43	0.61	60112.20	0.06	43.53	0.61	60250.60	0.06
0.4	47.10	0.66	65185.15	0.07	50.76	0.72	70258.10	0.07	48.69	0.69	67391.49	0.07
0.5	54.43	0.77	75331.06	0.08	61.76	0.87	85476.96	0.09	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.6	61.76	0.87	85476.96	0.09	69.09	0.97	95622.86	0.10	61.96	0.87	85753.77	0.09
0.7	69.09	0.97	95622.86	0.10	76.42	1.08	105768.77	0.11	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.8	80.09	1.13	110841.72	0.11	85.22	1.20	117943.85	0.12	80.39	1.13	111256.93	0.11
0.9	87.42	1.23	120987.62	0.12	91.08	1.29	126060.58	0.13	87.76	1.24	121458.19	0.12
1	92.55	1.31	128089.76	0.13	102.08	1.44	141279.43	0.14	92.92	1.31	128599.08	0.13
1.1	98.41	1.39	136206.48	0.14	111.61	1.57	154469.11	0.15	98.81	1.39	136760.09	0.14
1.2	109.41	1.54	151425.34	0.15	120.41	1.70	166644.19	0.17	106.18	1.50	146961.36	0.15
1.3	116.74	1.65	161571.24	0.16	127.74	1.80	176790.10	0.18	113.55	1.60	157162.62	0.16
1.4	126.27	1.78	174760.91	0.17	136.53	1.93	188965.18	0.19	120.93	1.71	167363.89	0.17
1.5	135.07	1.91	186936.00	0.19	142.40	2.01	197081.90	0.20	131.98	1.86	182665.78	0.18
1.6	142.40	2.01	197081.90	0.20	153.39	2.16	212300.76	0.21	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.7	149.73	2.11	207227.81	0.21	164.39	2.32	227519.62	0.23	151.88	2.14	210209.20	0.21
1.8	157.06	2.22	217373.71	0.22	171.72	2.42	237665.52	0.24	161.46	2.28	223470.85	0.22
1.9	168.05	2.37	232592.57	0.23	179.05	2.53	247811.42	0.25	172.52	2.43	238772.74	0.24
2	179.05	2.53	247811.42	0.25	184.92	2.61	255928.15	0.26	179.89	2.54	248974.01	0.25
2.1	190.05	2.68	263030.28	0.26	190.05	2.68	263030.28	0.26	187.26	2.64	259175.27	0.26
2.2	199.58	2.82	276219.95	0.28	201.04	2.84	278249.13	0.28	196.11	2.77	271416.79	0.27

2.3	208.37	2.94	288395.04	0.29	208.37	2.94	288395.04	0.29	205.69	2.90	284678.44	0.28
2.4	215.70	3.04	298540.94	0.30	214.24	3.02	296511.76	0.30	213.06	3.01	294879.70	0.29
2.5	223.03	3.15	308686.85	0.31	223.03	3.15	308686.85	0.31	222.64	3.14	308141.35	0.31
2.6	231.83	3.27	320861.93	0.32	230.37	3.25	318832.75	0.32	231.49	3.27	320382.86	0.32
2.7	237.70	3.35	328978.65	0.33	237.70	3.35	328978.65	0.33	242.54	3.42	335684.76	0.34
2.8	245.03	3.46	339124.56	0.34	243.56	3.44	337095.38	0.34	249.91	3.53	345886.03	0.35
2.9	256.02	3.61	354343.41	0.35	252.36	3.56	349270.46	0.35	260.97	3.68	361187.92	0.36
3	265.55	3.75	367533.09	0.37	259.69	3.66	359416.37	0.36	268.34	3.79	371389.19	0.37
3.1	270.68	3.82	374635.22	0.37	267.02	3.77	369562.27	0.37	275.71	3.89	381590.45	0.38
3.2	281.68	3.97	389854.08	0.39	278.02	3.92	384781.13	0.38	283.08	3.99	391791.72	0.39
3.3	289.01	4.08	399999.98	0.40	285.35	4.03	394927.03	0.39	290.45	4.10	401992.98	0.40
3.4					296.34	4.18	410145.89	0.41	297.82	4.20	412194.25	0.41
3.5					303.67	4.28	420291.79	0.42	308.88	4.36	427496.15	0.43
3.6									319.93	4.51	442798.04	0.44
3.7									327.30	4.62	452999.31	0.45

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.110.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 10% de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con polvo de silicio.

### 3.11.1.2 Asfalto líquido o rebajado RC-70 (curado rápido) modificado con grafito

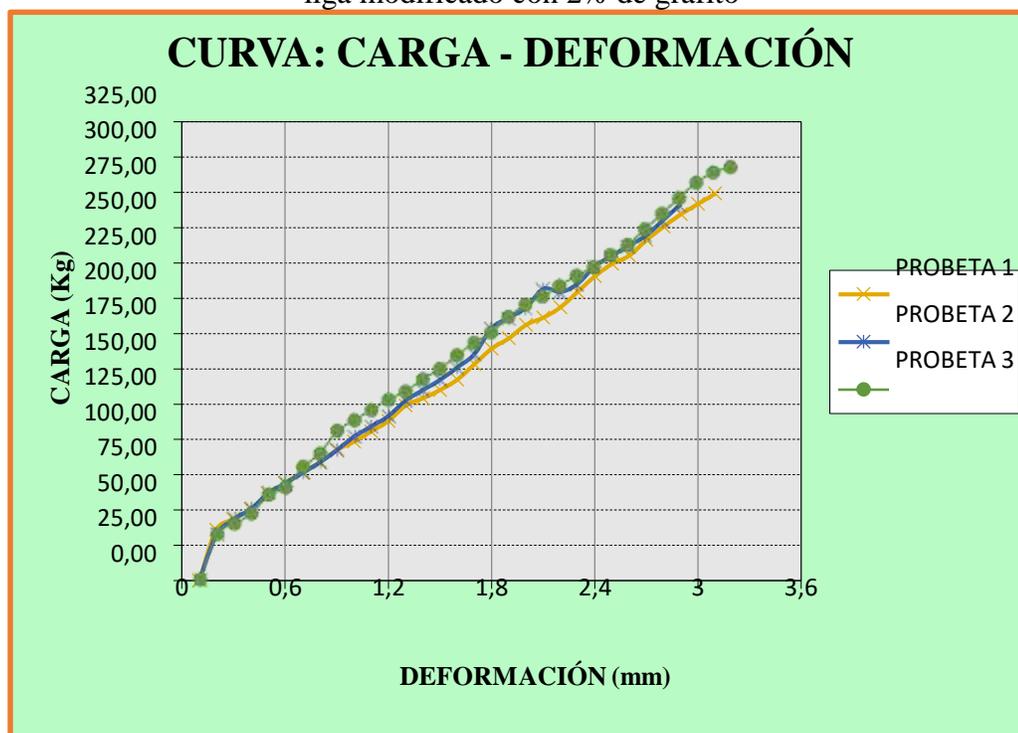
**Tabla 3.73.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 2% de grafito

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0	0.000	0.00	0.00	0	0.000
0.2	36.10	0.51	49966.3	0.050	32.44	0.46	44893.34	0.045	32.48	0.46	44948.706	0.045
0.3	43.43	0.61	60112.2	0.060	43.43	0.61	60112.2	0.060	39.85	0.56	55149.971	0.055
0.4	50.76	0.72	70258.1	0.070	50.76	0.72	70258.1	0.070	47.22	0.67	65351.236	0.065
0.5	61.76	0.87	85477	0.085	61.76	0.87	85476.96	0.085	60.49	0.85	83713.513	0.084
0.6	69.09	0.97	95622.9	0.096	69.09	0.97	95622.86	0.096	65.64	0.93	90854.399	0.091
0.7	76.42	1.08	105769	0.106	76.42	1.08	105768.8	0.106	80.39	1.13	111256.93	0.111
0.8	83.75	1.18	115915	0.116	83.75	1.18	115914.7	0.116	89.97	1.27	124518.57	0.125
0.9	92.55	1.31	128090	0.128	92.55	1.31	128089.8	0.128	106.18	1.50	146961.36	0.147
1	98.41	1.39	136206	0.136	102.08	1.44	141279.4	0.141	113.55	1.60	157162.62	0.157
1.1	105.74	1.49	146352	0.146	109.41	1.54	151425.3	0.151	120.93	1.71	167363.89	0.167
1.2	113.07	1.60	156498	0.156	116.74	1.65	161571.2	0.162	128.30	1.81	177565.15	0.178
1.3	124.07	1.75	171717	0.172	127.74	1.80	176790.1	0.177	134.19	1.89	185726.16	0.186
1.4	129.20	1.82	178819	0.179	135.07	1.91	186936	0.187	143.04	2.02	197967.68	0.198
1.5	135.07	1.91	186936	0.187	142.40	2.01	197081.9	0.197	150.41	2.12	208168.95	0.208
1.6	142.40	2.01	197082	0.197	151.19	2.13	209257	0.209	159.99	2.26	221430.59	0.221
1.7	153.39	2.16	212301	0.212	160.72	2.27	222446.7	0.222	168.83	2.38	233672.11	0.234
1.8	164.39	2.32	227520	0.228	179.05	2.53	247811.4	0.248	176.21	2.49	243873.38	0.244
1.9	171.72	2.42	237666	0.238	186.38	2.63	257957.3	0.258	187.26	2.64	259175.27	0.259

2	181.25	2.56	250855	0.251	193.71	2.73	268103.2	0.268	196.11	2.77	271416.79	0.271
2.1	186.38	2.63	257957	0.258	206.91	2.92	286365.9	0.286	202.00	2.85	279577.8	0.280
2.2	193.71	2.73	268103	0.268	204.71	2.89	283322.1	0.283	209.37	2.95	289779.07	0.290
2.3	204.71	2.89	283322	0.283	210.57	2.97	291438.8	0.291	216.74	3.06	299980.33	0.300
2.4	215.70	3.04	298541	0.299	223.03	3.15	308686.8	0.309	222.64	3.14	308141.35	0.308
2.5	224.50	3.17	310716	0.311	230.37	3.25	318832.8	0.319	231.49	3.27	320382.86	0.320
2.6	230.37	3.25	318833	0.319	237.70	3.35	328978.7	0.329	238.86	3.37	330584.13	0.331
2.7	241.36	3.41	334052	0.334	245.03	3.46	339124.6	0.339	249.91	3.53	345886.03	0.346
2.8	250.89	3.54	347241	0.347	256.02	3.61	354343.4	0.354	260.97	3.68	361187.92	0.361
2.9	259.69	3.66	359416	0.359	267.02	3.77	369562.3	0.370	272.02	3.84	376489.82	0.376
3	267.02	3.77	369562	0.370					283.08	3.99	391791.72	0.392
3.1	274.35	3.87	379708	0.380					290.45	4.10	401992.98	0.402
3.2									294.14	4.15	407093.62	0.407

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.111.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 2% de grafito



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con grafito.

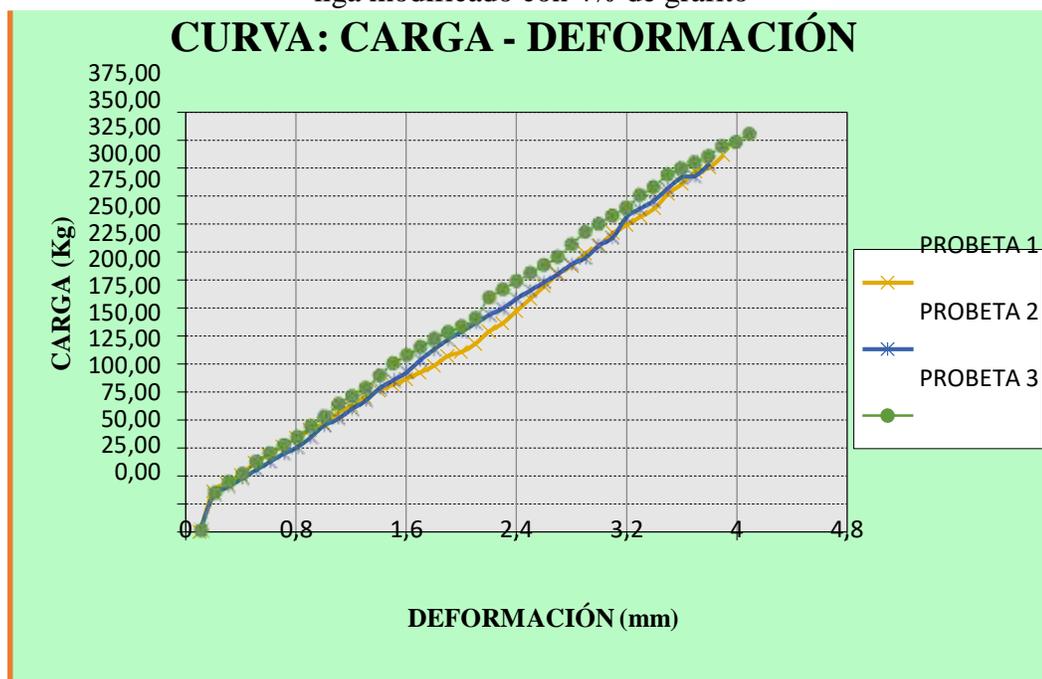
**Tabla 3.74.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 4% de grafito

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	36.10	0.51	49966.30	0.05	32.44	0.46	44893.34	0.04	33.95	0.48	46988.96	0.05
0.3	43.43	0.61	60112.20	0.06	39.77	0.56	55039.25	0.06	43.53	0.61	60250.60	0.06
0.4	50.76	0.72	70258.10	0.07	47.10	0.66	65185.15	0.07	50.90	0.72	70451.87	0.07
0.5	61.76	0.87	85476.96	0.09	54.43	0.77	75331.06	0.08	61.96	0.87	85753.77	0.09
0.6	69.09	0.97	95622.86	0.10	61.76	0.87	85476.96	0.09	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.7	76.42	1.08	105768.77	0.11	69.09	0.97	95622.86	0.10	76.70	1.08	106156.30	0.11
0.8	83.75	1.18	115914.67	0.12	74.95	1.06	103739.59	0.10	84.07	1.19	116357.56	0.12
0.9	91.08	1.29	126060.58	0.13	83.75	1.18	115914.67	0.12	93.65	1.32	129619.21	0.13
1	96.95	1.37	134177.30	0.13	94.75	1.34	131133.53	0.13	102.50	1.45	141860.72	0.14
1.1	105.74	1.49	146352.38	0.15	100.61	1.42	139250.25	0.14	113.55	1.60	157162.62	0.16
1.2	113.07	1.60	156498.29	0.16	109.41	1.54	151425.34	0.15	120.93	1.71	167363.89	0.17
1.3	120.41	1.70	166644.19	0.17	116.74	1.65	161571.24	0.16	128.30	1.81	177565.15	0.18
1.4	126.27	1.78	174760.91	0.17	127.74	1.80	176790.10	0.18	139.35	1.97	192867.05	0.19
1.5	131.40	1.85	181863.05	0.18	135.07	1.91	186936.00	0.19	150.41	2.12	208168.95	0.21
1.6	136.53	1.93	188965.18	0.19	142.40	2.01	197081.90	0.20	157.78	2.23	218370.21	0.22
1.7	142.40	2.01	197081.90	0.20	153.39	2.16	212300.76	0.21	165.15	2.33	228571.48	0.23
1.8	148.26	2.09	205198.63	0.21	162.92	2.30	225490.43	0.23	172.52	2.43	238772.74	0.24
1.9	157.06	2.22	217373.71	0.22	171.72	2.42	237665.52	0.24	178.42	2.52	246933.75	0.25

2	160.72	2.27	222446.66	0.22	179.05	2.53	247811.42	0.25	183.58	2.59	254074.64	0.25
2.1	168.05	2.37	232592.57	0.23	186.38	2.63	257957.33	0.26	190.95	2.69	264275.91	0.26
2.2	179.05	2.53	247811.42	0.25	193.71	2.73	268103.23	0.27	209.37	2.95	289779.07	0.29
2.3	186.38	2.63	257957.33	0.26	199.58	2.82	276219.95	0.28	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.4	197.38	2.78	273176.18	0.27	208.37	2.94	288395.04	0.29	224.11	3.16	310181.60	0.31
2.5	208.37	2.94	288395.04	0.29	215.70	3.04	298540.94	0.30	231.49	3.27	320382.86	0.32
2.6	219.37	3.09	303613.89	0.30	223.03	3.15	308686.85	0.31	238.86	3.37	330584.13	0.33
2.7	230.37	3.25	318832.75	0.32	230.37	3.25	318832.75	0.32	246.23	3.47	340785.39	0.34
2.8	237.70	3.35	328978.65	0.33	239.16	3.37	331007.84	0.33	257.28	3.63	356087.29	0.36
2.9	248.69	3.51	344197.51	0.34	245.03	3.46	339124.56	0.34	268.34	3.79	371389.19	0.37
3	256.02	3.61	354343.41	0.35	256.02	3.61	354343.41	0.35	275.71	3.89	381590.45	0.38
3.1	267.02	3.77	369562.27	0.37	263.35	3.72	364489.32	0.36	283.08	3.99	391791.72	0.39
3.2	274.35	3.87	379708.17	0.38	281.68	3.97	389854.08	0.39	290.45	4.10	401992.98	0.40
3.3	281.68	3.97	389854.08	0.39	289.01	4.08	399999.98	0.40	301.51	4.25	417294.88	0.42
3.4	289.01	4.08	399999.98	0.40	296.34	4.18	410145.89	0.41	308.88	4.36	427496.15	0.43
3.5	302.21	4.26	418262.61	0.42	307.34	4.34	425364.74	0.43	319.93	4.51	442798.04	0.44
3.6	311.00	4.39	430437.69	0.43	316.87	4.47	438554.42	0.44	325.83	4.60	450959.06	0.45
3.7	322.00	4.54	445656.55	0.45	318.33	4.49	440583.60	0.44	330.99	4.67	458099.94	0.46
3.8	325.66	4.59	450729.50	0.45	329.33	4.65	455802.45	0.46	336.89	4.75	466260.95	0.47
3.9	336.66	4.75	465948.36	0.47					345.73	4.88	478502.47	0.48
4									349.42	4.93	483603.10	0.48
4.1									356.79	5.03	493804.37	0.49

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.112.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 4% de grafito



Fuente: elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con grafito.

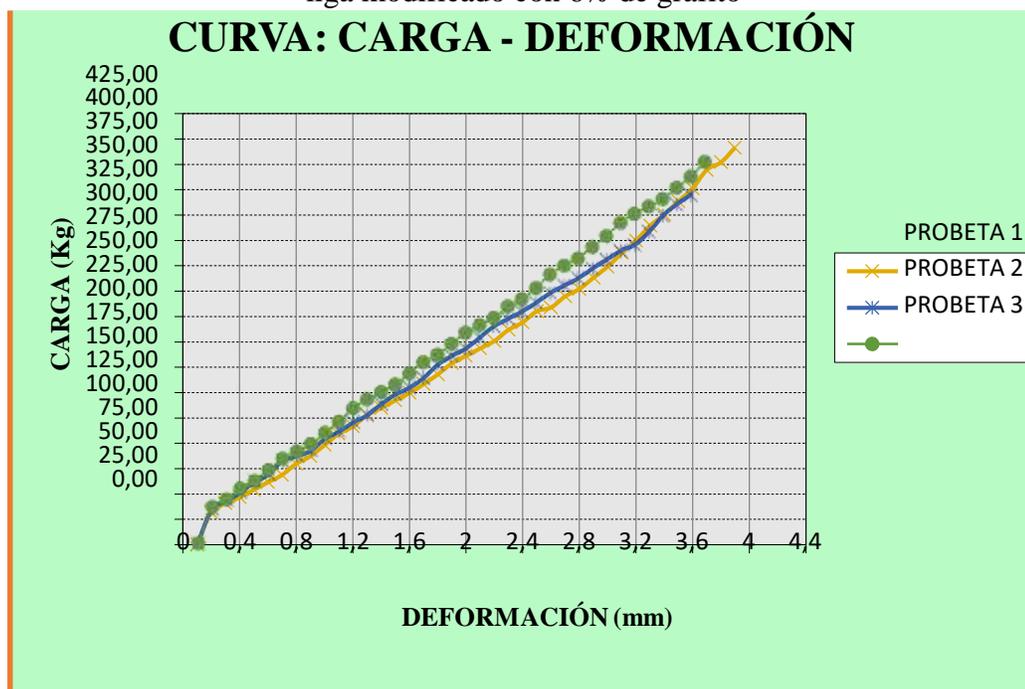
**Tabla 3.75.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 6% de grafito

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	33.90	0.48	46922.53	0.05	36.16	0.51	50049.34	0.05
0.3	41.23	0.58	57068.43	0.06	43.43	0.61	60112.20	0.06	43.53	0.61	60250.60	0.06
0.4	47.10	0.66	65185.15	0.07	50.76	0.72	70258.10	0.07	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.5	54.43	0.77	75331.06	0.08	61.76	0.87	85476.96	0.09	61.96	0.87	85753.77	0.09
0.6	61.76	0.87	85476.96	0.09	69.09	0.97	95622.86	0.10	73.02	1.03	101055.66	0.10
0.7	69.09	0.97	95622.86	0.10	82.29	1.16	113885.49	0.11	84.07	1.19	116357.56	0.12
0.8	80.09	1.13	110841.72	0.11	87.42	1.23	120987.62	0.12	91.44	1.29	126558.83	0.13

0.9	87.42	1.23	120987.62	0.12	92.55	1.31	128089.76	0.13	98.81	1.39	136760.09	0.14
1	98.41	1.39	136206.48	0.14	104.28	1.47	144323.20	0.14	109.87	1.55	152061.99	0.15
1.1	109.41	1.54	151425.34	0.15	111.61	1.57	154469.11	0.15	120.93	1.71	167363.89	0.17
1.2	116.74	1.65	161571.24	0.16	120.41	1.70	166644.19	0.17	134.19	1.89	185726.16	0.19
1.3	127.74	1.80	176790.10	0.18	127.74	1.80	176790.10	0.18	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.4	135.07	1.91	186936.00	0.19	138.73	1.96	192008.95	0.19	150.41	2.12	208168.95	0.21
1.5	142.40	2.01	197081.90	0.20	148.26	2.09	205198.63	0.21	157.78	2.23	218370.21	0.22
1.6	149.73	2.11	207227.81	0.21	154.86	2.18	214329.94	0.21	168.83	2.38	233672.11	0.23
1.7	158.52	2.24	219402.89	0.22	164.39	2.32	227519.62	0.23	179.89	2.54	248974.01	0.25
1.8	168.05	2.37	232592.57	0.23	177.58	2.51	245782.24	0.25	187.26	2.64	259175.27	0.26
1.9	179.05	2.53	247811.42	0.25	186.38	2.63	257957.33	0.26	198.32	2.80	274477.17	0.27
2	186.38	2.63	257957.33	0.26	193.71	2.73	268103.23	0.27	209.37	2.95	289779.07	0.29
2.1	193.71	2.73	268103.23	0.27	204.71	2.89	283322.09	0.28	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.2	201.04	2.84	278249.13	0.28	215.70	3.04	298540.94	0.30	224.11	3.16	310181.60	0.31
2.3	212.04	2.99	293467.99	0.29	223.03	3.15	308686.85	0.31	235.17	3.32	325483.50	0.33
2.4	219.37	3.09	303613.89	0.30	230.37	3.25	318832.75	0.32	242.54	3.42	335684.76	0.34
2.5	230.37	3.25	318832.75	0.32	239.16	3.37	331007.84	0.33	253.60	3.58	350986.66	0.35
2.6	234.03	3.30	323905.70	0.32	248.69	3.51	344197.51	0.34	266.86	3.77	369348.94	0.37
2.7	245.03	3.46	339124.56	0.34	256.02	3.61	354343.41	0.35	275.71	3.89	381590.45	0.38
2.8	252.36	3.56	349270.46	0.35	263.35	3.72	364489.32	0.36	283.08	3.99	391791.72	0.39
2.9	263.35	3.72	364489.32	0.36	272.88	3.85	377678.99	0.38	294.14	4.15	407093.62	0.41
3	274.35	3.87	379708.17	0.38	281.68	3.97	389854.08	0.39	305.19	4.31	422395.51	0.42
3.1	287.55	4.06	397970.80	0.40	290.48	4.10	402029.16	0.40	318.46	4.49	440757.79	0.44
3.2	300.01	4.23	415218.84	0.42	296.34	4.18	410145.89	0.41	327.30	4.62	452999.31	0.45
3.3	314.67	4.44	435510.65	0.44	309.54	4.37	428408.51	0.43	334.68	4.72	463200.57	0.46
3.4	325.66	4.59	450729.50	0.45	325.66	4.59	450729.50	0.45	342.05	4.83	473401.84	0.47
3.5	338.86	4.78	468992.13	0.47	336.66	4.75	465948.36	0.47	353.10	4.98	488703.74	0.49
3.6	351.32	4.96	486240.17	0.49	346.19	4.88	479138.03	0.48	364.16	5.14	504005.64	0.50
3.7	369.65	5.22	511604.93	0.51					378.90	5.35	524408.17	0.52
3.8	376.98	5.32	521750.83	0.52								
3.9	391.64	5.53	542042.64	0.54								

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.113.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 6% de grafito



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con grafito.

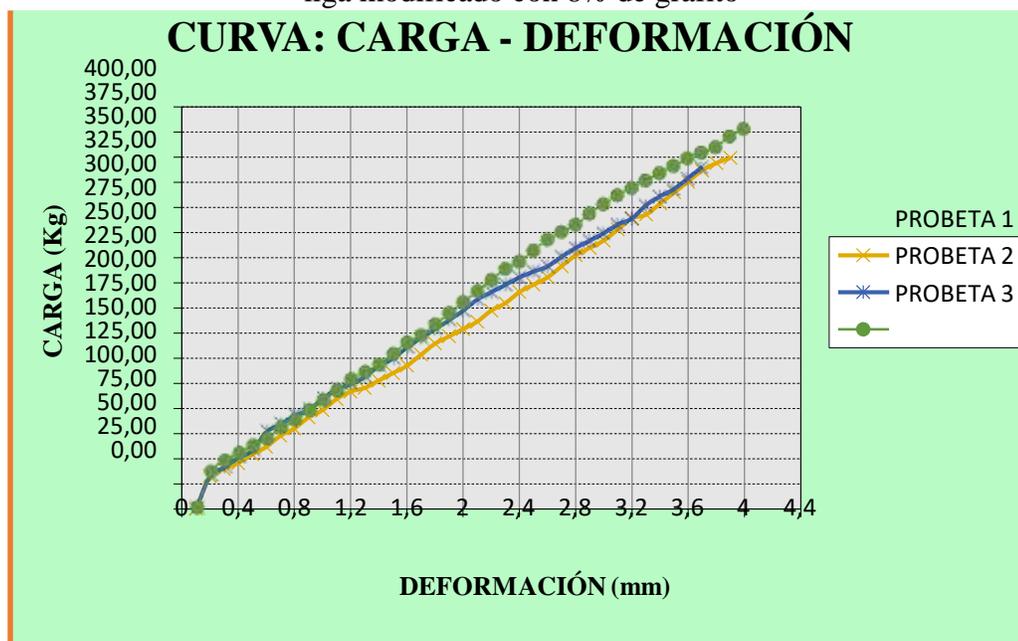
**Tabla 3.76.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 8% de grafito

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	32.44	0.46	44893.34	0.04	36.16	0.51	50049.34	0.05
0.3	39.77	0.56	55039.25	0.06	41.23	0.58	57068.43	0.06	47.22	0.67	65351.24	0.07
0.4	45.63	0.64	63155.97	0.06	50.76	0.72	70258.10	0.07	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.5	54.43	0.77	75331.06	0.08	58.09	0.82	80404.01	0.08	61.96	0.87	85753.77	0.09
0.6	61.76	0.87	85476.96	0.09	76.42	1.08	105768.77	0.11	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.7	72.76	1.03	100695.82	0.10	83.75	1.18	115914.67	0.12	80.39	1.13	111256.93	0.11
0.8	80.09	1.13	110841.72	0.11	92.55	1.31	128089.76	0.13	87.76	1.24	121458.19	0.12

0.9	91.08	1.29	126060.58	0.13	98.41	1.39	136206.48	0.14	97.34	1.37	134719.84	0.13
1	98.41	1.39	136206.48	0.14	109.41	1.54	151425.34	0.15	107.66	1.52	149001.61	0.15
1.1	109.41	1.54	151425.34	0.15	118.94	1.68	164615.01	0.16	117.24	1.65	162263.25	0.16
1.2	116.74	1.65	161571.24	0.16	124.07	1.75	171717.14	0.17	128.30	1.81	177565.15	0.18
1.3	120.41	1.70	166644.19	0.17	131.40	1.85	181863.05	0.18	135.67	1.91	187766.42	0.19
1.4	127.74	1.80	176790.10	0.18	142.40	2.01	197081.90	0.20	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.5	135.07	1.91	186936.00	0.19	149.73	2.11	207227.81	0.21	154.09	2.17	213269.58	0.21
1.6	142.40	2.01	197081.90	0.20	160.72	2.27	222446.66	0.22	165.15	2.33	228571.48	0.23
1.7	153.39	2.16	212300.76	0.21	170.25	2.40	235636.34	0.24	172.52	2.43	238772.74	0.24
1.8	164.39	2.32	227519.62	0.23	179.05	2.53	247811.42	0.25	183.58	2.59	254074.64	0.25
1.9	171.72	2.42	237665.52	0.24	187.85	2.65	259986.51	0.26	194.63	2.75	269376.54	0.27
2	179.05	2.53	247811.42	0.25	197.38	2.78	273176.18	0.27	205.69	2.90	284678.44	0.28
2.1	186.38	2.63	257957.33	0.26	208.37	2.94	288395.04	0.29	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.2	197.38	2.78	273176.18	0.27	215.70	3.04	298540.94	0.30	227.80	3.21	315282.23	0.32
2.3	204.71	2.89	283322.09	0.28	223.03	3.15	308686.85	0.31	238.86	3.37	330584.13	0.33
2.4	215.70	3.04	298540.94	0.30	230.37	3.25	318832.75	0.32	246.23	3.47	340785.39	0.34
2.5	223.03	3.15	308686.85	0.31	236.23	3.33	326949.47	0.33	257.28	3.63	356087.29	0.36
2.6	230.37	3.25	318832.75	0.32	241.36	3.41	334051.61	0.33	268.34	3.79	371389.19	0.37
2.7	241.36	3.41	334051.61	0.33	250.89	3.54	347241.28	0.35	275.71	3.89	381590.45	0.38
2.8	252.36	3.56	349270.46	0.35	259.69	3.66	359416.37	0.36	283.08	3.99	391791.72	0.39
2.9	259.69	3.66	359416.37	0.36	267.02	3.77	369562.27	0.37	294.14	4.15	407093.62	0.41
3	267.02	3.77	369562.27	0.37	274.35	3.87	379708.17	0.38	303.72	4.28	420355.26	0.42
3.1	278.02	3.92	384781.13	0.38	283.15	3.99	391883.26	0.39	312.56	4.41	432596.78	0.43
3.2	289.01	4.08	399999.98	0.40	289.01	4.08	399999.98	0.40	319.93	4.51	442798.04	0.44
3.3	292.68	4.13	405072.93	0.41	302.21	4.26	418262.61	0.42	327.30	4.62	452999.31	0.45
3.4	303.67	4.28	420291.79	0.42	311.00	4.39	430437.69	0.43	334.68	4.72	463200.57	0.46
3.5	314.67	4.44	435510.65	0.44	318.33	4.49	440583.60	0.44	342.05	4.83	473401.84	0.47
3.6	325.66	4.59	450729.50	0.45	329.33	4.65	455802.45	0.46	349.42	4.93	483603.10	0.48
3.7	336.66	4.75	465948.36	0.47	340.33	4.80	471021.31	0.47	355.31	5.01	491764.12	0.49
3.8	343.99	4.85	476094.26	0.48					360.47	5.09	498905.00	0.50
3.9	349.12	4.93	483196.39	0.48					371.53	5.24	514206.90	0.51
4									378.90	5.35	524408.17	0.52

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.114.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga modificado con 8% de grafito



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga modificado con grafito.

**Tabla 3.77.** Resultados de cargas de rotura y esfuerzos cortantes máximos de probetas ligadas con riego de liga modificado con 10% de grafito

Penetración	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
mm	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	36.10	0.51	49966.30	0.05	32.44	0.46	44893.34	0.04	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	43.43	0.61	60112.20	0.06	39.77	0.56	55039.25	0.06	39.85	0.56	55149.97	0.06
0.4	49.30	0.70	68228.92	0.07	50.76	0.72	70258.10	0.07	47.22	0.67	65351.24	0.07
0.5	58.09	0.82	80404.01	0.08	61.76	0.87	85476.96	0.09	58.27	0.82	80653.13	0.08
0.6	69.09	0.97	95622.86	0.10	72.76	1.03	100695.82	0.10	65.64	0.93	90854.40	0.09
0.7	76.42	1.08	105768.77	0.11	83.75	1.18	115914.67	0.12	71.54	1.01	99015.41	0.10
0.8	83.75	1.18	115914.67	0.12	91.08	1.29	126060.58	0.13	80.39	1.13	111256.93	0.11

0.9	94.75	1.34	131133.53	0.13	98.41	1.39	136206.48	0.14	91.44	1.29	126558.83	0.13
1	102.08	1.44	141279.43	0.14	109.41	1.54	151425.34	0.15	98.81	1.39	136760.09	0.14
1.1	111.61	1.57	154469.11	0.15	115.27	1.63	159542.06	0.16	106.18	1.50	146961.36	0.15
1.2	120.41	1.70	166644.19	0.17	124.07	1.75	171717.14	0.17	113.55	1.60	157162.62	0.16
1.3	127.74	1.80	176790.10	0.18	135.07	1.91	186936.00	0.19	124.61	1.76	172464.52	0.17
1.4	135.07	1.91	186936.00	0.19	142.40	2.01	197081.90	0.20	130.51	1.84	180625.53	0.18
1.5	143.86	2.03	199111.08	0.20	153.39	2.16	212300.76	0.21	135.67	1.91	187766.42	0.19
1.6	149.73	2.11	207227.81	0.21	164.39	2.32	227519.62	0.23	143.04	2.02	197967.68	0.20
1.7	157.06	2.22	217373.71	0.22	171.72	2.42	237665.52	0.24	156.30	2.21	216329.96	0.22
1.8	164.39	2.32	227519.62	0.23	182.72	2.58	252884.38	0.25	165.15	2.33	228571.48	0.23
1.9	175.39	2.47	242738.47	0.24	192.25	2.71	266074.05	0.27	172.52	2.43	238772.74	0.24
2	184.92	2.61	255928.15	0.26	201.04	2.84	278249.13	0.28	183.58	2.59	254074.64	0.25
2.1	193.71	2.73	268103.23	0.27	208.37	2.94	288395.04	0.29	187.26	2.64	259175.27	0.26
2.2	201.04	2.84	278249.13	0.28	215.70	3.04	298540.94	0.30	196.11	2.77	271416.79	0.27
2.3	208.37	2.94	288395.04	0.29	223.03	3.15	308686.85	0.31	209.37	2.95	289779.07	0.29
2.4	219.37	3.09	303613.89	0.30	231.83	3.27	320861.93	0.32	216.74	3.06	299980.33	0.30
2.5	226.70	3.20	313759.80	0.31	247.23	3.49	342168.33	0.34	224.11	3.16	310181.60	0.31
2.6	237.70	3.35	328978.65	0.33	252.36	3.56	349270.46	0.35	235.17	3.32	325483.50	0.33
2.7	245.03	3.46	339124.56	0.34	259.69	3.66	359416.37	0.36	246.23	3.47	340785.39	0.34
2.8	252.36	3.56	349270.46	0.35	267.02	3.77	369562.27	0.37	255.81	3.61	354047.04	0.35
2.9	263.35	3.72	364489.32	0.36	274.35	3.87	379708.17	0.38	264.65	3.73	366288.56	0.37
3	274.35	3.87	379708.17	0.38	280.21	3.95	387824.90	0.39	268.34	3.79	371389.19	0.37
3.1	281.68	3.97	389854.08	0.39	285.35	4.03	394927.03	0.39	275.71	3.89	381590.45	0.38
3.2	292.68	4.13	405072.93	0.41	291.21	4.11	403043.75	0.40	283.08	3.99	391791.72	0.39
3.3	300.01	4.23	415218.84	0.42	296.34	4.18	410145.89	0.41	296.35	4.18	410154.00	0.41
3.4	311.00	4.39	430437.69	0.43	303.67	4.28	420291.79	0.42	305.19	4.31	422395.51	0.42
3.5	318.33	4.49	440583.60	0.44	311.00	4.39	430437.69	0.43				
3.6					318.33	4.49	440583.60	0.44				
3.7					333.00	4.70	460875.41	0.46				

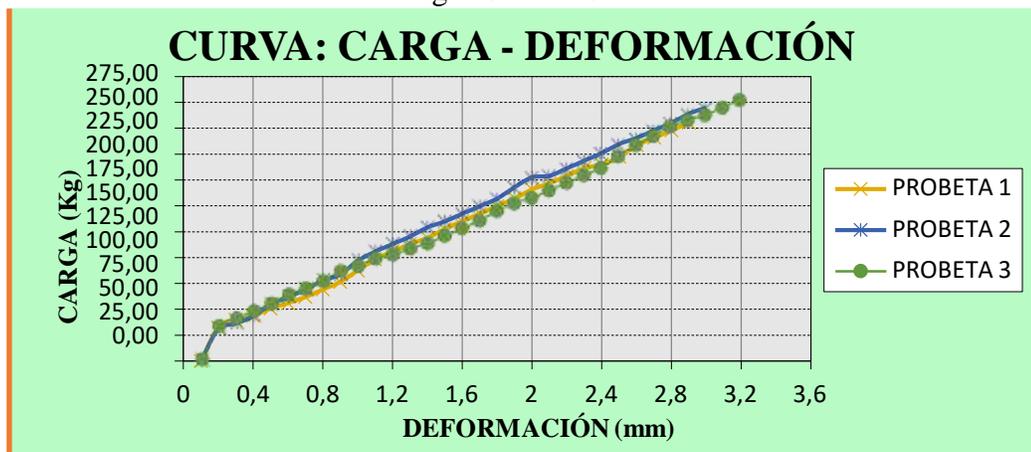
Fuente: Elaboración propia



0.2	32.44	0.46	44893.34	0.04	30.97	0.44	42864.16	0.04	32.48	0.46	44948.71	0.04
0.3	39.77	0.56	55039.25	0.06	36.10	0.51	49966.30	0.05	39.85	0.56	55149.97	0.06
0.4	43.43	0.61	60112.20	0.06	43.43	0.61	60112.20	0.06	47.22	0.67	65351.24	0.07
0.5	50.76	0.72	70258.10	0.07	54.43	0.77	75331.06	0.08	54.59	0.77	75552.50	0.08
0.6	55.89	0.79	77360.24	0.08	61.76	0.87	85476.96	0.09	63.43	0.89	87794.02	0.09
0.7	61.76	0.87	85476.96	0.09	69.09	0.97	95622.86	0.10	69.33	0.98	95955.03	0.10
0.8	69.09	0.97	95622.86	0.10	77.89	1.10	107797.95	0.11	76.70	1.08	106156.30	0.11
0.9	76.42	1.08	105768.77	0.11	83.75	1.18	115914.67	0.12	86.28	1.22	119417.94	0.12
1	87.42	1.23	120987.62	0.12	96.95	1.37	134177.30	0.13	91.44	1.29	126558.83	0.13
1.1	98.41	1.39	136206.48	0.14	105.74	1.49	146352.38	0.15	98.81	1.39	136760.09	0.14
1.2	105.74	1.49	146352.38	0.15	113.07	1.60	156498.29	0.16	102.50	1.45	141860.72	0.14
1.3	113.07	1.60	156498.29	0.16	120.41	1.70	166644.19	0.17	108.39	1.53	150021.74	0.15
1.4	118.94	1.68	164615.01	0.16	129.20	1.82	178819.28	0.18	113.55	1.60	157162.62	0.16
1.5	127.74	1.80	176790.10	0.18	135.07	1.91	186936.00	0.19	120.93	1.71	167363.89	0.17
1.6	135.07	1.91	186936.00	0.19	142.40	2.01	197081.90	0.20	128.30	1.81	177565.15	0.18
1.7	142.40	2.01	197081.90	0.20	149.73	2.11	207227.81	0.21	135.67	1.91	187766.42	0.19
1.8	149.73	2.11	207227.81	0.21	157.06	2.22	217373.71	0.22	145.25	2.05	201028.06	0.20
1.9	157.06	2.22	217373.71	0.22	168.05	2.37	232592.57	0.23	152.62	2.15	211229.33	0.21
2	165.86	2.34	229548.80	0.23	177.58	2.51	245782.24	0.25	157.78	2.23	218370.21	0.22
2.1	171.72	2.42	237665.52	0.24	179.05	2.53	247811.42	0.25	165.15	2.33	228571.48	0.23
2.2	179.05	2.53	247811.42	0.25	186.38	2.63	257957.33	0.26	172.52	2.43	238772.74	0.24
2.3	186.38	2.63	257957.33	0.26	193.71	2.73	268103.23	0.27	179.89	2.54	248974.01	0.25
2.4	190.05	2.68	263030.28	0.26	201.04	2.84	278249.13	0.28	187.26	2.64	259175.27	0.26
2.5	197.38	2.78	273176.18	0.27	209.84	2.96	290424.22	0.29	198.32	2.80	274477.17	0.27
2.6	208.37	2.94	288395.04	0.29	215.70	3.04	298540.94	0.30	209.37	2.95	289779.07	0.29
2.7	215.70	3.04	298540.94	0.30	223.03	3.15	308686.85	0.31	218.22	3.08	302020.59	0.30
2.8	223.03	3.15	308686.85	0.31	230.37	3.25	318832.75	0.32	227.80	3.21	315282.23	0.32
2.9	230.37	3.25	318832.75	0.32	239.16	3.37	331007.84	0.33	233.70	3.30	323443.24	0.32
3					245.03	3.46	339124.56	0.34	238.86	3.37	330584.13	0.33
3.1									246.23	3.47	340785.39	0.34
3.2									253.60	3.58	350986.66	0.35

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.116.** Resultados de cargas de rotura en cada probeta ligadas con riego de liga convencional



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar los resultados carga de rotura (resistencia al corte), obtenidos en las 3 probetas sometidas a corte, adheridas con riego de liga convencional.

#### 3.11.1.4 Resultados de adherencia para diferentes dotaciones de polvo de silicio al riego de liga de curado rápido RC-70

Se trabajó con 5 porcentajes de polvo de silicio que fueron mezclados con el riego de liga convencional con efecto de mejorar las propiedades de adherencia y por consecuencia de durabilidad, el cálculo se lo hizo de acuerdo a la dotación elegida por área de cubrimiento.

Los resultados que se obtuvieron serán descritos a continuación:

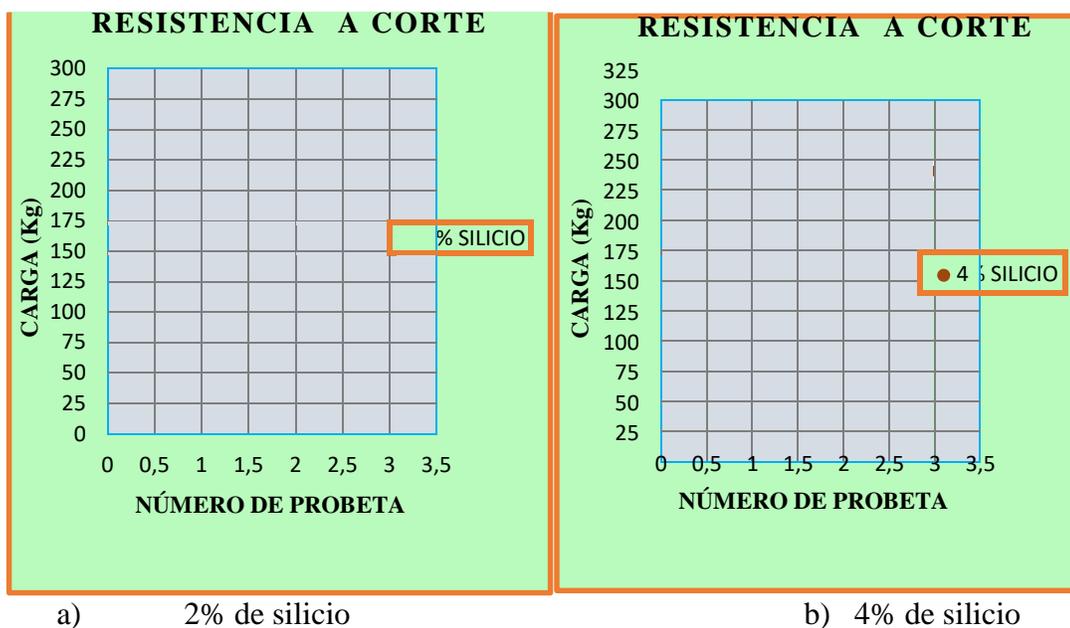
**Tabla 3.79.** Resultados de adherencia de probetas ligadas con riego de liga con 5 porcentajes de silicio

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes)								
Tasa de polvo de silicio	Briqueta	Peso Probeta	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo	Promedio
%	N°	gr	kg	N	KN	mm	Mpa	Mpa
2	P1	3286.40	256.02	2511.56	2.51	2.70	0.35	0.34

2	P2	3271.60	219.37	2152.02	2.15	2.50	0.30	
2	P3	3284.10	264.65	2596.22	2.60	2.90	0.36	
4	P1	3294.10	292.18	2866.29	2.87	3.30	0.40	0.39
4	P2	3283.40	305.14	2993.42	2.99	3.60	0.42	
4	P3	3267.80	268.34	2632.42	2.63	3.00	0.37	
6	P1	3317.20	336.66	3302.63	3.30	3.50	0.46	0.48
6	P2	3332.50	371.12	3640.69	3.64	3.90	0.51	
6	P3	3298.12	349.42	3427.81	3.43	3.70	0.48	
8	P1	3285.90	354.99	3482.45	3.48	4.00	0.49	0.48
8	P2	3302.60	340.33	3338.64	3.34	3.70	0.47	
8	P3	3297.50	349.42	3427.81	3.43	3.90	0.48	
10	P1	3265.40	289.01	2835.19	2.84	3.30	0.40	0.42
10	P2	3545.60	303.67	2979.00	2.98	3.50	0.42	
10	P3	3354.50	327.30	3210.81	3.21	3.90	0.45	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.117.** Resultados de adherencia con 2% y 4% de silicio



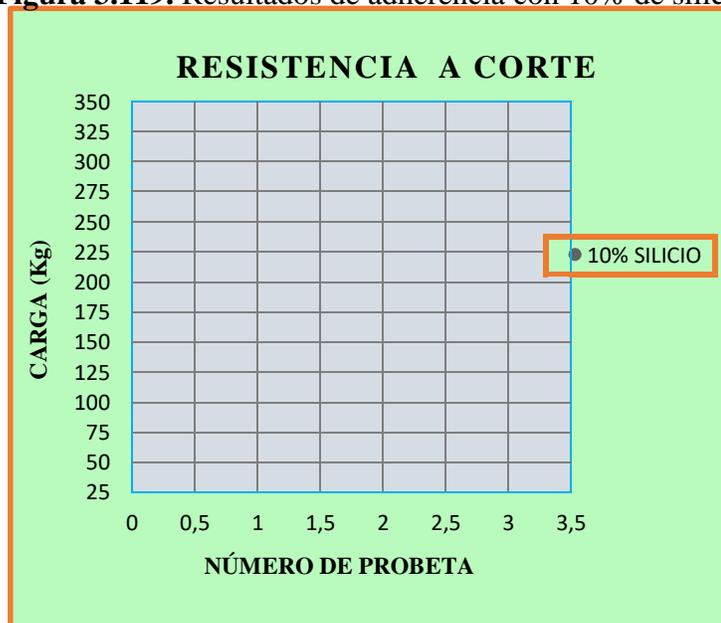
Fuente: elaboración propia

**Figura 3.118.** Resultados de adherencia con 6% y 8% de silicio



Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.119.** Resultados de adherencia con 10% de silicio



Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.120.** Resultados de adherencia con los 5 porcentajes de silicio



Fuente: elaboracion propia

### 3.11.1.5 Resultados de adherencia para diferentes dotaciones de grafito al riego de liga de curado rápido RC-70

Se trabajó con 5 porcentajes de grafito que fueron mezclados con el riego de liga convencional con efecto de mejorar las propiedades de adherencia y por consecuencia de durabilidad, el cálculo se lo hizo de acuerdo a la dotación elegida por área.

Los resultados que se obtuvieron serán descritos a continuación:

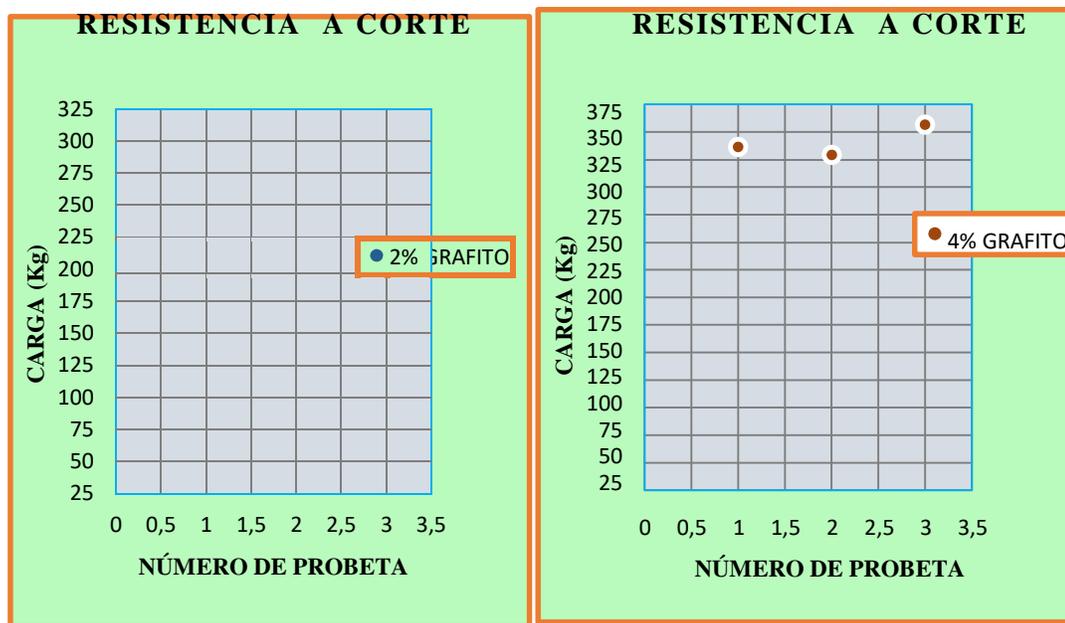
**Tabla 3.80.** Resultados de adherencia de probetas ligadas con riego de liga con 5 porcentajes de grafito

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes)								
Tasa de polvo de grafito	Briqueta	Peso probeta	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo	Promedio
%	N°	gr	kg	N	KN	mm	Mpa	Mpa
2	P1	3250.80	274.35	2691.37	2.69	3.1	0.38	0.38
2	P2	3227.50	267.03	2619.56	2.62	2.90	0.37	

2	P3	3248.60	294.14	2885.51	2.89	3.20	0.40	
4	P1	3258.90	336.66	3302.63	3.30	3.90	0.46	0.47
4	P2	3275.30	329.33	3230.73	3.23	3.80	0.45	
4	P3	3277.10	356.79	3500.11	3.50	4.10	0.49	
6	P1	3257.70	391.64	3841.99	3.84	3.90	0.54	0.51
6	P2	3296.80	346.19	3396.12	3.40	3.60	0.47	
6	P3	3264.60	378.90	3717.01	3.72	3.70	0.52	
8	P1	3262.30	349.12	3424.87	3.42	3.90	0.48	0.49
8	P2	3280.00	340.33	3338.64	3.34	3.70	0.47	
8	P3	3298.50	375.21	3680.81	3.68	4.00	0.51	
10	P1	3271.60	318.33	3122.82	3.12	3.50	0.44	0.44
10	P2	3268.70	333.00	3266.73	3.27	3.70	0.46	
10	P3	3283.50	305.19	2993.91	2.99	3.40	0.42	

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.121.** Resultados de adherencia con 2% y 4% de grafito

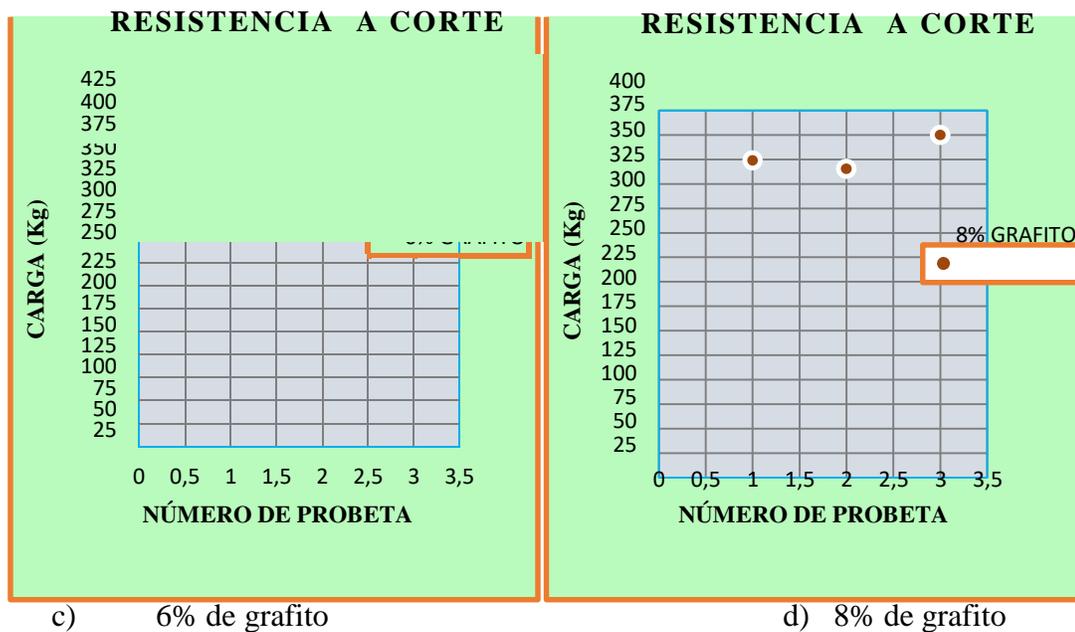


a) 2% de grafito

b) 4% de grafito

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.122.** Resultados de adherencia con 6% y 8% de grafito



Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.123.** Resultados de adherencia con 10% de grafito



Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.124.** Resultados de adherencia con los 5 porcentajes de grafito

Fuente: elaboracion propia

**3.11.1.6 Determinación del mejor porcentaje de adición de polvo de silicio**

Para la determinación del mejor porcentaje de adición de polvo de silicio se tomó en cuenta la resistencia de cada probeta sometida a esfuerzo de corte para determinar la adherencia entre las capas a diferentes porcentajes.

**Tabla 3.81.** Resultados de promedio de adherencia de probetas con polvo de silicio

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes)								
Tasa de polvo de silicio	Briqueta	Peso probeta	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo	Promedio
%	N°	gr	kg	N	KN	mm	Mpa	Kg
2	P1	3286.40	246.68	2419.93	2.42	2.70	0.34	246.68
4	P2	3271.60	288.55	2830.68	2.83	2.50	0.39	288.55
6	P3	3284.10	352.40	3457.04	3.46	2.90	0.48	352.40
8	P1	3294.10	348.25	3416.33	3.42	3.30	0.48	348.25
10	P2	3283.40	306.66	3008.33	3.01	3.60	0.42	306.66

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.125.** Resultados de contenido óptimo con los 5 porcentajes de silicio

Mediante la ecuación de la gráfica se determinó que el porcentaje que genera mayor adherencia es de 7% con una resistencia de 360.8 kg.

### 3.11.1.7 Determinación de mejor porcentaje de adición de grafito

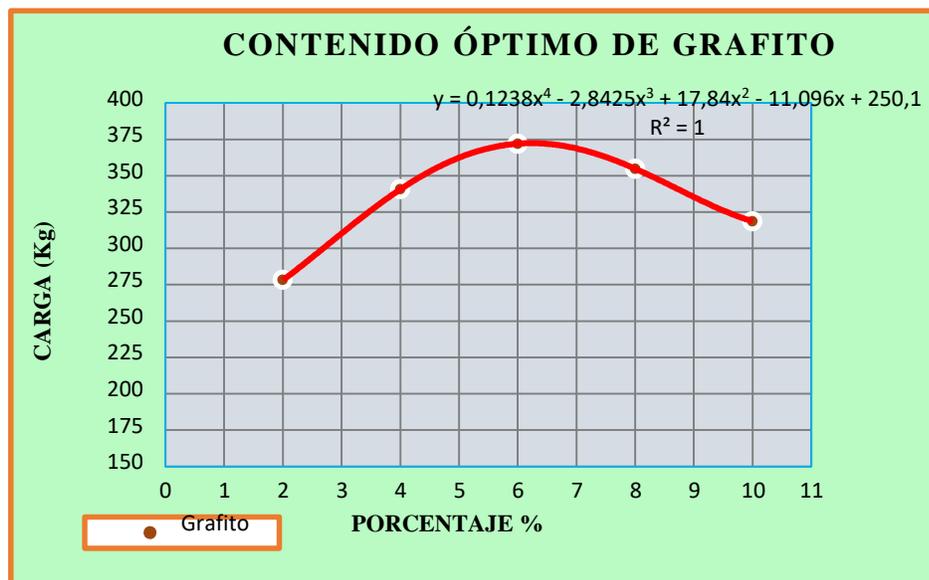
Para la determinación del mejor porcentaje de adición de polvo de silicio se tomó en cuenta la resistencia de cada probeta sometida a esfuerzo de corte para determinar la adherencia entre las capas a diferentes porcentajes.

**Tabla 3.82.** Resultados de promedio de adherencia de probetas con grafito

Resultados de (carga, deformación y esfuerzos cortantes)								
Tasa de polvo de silicio	Briqueta	Peso probeta	Carga de rotura			Deformación	Esfuerzo cortante máximo	Promedio
%	N°	gr	kg	N	KN	mm	Mpa	Kg
2	P1	3242.30	278.50	2732.15	2.73	2.70	0.38	278.50
4	P2	3270.43	340.92	3344.49	3.34	2.50	0.47	340.92
6	P3	3273.03	372.24	3651.70	3.65	2.90	0.51	372.24
8	P1	3280.26	354.88	3481.44	3.48	3.30	0.49	354.88
10	P2	3274.60	318.84	3127.82	3.13	3.60	0.44	318.84

Fuente: elaboración propia

**Figura 3.126.** Resultados de contenido óptimo con los 5 porcentajes de grafito

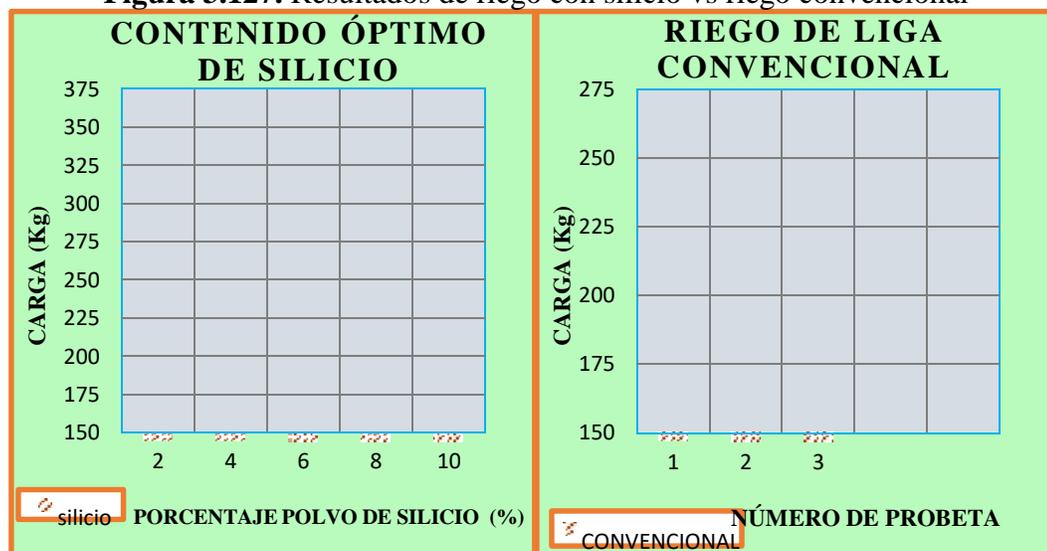


Fuente: elaboracion propia

Mediante la ecuación de la gráfica se determinó que el porcentaje que genera mayor adherencia es de 6% con una resistencia de 374 kg.

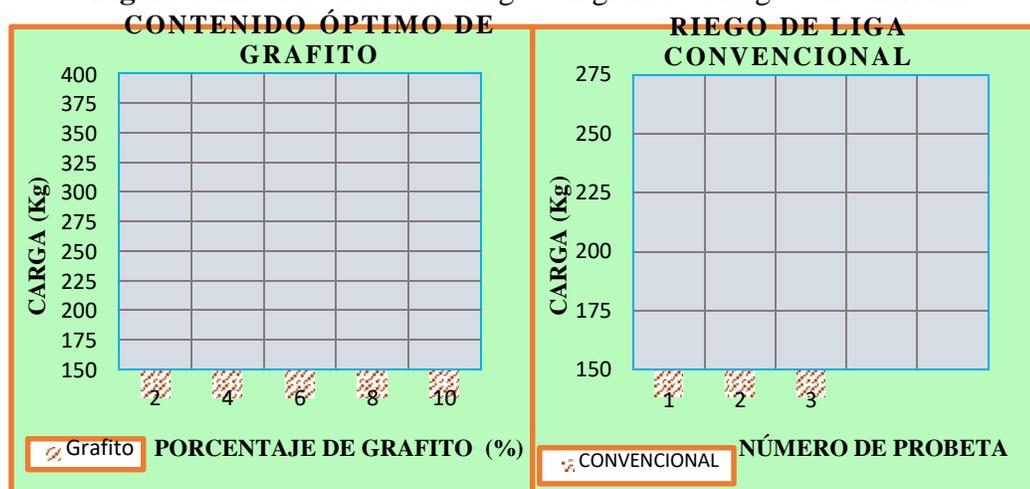
### 3.11.1.8 Comparación de adherencia entre riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito y el riego de liga convencional

**Figura 3.127.** Resultados de riego con silicio vs riego convencional



Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.128.** Resultados de riego con grafito vs riego convencional



Fuente: elaboracion propia

Mediante las gráficas se puede observar la mejora en la resistencia a corte (adherencia) que existe entre el riego de liga modificado y el riego de liga convencional.

### 3.11.2 Ensayo a compresión de las probetas

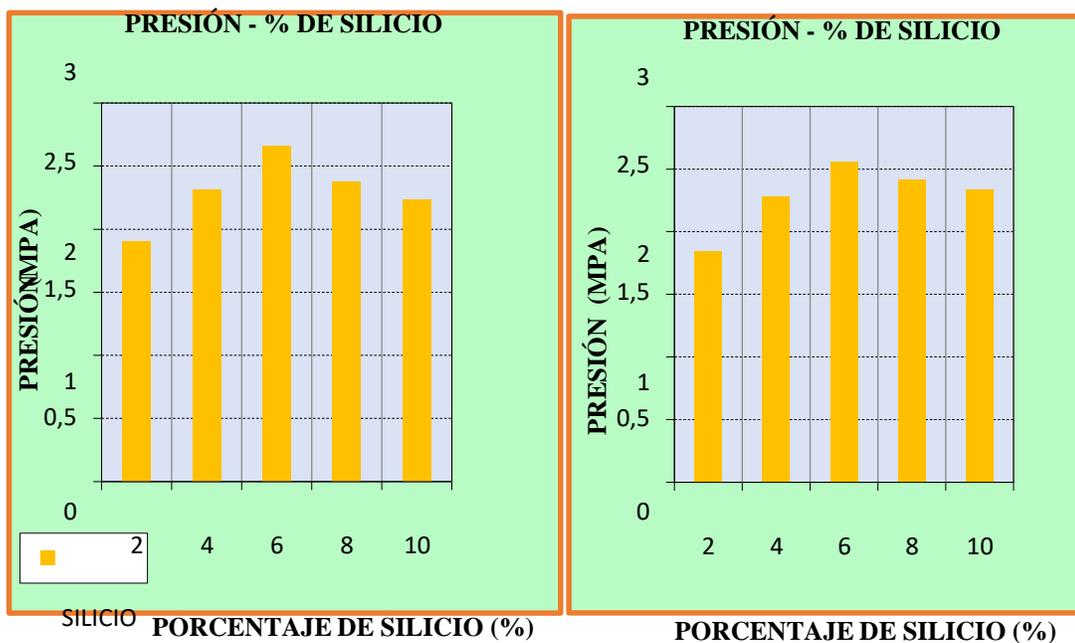
Este ensayo se lo hizo con el fin de evaluar como es el comportamiento de la capa base unidad por un riego de liga de curado rápido modificado con polvo de silicio y grafito con la capa de rodadura flexible y ver si la mejora de la adherencia hace que las dos capas trabajen mejor en conjunto ante la aplicación de una carga.

#### 3.11.2.1 Ensayo a compresión de las probetas con riego de liga modificado con silicio

**Tabla 3.83.** Resultados de carga con la prensa de probetas con silicio

Porcentaje de silicio	Probeta n° 1				Probeta n° 2			
	Presión de ensayo				Presión ensayo			
	Kg	Kg/cm2	KN/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
2	1372.80	19.368	1900.00	1.9	1336.68	18.858	1850.00	1.85
4	1669.04	23.547	2310.00	2.31	1647.36	23.242	2280.00	2.28
6	1921.92	27.115	2660.00	2.66	1849.67	26.096	2560.00	2.56
8	1719.62	24.261	2380.00	2.38	1748.52	24.669	2420.00	2.42
10	1611.24	22.732	2230.00	2.23	1690.72	23.853	2340.00	2.34

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.129.** Diagrama d resistencia a compresión de riego con silicio

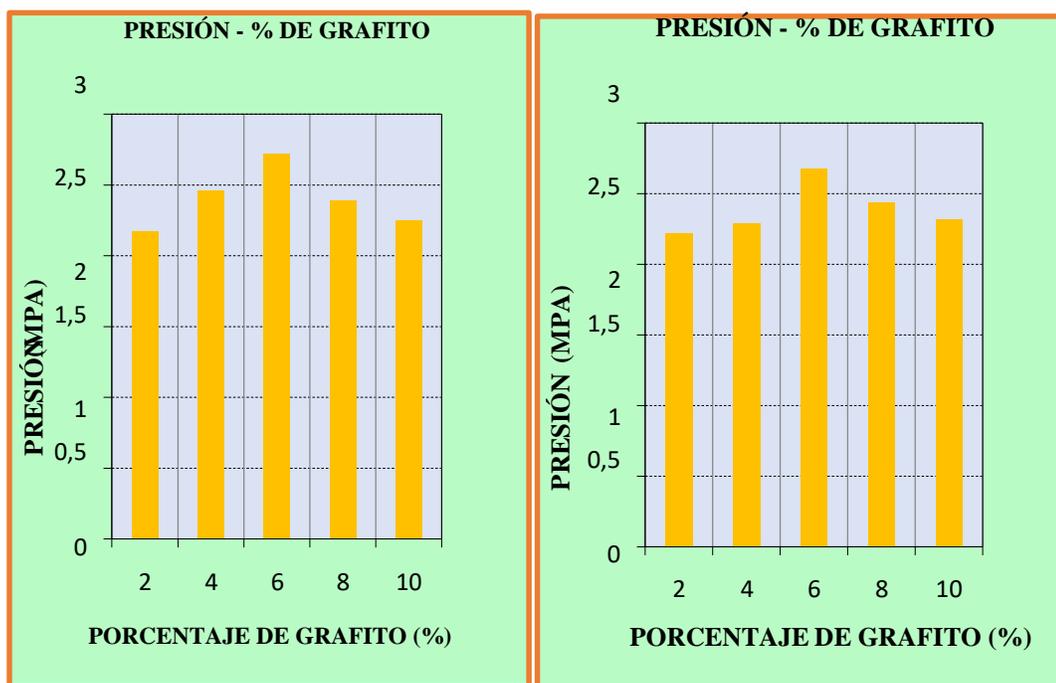
Fuente: elaboracion propia

### 3.11.2.2 Ensayo a compresión de las probetas con riego de liga modificado con grafito

**Tabla 3.84.** Resultados de carga con la prensa de probetas con grafito

Porcentaje de grafito	Probeta n° 1				Probeta n° 2			
	Presión de ensayo				Presión ensayo			
%	Kg	Kg/cm2	KN/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
2	1567.89	22.120	2170.00	2.17	1604.01	22.630	2220.00	2.22
4	1777.42	25.076	2460.00	2.46	1654.59	23.344	2290.00	2.29
6	1965.28	27.727	2720.00	2.72	1936.38	27.319	2680.00	2.68
8	1726.84	24.363	2390.00	2.39	1762.97	24.873	2440.00	2.44
10	1625.69	22.936	2250.00	2.25	1676.27	23.649	2320.00	2.32

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.130.** Diagrama de resistencia a compresión de riego con grafito

Fuente: elaboracion propia

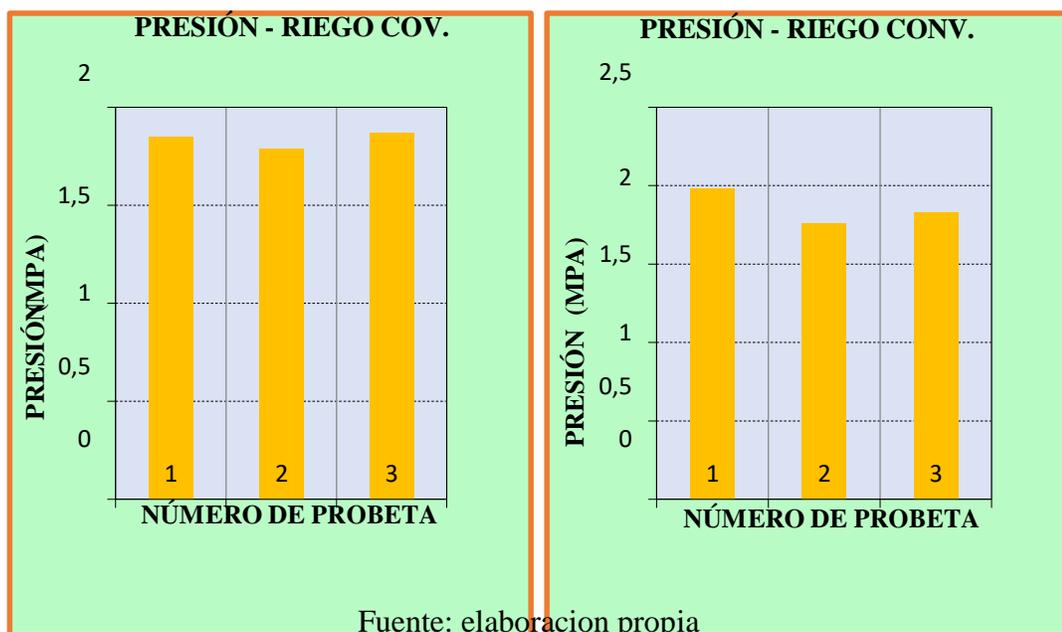
### 3.11.2.3 Ensayo a compresión de las probetas con riego de liga convencional

**Tabla 3.85.** Resultados de carga con la prensa de probetas con riego convencional

Porcentaje de grafito	Probeta n° 1				Probeta n° 2			
	Presión de ensayo				Presión ensayo			
%	Kg	Kg/cm2	KN/m2	Mpa	Kg	Kg/cm2	N/m2	Mpa
1	1430.61	20.183	1980.00	1.98	1336.68	18.858	1850.00	1.85
2	1271.65	17.941	1760.00	1.76	1293.33	18.247	1790.00	1.79
3	1322.23	18.654	1830.00	1.83	1351.13	19.062	1870.00	1.87

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.131.** Diagrama de resistencia a compresión de riego convencional



### 3.11.3 Peso volumétrico de las probetas modificadas con polvo de silicio y grafito

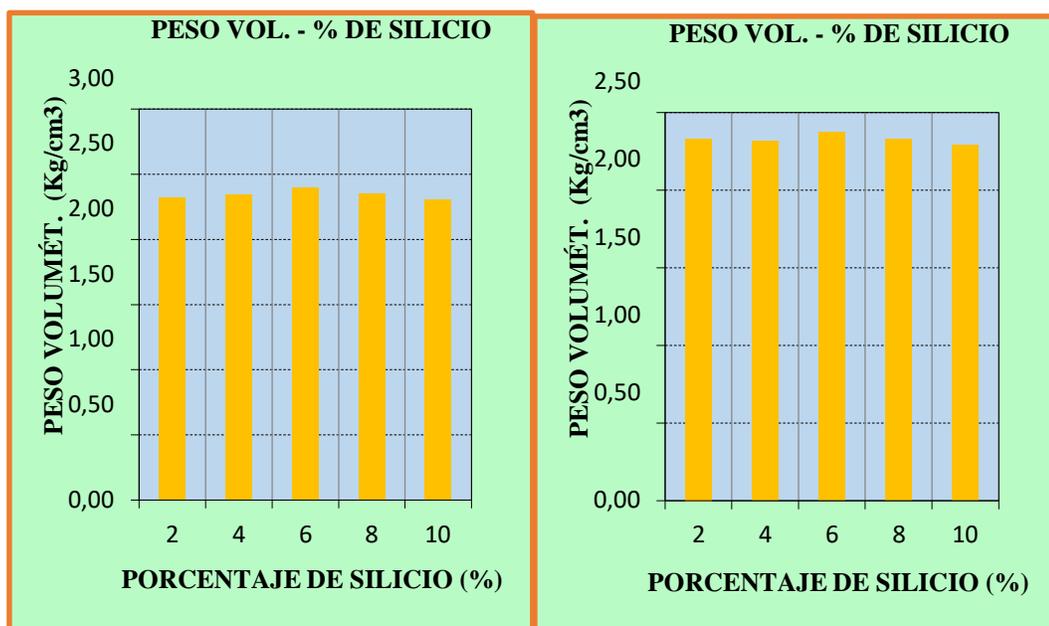
#### Probetas modificadas con polvo de silicio

**Tabla 3.86.** Resultados de peso volumétrico de probetas con silicio

Porcent de silicio	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Peso	Volumen		P. vol	Peso	Volumen		P. vol	Peso	Volumen		P. vol
%	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/cm3)	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/cm3)	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/cm3)
2	3286.40	9.50	20.00	2.32	3271.60	9.50	19.80	2.33	3284.10	9.50	20.00	2.32
4	3294.10	9.50	19.80	2.35	3283.40	9.50	20.00	2.32	3267.80	9.50	19.80	2.33
6	3317.20	9.50	19.50	2.40	3332.50	9.50	19.80	2.37	3298.10	9.50	19.80	2.35
8	3285.90	9.50	19.70	2.35	3302.60	9.50	20.00	2.33	3297.50	9.50	20.00	2.33
10	3265.40	9.50	20.00	2.30	3245.60	9.50	20.00	2.29	3254.50	9.50	20.00	2.30

Fuente: elaboración propia

**Figura 3.132.** Diagrama de peso volumétrico vs porcentaje de silicio



Fuente: elaboracion propia

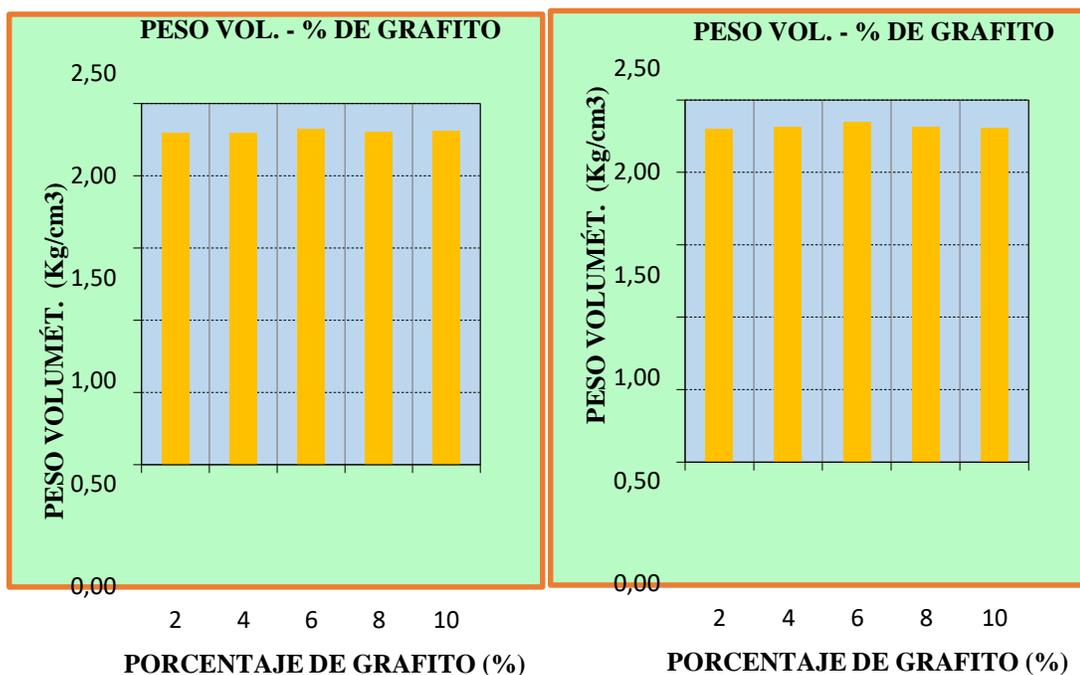
### Probetas modificadas con grafito

**Tabla 3.87.** Resultados de peso volumétrico de probetas con grafito

Porcent de grafito	Probeta n° 1				Probeta n° 2				Probeta n° 3			
	Peso	Volumen		p. vol	Peso	Volumen		P. vol	Peso	Volumen		P. vol
%	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/m3)	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/cm3)	Kg	D (cm)	H (cm)	(kg/cm3)
2	3250.8	9.50	20.00	2.29	3227.50	9.50	19.80	2.30	3248.60	9.50	19.9	2.30
4	3258.9	9.50	20.00	2.30	3275.30	9.50	20.00	2.31	3277.10	9.50	20.0	2.31
6	3257.7	9.50	19.80	2.32	3296.80	9.50	19.80	2.35	3264.60	9.50	19.8	2.33
8	3262.3	9.50	20.00	2.30	3280.00	9.50	20.00	2.31	3298.50	9.50	20.0	2.33
10	3271.6	9.50	20.00	2.31	3268.70	9.50	20.00	2.31	3283.50	9.50	20.0	2.32

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.133.** Diagrama de peso volumétrico vs porcentaje de grafito



Fuente: elaboracion propia

### 3.11.4 Ensayo de cántabro

El ensayo se lo llevo a cabo en el laboratorio de hormigón mediante la máquina de los ángeles a temperatura ambiente a los 14 días de vida de conformación de las probetas, se trabajó con 7% para silicio y 6% para el grafito.

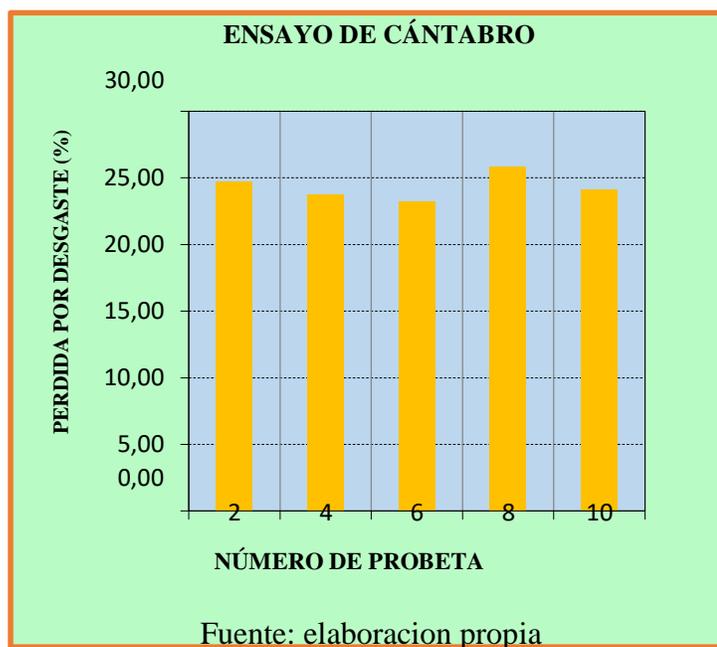
#### Probetas modificadas con polvo de silicio

**Tabla 3.88.** Resultados de cántabro de probetas con silicio

Número de probeta	Desgaste por cántabro riego modificado con 7% de silicio					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de pérdida de desgaste
N.	gr	D (cm)	H (cm)	(gr)	(gr)	(%)
2	3265.00	9.50	19.90	940.00	821.00	24.73
4	3256.00	9.50	20.00	964.00	827.00	23.78
6	3277.00	9.50	20.00	987.00	823.00	23.20
8	3301.00	9.50	19.90	921.00	825.00	25.84
10	3283.00	9.50	20.00	963.00	828.00	24.09

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.134.** Diagrama de desgaste de probetas con riego modificado con silicio

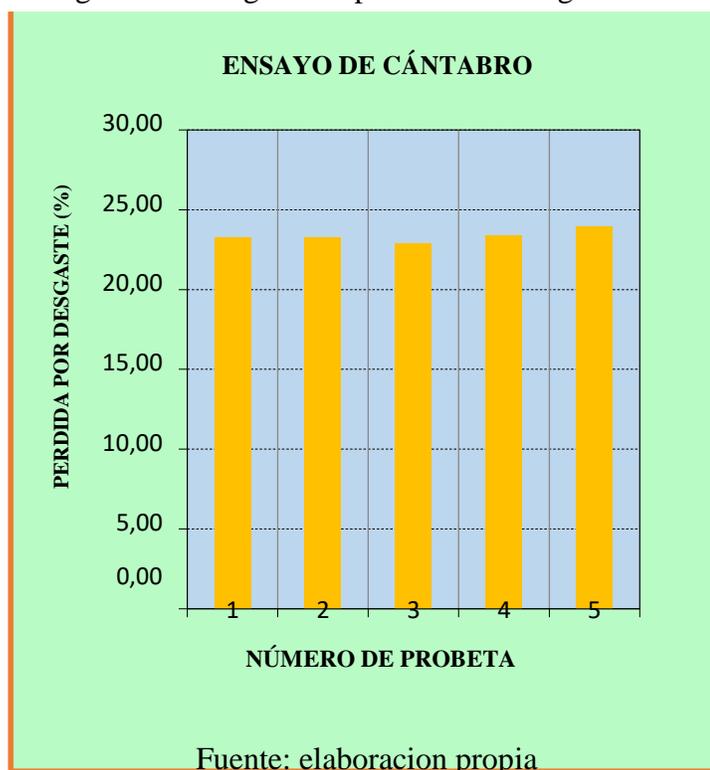


### Probetas modificadas con grafito

**Tabla 3.89.** Resultados de cántabro de probetas con grafito

Número de probeta	Desgaste por cántabro riego modificado con 6% de grafito					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de perdida de desgaste
		gr	D (cm)			
1	3274.00	9.50	19.80	985.00	821.00	23.24
2	3310.00	9.50	19.90	996.00	827.00	23.23
3	3292.00	9.50	20.00	1002.00	823.00	22.85
4	3298.60	9.50	20.00	989.00	825.00	23.35
5	3318.50	9.50	19.90	978.00	828.00	23.93

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.135.** Diagrama de desgaste de probetas con riego modificado con grafito**Tabla 3.90.** Resultados de cántabro de probetas con riego convencional

Número de prob.	Desgaste por cántabro					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de perdida de desgaste
		gr	D (cm)			
1	3263.00	9.50	20.00	906.00	821.00	26.02
2	3258.00	9.50	19.90	899.00	827.00	26.24
3	3271.00	9.50	20.00	901.00	823.00	26.30
4	3254.00	9.50	19.80	874.00	825.00	27.23
5	3278.00	9.50	20.00	889.00	828.00	26.87

Fuente: elaboracion propia

**Figura 3.136.** Diagrama de desgaste de probetas con riego convencional

Fuente: elaboración propia

### 3.11.5 Ejecución de las obras

#### 3.11.5.1 Preparación de la superficie de apoyo

Previa aplicación del riego de curado, la superficie a regar se debe encontrar aprobada por el inspector de calidad, de acuerdo al cumplimiento de las exigencias establecidas en el pliego de especificaciones técnicas generales de colocación de riego de liga.

La superficie de apoyo debe ser regular y no debe exhibir deterioros. Asimismo, debe estar libre de manchas o huellas de suelos cohesivos, los que deben eliminarse totalmente de la superficie. Inmediatamente antes de proceder a la aplicación de la emulsión, la superficie a regar se debe limpiar de materiales sueltos o perjudiciales para el buen desempeño del riego de liga.

Para ello se deben utilizar barredoras mecánicas o máquinas de aire a presión, u otro método aprobado por el inspector de calidad para la limpieza de toda la área de aplicación.

Asimismo, si la superficie a regar fuera un pavimento asfáltico en servicio, se deben eliminar, mediante fresado, los excesos de ligante asfáltico que hubiera y se deben

reparar los deterioros existentes que pudieran impedir una correcta adherencia del riego de liga.

Una vez la superficie se encuentra limpia y con la condición de humedad correcta, se debe solicitar la aprobación de la misma por parte del director de obra, previa aplicación del riego de imprimación.

Las banquetas y/o trochas aledañas se deben mantener durante los trabajos en condiciones tales que eviten la contaminación de la superficie, luego de que esta ha sido cubierta por el riego.

**Figura 3.137.** Superficie inadecuada tramo Temporal San Jacinto



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.138.** Superficie con presencia de polvo, huellas y suelo cohesivo tramo Temporal San Jacinto



Fuente: Elaboración propia

### 3.11.5.2 Aplicación del riego de liga

Cuando la superficie a regar se encuentre en las condiciones fijadas en el Punto 3.9.4.1 Preparación de la superficie de apoyo, debe aplicar el riego de liga, con la dotación y la temperatura definida en la dotación de obra.

La distribución del riego de liga se debe efectuar de manera uniforme, evitando duplicarla en las juntas transversales de trabajo. Donde fuera preciso regar por franjas, se debe procurar una ligera superposición del riego en la unión de las mismas. Se debe garantizar la aplicación del riego de curado de manera uniforme, sin la formación de estrías ni acumulaciones en superficie, garantizando la dotación especificada.

La cobertura y la uniformidad de aplicación del riego de liga constituyen el factor preponderante para garantizar un exitoso riego de liga. El estado del arte define una adecuada aplicación de riego de liga como aquella que exhibe una cobertura y dosificación uniforme a lo largo de toda la capa que se desea intervenir tanto en el plano horizontal como en juntas y cortes verticales.

Una encuesta realizada a distintas agencias de transportes por NCHRP (national cooperate highway research, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos sobre el tema de cobertura del riego de liga concluyó que una cobertura menor al 90 % de la superficie a intervenir es categorizada como una inadecuada práctica constructiva en la construcción de sobrecapas.

En relación a la cobertura del riego de liga considerada dentro de las buenas prácticas de ingeniería a nivel mundial se tiene como referencia las siguientes fuentes bibliográficas:

El boletín técnico designado como “apropiada aplicación del riego de liga” (proper tack coat application, título en inglés) del departamento de transportes del estado de Ohio que menciona:

“El propósito del riego de liga es promover la adherencia entre una superficie de pavimento y una sobrecapa, **es muy importante que el riego de liga sea aplicado de una manera uniforme con cobertura total de la superficie** y el arrastre del riego de liga por las llantas de las vagonetas debe ser minimizado”

**“El riego de liga debe aplicarse en una capa fina y uniforme que cubra toda la superficie**, incluyendo todas las superficies y juntas verticales de la estructura. Un riego de liga pobre puede causar problemas de desligamiento entre capas y la aplicación de un exceso de riego de liga puede causar deslizamiento entre capas”.

Es importante recalcar la importancia de la uniformidad del riego de liga en juntas y caras verticales, ya que es en este sitio donde el ligante asfáltico brinda adherencia entre secciones y mitiga el subsecuente agrietamiento de las juntas (departamento de transportes del estado de Ohio, 2012).

Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores relacionados con funcionamiento, calibración y mantenimiento del equipo que pueden generar aplicaciones de riegos de liga no uniformes en el área de intervención. La no uniformidad de un riego de liga contribuye a la pérdida de resistencia por adherencia entre la capa existente y nueva capa colocada. Estudios internacionales consultados sobre la no uniformidad del riego de liga coinciden en que esta práctica constructiva repercute directamente en la transmisión y disipación de los esfuerzos al pavimento así como la reducción de la vida por fatiga de la estructura y la aparición de deterioros prematuros.

El instituto del asfalto (asphalt institute) menciona en su presentación “Buenas prácticas para la aplicación del riego de liga” realizada en el estado de Oklahoma en el año 2014, menciona que la independencia de capas producto de un pobre riego de liga incide en la reducción de la vida por fatiga de la estructura, aumenta probabilidad de ahuellamiento y desplazamiento de mezcla por cargas de empuje del tránsito. El mismo instituto del asfalto en su revista Asphalt Magazine publicada en el año 2015, menciona que:

“Múltiples investigaciones han mostrado que **con una mínima pérdida de la resistencia adherencia entre capas, entre un 10% y un 30%, puede resultar en una pérdida de la vida a fatiga de entre un 50% a un 70%**”.

**Figura 3.139.** Distribución no uniforme de riego de liga tramo Temporal San Jacinto



Fuente: Elaboración propia

### 3.11.5.3 Juntas transversales

Se debe emplear un plan de trabajo que minimice la necesidad de ejecutar juntas de trabajo, tanto transversales como longitudinales.

Tanto en las juntas longitudinales como transversales se debe producir una superposición del riego de liga de aproximadamente veinte centímetros (20 cm).

**Figura 3.140.** Distribución donde no se toma en cuenta las juntas tramo Temporal San Jacinto



Fuente: Elaboración propia

#### 3.11.5.4 Coordinación de la puesta en obra

La aplicación del riego de liga se debe coordinar con la puesta en obra de la capa de material asfáltico inmediata, de manera que se haya producido la rotura de la emulsión asfáltica, pero sin que haya perdido su efectividad como material ligante debido al paso del tiempo o por la adherencia de partículas de suelo o suciedad

**Figura 3.141.** Condición de la vía después del riego de liga tramo Temporal San Jacinto



Fuente: Elaboración propia

#### 3.11.6 Tramo de prueba

Antes de iniciarse la aplicación del riego de liga, se debe ejecutar el tramo de prueba. El mismo tiene por objetivo efectuar los ajustes y/o correcciones en la dotación de obra, la temperatura de la emulsión al momento de la aplicación, el proceso de distribución del riego de curado y, de corresponder, la distribución y compactación de los áridos de cobertura; todos ellos necesarios para alcanzar la conformidad total de las exigencias del presente pliego de especificaciones técnicas generales. El contratista debe informar por escrito, adjuntos a la dotación de obra final a emplear, los ajustes llevados a cabo. Los mismos deben ser aprobados por el Inspector de calidad.

El tramo de prueba se debe realizar sobre una longitud no menor a la definida por el inspector de calidad, nunca menor a doscientos metros (200 m).

Con el objetivo de determinar la conformidad con las condiciones y requisitos especificados en el pliego de especificaciones técnicas generales, se deben realizar

los ensayos establecidos en ambos documentos para el tramo de prueba. El inspector de calidad puede solicitar la ejecución de otros ensayos además de los indicados en el pliego de especificaciones técnicas generales. Los mencionados ensayos pueden ser in-situ, sobre muestras de mezcla asfáltica sin colocar y/o sobre testigos extraídos.

Una vez obtenidos y analizados los resultados, el inspector de calidad debe decidir:

-Si es aceptable o no la dotación de obra. En el primer caso, se puede iniciar la aplicación del riego. En el segundo, el contratista debe proponer las actuaciones a seguir (estudio de una nueva dotación y condiciones de aplicación, corrección parcial de la ensayada, correcciones en el proceso, etc.), de modo de cumplimentar con las exigencias establecidas, en este caso se debe repetir la ejecución del tramo de prueba.

-Si son aceptables o no los equipos propuestos por el contratista para llevar adelante los procesos distribución y control de dichos procesos.

No se puede proceder a la distribución sin que el inspector de calidad haya autorizado el inicio en las condiciones aceptadas después del tramo de prueba.

Los tramos de prueba en los que se verifique el cumplimiento de las condiciones de ejecución y puesta en obra del riego, como así también se verifiquen los requisitos de la unidad terminada definidos en el presente pliego de especificaciones técnicas generales y en el pliego de especificaciones técnicas particulares para el tramo de prueba, pueden ser aceptados como parte integrante de la obra.

### **3.11.7 Limitaciones de la ejecución y habilitación al tránsito**

No se permite la puesta en obra del riego de liga en las siguientes situaciones (salvo autorización expresa del inspector de calidad):

-Cuando la temperatura ambiente a la sombra resulte inferior a diez grados Celsius (10°C). Dicho límite se puede bajar a cinco grados Celsius (5°C), a juicio del inspector de calidad, si la temperatura tiende a aumentar.

-Cuando haya probabilidad o se produzcan precipitaciones atmosféricas.

Está prohibida la circulación de cualquier tipo de vehículo hasta que se haya producido la rotura de la emulsión en toda la superficie aplicada y siempre que no se verifique que parte del riego de liga se adhiere a los neumáticos de los vehículos.

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 demasiada baja dará como resultado un riego discontinuo por la descarga desigual del material en las boquillas individuales. Mientras que una presión demasiada alta deformará el abanico de riego (Asphalt Institute, 1965).

El camión distribuidor debe tener la capacidad de mantener la temperatura de la emulsión para asegurar una adecuada viscosidad y flujo del material a través de las boquillas de barra rociadora. La temperatura a la que debe mantenerse la emulsión dependerá del tipo de emulsión que se desea aplicar, la literatura sugiere rangos de aplicación de temperatura para emulsiones de rompimiento rápido entre los 21° C y los 60 °C y en emulsiones de rompimiento lento entre los 21°C y 70°C (NCHRP, 2012). 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).

### **3.11.8 Plan de ensayos sobre el proceso de distribución del riego de liga**

La frecuencia mínima de ensayos del proceso de distribución del riego de liga se realizara cada lote de obra que equivale a una distancia de 500 metros lineales o a 2500 metros cuadrados de dotación de riego.

Independientemente de la frecuencia especificada, se debe realizar al menos una vez cada uno de los ensayos detallados durante la ejecución del tramo de prueba.

Al cambiar un insumo y/o alguno de los materiales componentes del riego de liga se debe presentar una nueva dosificación de obra.

**Tabla 3.91.** Plan de ensayos sobre el proceso de distribución del riego de liga

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Frecuencia</b>
Dotación de ligante convencional o modificado	(1)	Cada lote de obra

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

**Tabla 3.92.** Plan de ensayos sobre unidad terminada

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Frecuencia</b>
Evaluación superficial de la superficie	...	Cada lote de Obra
Ensayo de adherencia entre capas	UNE EN 12697-48, ensayo SBT	Cada cinco lotes De obra

Fuente: Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina VN-E

### 3.11.9 Requisitos del proceso de ejecución

#### 3.11.9.1 Dotación del residuo asfáltico

La dotación media del residuo asfáltico residual del lote de obra en estudio es la media del residuo asfáltico residual obtenido a partir de no menos de tres muestras. La diferencia entre el mayor y el menor valor utilizados para el cálculo de la media, debe ser menor o igual a diez por ciento (10%).

Para la determinación de la dotación media del residuo asfáltico del riego de curado se deben disponer sobre la superficie a regar no menos de tres bandejas. Las mismas deben ser metálicas, de silicona, u otro material apropiado y aprobado por el inspector de calidad. La ubicación de las mismas sobre la superficie a regar debe ser de manera aleatoria, según lo indicado en el punto anterior. Generalidades. En cada uno de estos elementos se debe determinar la dotación de ligante residual, en gr/m<sup>2</sup>, mediante secado a estufa y pesaje.

La dotación media de ligante asfáltico residual del riego de curado del lote de obra en estudio debe ser superior a la indicada en la dotación de obra aprobada y vigente.

### **3.11.9.2 Evaluación visual**

Una vez distribuido el riego de liga, previa aplicación de la capa asfáltica siguiente, se debe verificar que no existan superficies de la capa regada sin recubrimiento de emulsión asfáltica. Asimismo, el residuo asfáltico tener sus propiedades como elemento de liga.

Si existen superficies de la capa regada sin recubrimiento de emulsión asfáltica, se rechaza el lote de obra en estudio. En estas situaciones, el Contratista debe proceder a tomar las medidas necesarias para subsanar la situación. En caso de que la superficie no recubierta aún conserve la humedad necesaria para un correcto curado, el contratista puede ejecutar un nuevo riego de curado sobre dicha la superficie. En caso de que la superficie no recubierta haya perdido la humedad, se debe proceder, una vez finalizado el fragüe del lote de obra en estudio, al reemplazo localizado de la capa en el área afectada. Esto se debe realizar según las especificaciones técnicas establecidas en el pliego de especificaciones técnicas generales. En este caso los costos asociados a estas tareas corren por cuenta del contratista.

### **3.11.9.3 Adherencia entre capas**

El presente punto aplica sólo a aquellos lotes de obra sobre los cuales se realizó el ensayo de adherencia entre capas (UNE-EN 12697-48, ensayo SBT), según la frecuencia establecida.

La determinación de la adherencia entre capas se debe hacer sobre testigos extraídos del lote de obra en estudio. Se deben sacar testigos cada cien metros (100 m) por ancho de colocación, variando aleatoriamente su ubicación (borde interno, borde externo, y centro). El número de testigos a extraer por lote de obra nunca debe ser inferior a once (11).

La adherencia entre capas debe ser tal que la media de los resultados de los testigos correspondientes al lote de obra en estudio sea superior al valor especificado en la dotación de Obra aprobada y vigente.

### 3.11.10 Seguimiento a la dotación de riego de liga en el tramo Temporal San Jacinto.

**Figura 3.142.** Riego completado de los 2 carriles



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.143.** Camión distribuyendo el riego de liga



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.144.** Condición de los aspersores de riego de liga



Fuente: Elaboración propia

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de resultados obtenidos

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

Ensayo de Adherencia, que evaluará la resistencia al corte (adherencia) para determinar el porcentaje adecuado de modificación con polvo de silicio y grafito para una mezcla asfáltica densa, el ensayo de compresión en prensa de hormigones, determinación de peso volumétrico de las probetas y el ensayo de cántabro utilizando la máquina de los ángeles, mediante prácticas de mejoramiento de puesta en obra del riego de liga cumpliendo las especificaciones técnicas de la aplicación.

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

##### 4.1.1 Ensayo de adherencia (resistencia al corte)

Estos ensayos se realizaron siguiendo el método de adherencia UNE-EN 12967-48, ensayo SBT, con el cual se realizó la ruptura o separación de las probetas ligadas por diferentes porcentajes de polvo de silicio y grafito añadidos al riego de liga RC-70 (curado rápido), con una carga cortante en la zona de unión de las dos capas (capa base de suelo granular y capa de pavimento flexible).

Para poder obtener el porcentaje óptimo de polvo de silicio y grafito que mejore la adherencia del riego de liga necesarias para lograr la una máxima adherencia, se hizo variar las tasas de silicio y grafito cada 2%, es decir que se trabajó con 5 porcentajes tanto de silicio como de grafito para posteriormente trabajar con el mejor porcentaje de cada material.

#### 4.1.1.1 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con polvo de silicio

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

**Tabla 4.1.** Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el riego de liga con silicio

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error											
Tasa de silicio	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					estándar	cortante					
%	Nº	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
2	P1	256.02	245.87	256.02	24.04	0.340	3.07	0.65	10.15	0.041	4.13
	P2	219.37							26.50	0.107	10.78
	P3	264.65							18.78	0.076	7.64
4	P1	292.18	288.15	292.18	18.66	0.399	3.93	0.89	4.03	0.014	1.40
	P2	305.14							16.99	0.059	5.90
	P3	268.34							19.81	0.068	6.87
6	P1	336.66	352.12	349.42	17.42	0.487	3.73	0.60	15.46	0.043	4.39
	P2	371.12							19.00	0.054	5.40
	P3	349.42							2.70	0.007	0.77
8	P1	354.99	348.19	349.42	7.40	0.482	3.86	0.61	6.80	0.019	1.95
	P2	340.33							7.86	0.022	2.26
	P3	349.42							1.23	0.003	0.35
10	P1	289.01	306.26	303.67	19.31	0.424	3.53	0.32	17.25	0.056	5.63
	P2	303.67							2.59	0.008	0.84
	P3	327.3							21.04	0.068	6.87

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.2.** Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el riego de liga convencional

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error riego de liga convencional											
Tasa	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					estándar	cortante					
-	Nº	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
-	P1	230.37	242.8	245.03	11.74	0.34	2.7	0.45	12.44	0.051	5.12
	P2	245.03							2.22	0.009	0.91
	P3	253.60							10.79	0.044	4.44

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar según la tabla 4.1 que existe un error porcentual máximo de 10% en comparación con la media de todos los porcentajes trabajados, pero se observa que todos los porcentajes superan el esfuerzo cortante de 0.30 MPa. El mejor porcentaje de silicio que se tiene según la tabla es de 6% donde nos da la mayor resistencia al corte con un valor del esfuerzo de 0.487 MPa.

**Figura 4.1.** Resistencias a corte de cada probeta modificada con porcentajes de polvo de silicio



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 la dotación más adecuada de silicio para una mejor adherencia entre las dos capas.

De los resultados mostrados en la tabla se puede observar que, para las briquetas ligadas con una dotación de 2% se obtuvieron valores de resistencia alrededor de 0.34 MPa. En el cual realizando el análisis se pudo evidenciar de un error con un valor de 4.13 como valor máximo. Para esta dotación se obtuvo un valor medio de resistencia a corte de 245.87 kg con una desviación de 24.04 kg cuyo valor de resistencia sería  $(245.87 \pm 24.04)$ , el valor más alejado de la media es 219.37 kg con un error 10.7%.

Para una dotación de 4% se obtuvo una resistencia media y una desviación de  $(288.15 \pm 18.66)$ , de igual forma el valor más alejado a la media es 268.34 con un error de 6.87%.

Para una dotación de 6%, los resultados de la media y desviación de las resistencias a corte es  $(352.12 \pm 17.42)$ , el valor más alejado a la media es 371.12 kg con un error de 5.7%, para la dotación de 8% se tiene un valor medio de resistencia y su desviación de  $(348.19 \text{ kg} \pm 7.4)$ , el valor más alejado a la media es 340.33 kg con un error de 2.26%.

Del análisis de resultados se puede observar que para la dotación de 10%, se obtuvo resistencia media corte de  $306.26 \text{ kg} \pm 19.31$ , el valor más alejado a la media es 327.3 kg con un error de 6.87 %. Los errores que se pidieron presentar en el ensayo es que en algunas probetas el ligante escurría por las orillas de la probeta debido a que eran desmoldables las mismas, 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 diferencia de resultados, pero los resultados que se obtuvo son datos confiables ya que se trabajó en buenas condiciones para la elaboración de las probetas.

De la figura 4.1 se observa los resultados de resistencias a corte, obtenidos en las diferentes briquetas ligadas con un riego de adherencia modificado con 2,4,6,8,10 % de porcentaje en peso de silicio que se adiciono al riego de liga, en donde se puede observar la variación de resistencia para cada dotación de silicio al riego de liga de curado rápido.

En la misma se puede apreciar lo que se dijo anteriormente que existe una mejor adherencia con la dotación de 6% de silicio donde muestra resultados más altos de resistencia al corte.

Con la incorporación de polvo de silicio al riego de liga se obtiene una mejora del 30.6 % en la adherencia en comparación con el riego de liga convencional.

**Figura 4.2.** Resultados de la resistencia a corte para las distintos porcentajes de silicio añadido al ligante de curado rápido RC-70

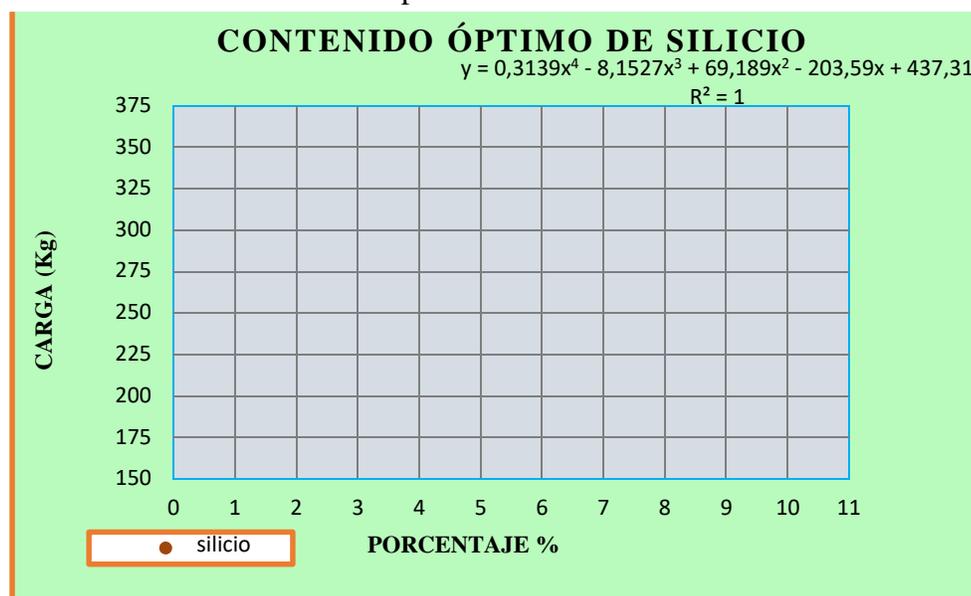


Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se observa la variación de resistencia a corte para una determinada adición de polvo de silicio añadido al riego de liga, donde se puede distinguir que el valor de la resistencia en kilogramos va en ascenso con cada aumento en la dotación de silicio hasta la adición de 6%, donde a partir de la cual empieza a decrecer nuevamente la resistencia.

También se puede observar que la resistencia mínima conseguida pertenece al porcentaje de 10%, con un valor medio de 306.26 kg, debido a que al ser un porcentaje mayor la mezcla se volvió un poco densa lo que impidió tal vez su buena combinación y su misma condición puesta en obra, y el porcentaje de adición con valores altos de resistencia se encuentra entre 6 y 8 %, siendo el porcentaje de 6% el que mayor valor de resistencia al corte proporciona, con un valor medio de 371.74 kg (3.64 KN), que posteriormente se verá si es el mejor porcentaje de adición del silicio según su ecuación de dotación de polvo de silicio.

**Figura 4.3.** Determinación de porcentaje óptimo para una mejor adherencia con polvo de silicio



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.3 se observa la variación del esfuerzo cortante máximo para cada porcentaje añadido de polvo de silicio al riego de liga de curado rápido aplicado a las probetas formadas primeramente de suelo (capa base).

Dando una curva de tendencia que mejor se ajuste a los datos obtenidos, en función a la correlación se pudo obtener una ecuación que nos permitirá obtener el mejor porcentaje de silicio que se necesita para una mejor adherencia entre

capas, según nuestra grafica de carga versus porcentaje de silicio se puede ver que nuestro mejor porcentaje de silicio será de 7% obteniendo un valor de resistencia de 360.8 kg.

#### 4.1.1.2 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con grafito

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

**Tabla 4.3.** Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el riego de liga con grafito

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error														
Tasa de grafito	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual			
					estándar	cortante								
%	N°	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%			
2	P1	274.35	278.27	274.35	14.02	0.38	3.07	0.56	3.92	0.014	1.41			
	P2	267.03										11.24	0.040	4.04
	P3	294.14												
4	P1	336.66	340.73	336.66	14.22	0.47	3.93	0.34	4.07	0.011	1.19			
	P2	329.33							11.40	0.033	3.35			
	P3	356.79							16.06	0.047	4.71			
6	P1	391.64	371.74	378.9	23.44	0.51	3.73	0.56	19.90	0.053	5.35			
	P2	346.19							25.55	0.068	6.87			
	P3	378.9							7.16	0.019	1.93			
8	P1	349.12	354.58	349.12	18.14	0.49	3.86	0.48	5.46	0.015	1.54			
	P2	340.33							14.25	0.040	4.02			
	P3	375.21							20.63	0.058	5.82			

10	P1	318.33	318.64	318.33	13.91	0.44	3.53	0.61	0.31	0.001	0.10
	P2	333.00							14.36	0.045	4.51
	P3	305.19							13.45	0.042	4.22

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que no existe mucho margen de error entre las diferentes dotaciones de grafito en comparación con el polvo de silicio en el riego de liga siendo el mayor porcentaje de error de 6.87% y obteniendo una mejor resistencia en comparación con el riego de liga modificado con silicio.

**Figura 4.4.** Resistencias a corte de cada probeta, con diferente porcentaje de grafito añadido al riego de liga



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 la dotación más adecuada de grafito para su combinación con el riego de liga de curado rápido para una mejor adherencia entre las dos capas.

De los resultados mostrados en la tabla se puede observar que, para las probetas de capa base y capa de pavimento flexible ligadas con una dotación de 2% de grafito se obtuvieron valores de resistencia alrededor de 0.385 MPa. En el cual realizando el análisis se pudo evidenciar de un error con un valor de 5.7 como valor máximo. Para esta dotación se obtuvo un valor medio de resistencia a corte de 278.27 kg con una desviación de 14.02 cuyo valor de resistencia seria  $(278.27 \pm 24.02 \text{ kg})$ , el valor más alejado de la media es 294.14 kg con un error 5.7%.

Para una dotación de 4% se obtuvo una resistencia media y una desviación de  $(314.73 \pm 14,21 \text{ kg})$ , de igual forma el valor más alejado a la media es 356.79 kg con un error de 4.71%.

Para una dotación de 6%, los resultados de la media y desviación de las resistencias a corte es  $(371.74 \pm 23.44 \text{ kg})$ , el valor más alejado a la media es 346.19 kg con un error de 6.87% que el error porcentual más alto de todos los porcentajes con los que se trabajó, para la dotación de 8% se tiene un valor medio de resistencia y su desviación de  $(354.18 \text{ kg} \pm 18.14\text{kg})$ , el valor más alejado a la media es 375.21 kg con un error de 5.8%.

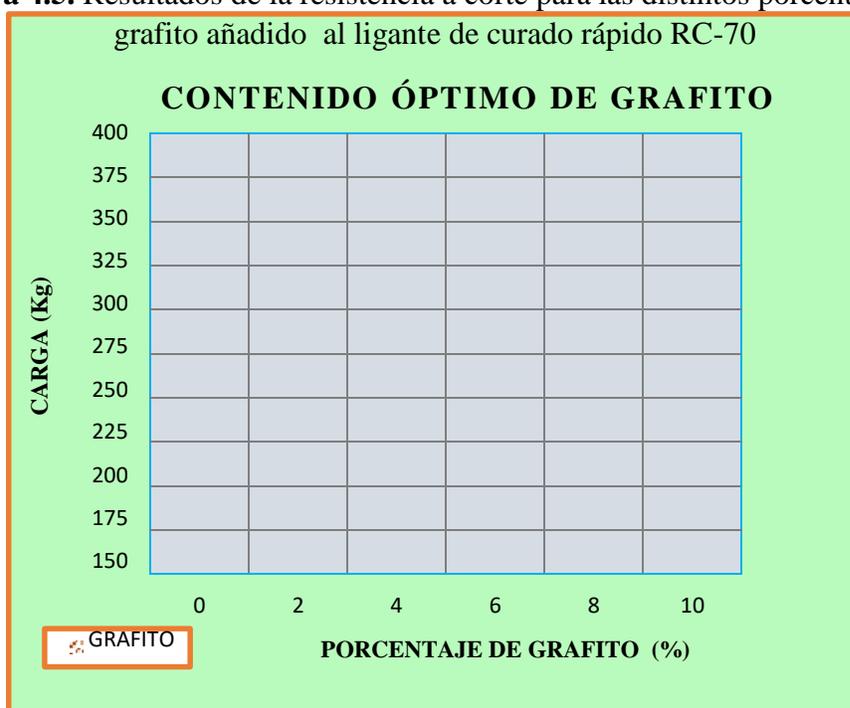
Del análisis de resultados se puede observar que para la dotación de 10%, se obtuvo resistencia media corte de  $318.64 \text{ kg} \pm 13.91 \text{ kg}$ , el valor más alejado a la media es 333kg con un error de 4.51 %. Los errores que se pidieron presentar en el ensayo es que en algunas probetas el ligante escurría por las orillas de la probeta debido a que las probetas eran desmoldables, 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 diferencia de resultados, pero los resultados que se obtuvo son datos confiables.

De la figura 4.4 se observa que los resultados de resistencias a corte, obtenidos en las diferentes probetas ligadas con un riego de adherencia modificado con 2,4,6,8,10 % de porcentaje en peso de grafito, en donde se puede observar la variación de resistencia a corte para cada dotación de grafito al riego de liga de curado rápido.

En la misma se puede apreciar lo que se dijo anteriormente que existe una mejor adherencia con la dotación de 6% de grafito donde muestra resultados más altos de resistencia al corte ( ensayo de adherencia entre capas), soportando un esfuerzo de 0.512 MPa como valor medio para una dotación de 6% de grafito al riego de liga de curado rápido.

Con la incorporación de grafito al riego de liga de obtiene una mejora del 33.3 % en la adherencia en comparación con el riego de liga convencional.

**Figura 4.5.** Resultados de la resistencia a corte para las distintos porcentajes de grafito añadido al ligante de curado rápido RC-70

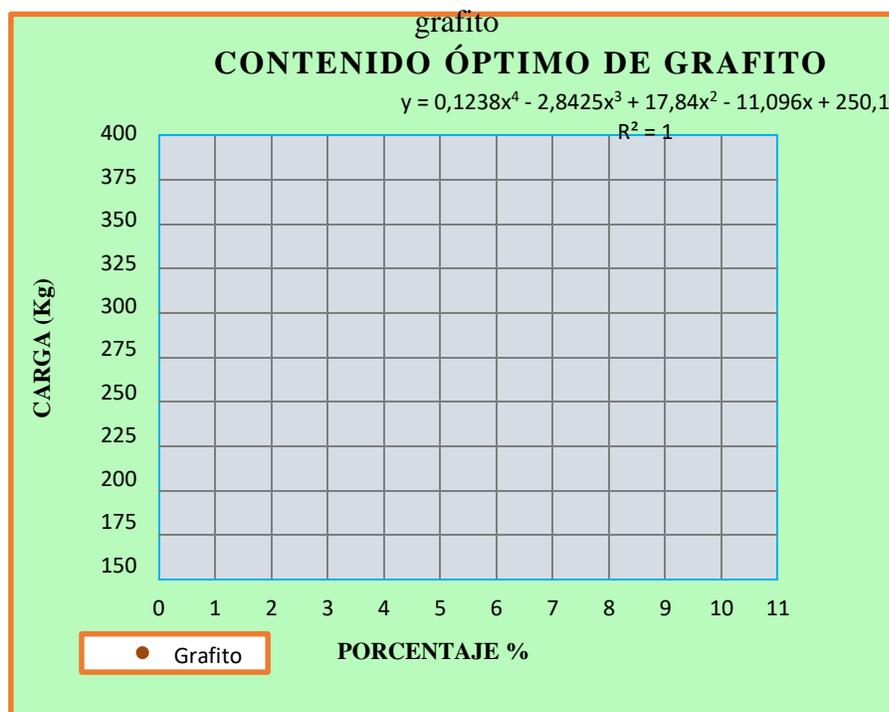


Fuente: Elaboración propia

De la gráfica 4.5 se observa la variación de resistencia a corte para una determinada adición de grafito añadido al 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 6% la resistencia empieza a decrecer, esto pueda deberse a que se observó que a medida que se aumentaba el porcentaje de grafito el riego de liga se iba haciendo más denso y dificultaba su mezclado del mismo.

También se puede observar que la resistencia mínima conseguida pertenece al porcentaje de 2 %, con un valor medio de 278.27 kg, y el porcentaje de adición con valores altos de resistencia se encuentra entre 6 y 8 %, siendo el porcentaje de 6% el que mayor valor de resistencia al corte proporciona, con un valor medio de 371.74 kg (3.64 KN).

**Figura 4.6.** Determinación de porcentaje óptimo para una mejor adherencia con



Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se observa la variación del esfuerzo cortante máximo para cada porcentaje añadido al riego de liga aplicado.

Dando una curva que mejor se ajuste a los datos en función a la correlación se pudo obtener una ecuación que nos permitirá obtener el mejor porcentaje de polvo de silicio que se necesita para una mejor adherencia entre capas, según nuestra grafica se puede ver que nuestro mejor porcentaje de grafito será de 6.1% obteniendo un valor de resistencia de 374.8 kg.

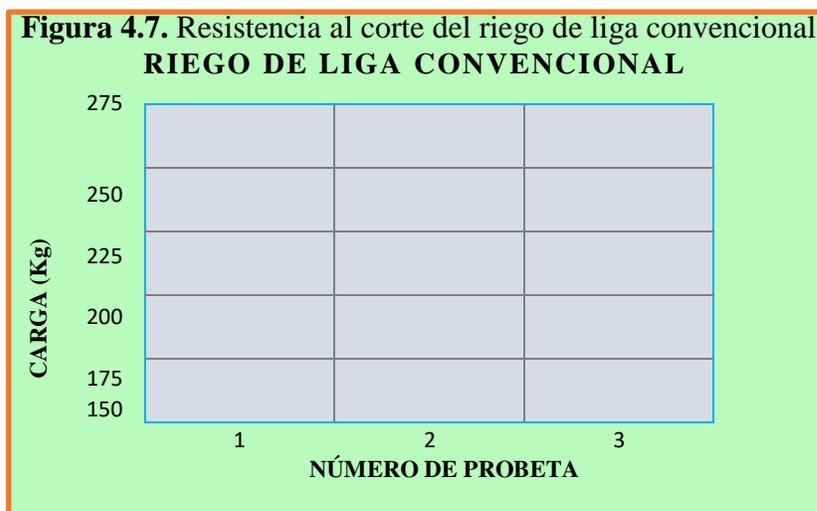
#### 4.1.1.3 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con riego de liga convencional

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

**Tabla 4.4.** Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de resistencia a corte, para el riego de liga convencional

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error riego de liga convencional											
Tasa	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					estándar	cortante					
-	N°	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
-	P1	230.37	242.8	245.03	11.747	0.33	2.7	0.45	12.44	0.051	5.12
	P2	245.03							2.22	0.009	0.91
	P3	253.6							10.79	0.044	4.44

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra el análisis estadístico que se realizó a los resultados obtenidos del ensayo de corte de probetas con un riego de liga convencional de curado

rápido, cuyo fin es el de obtener la resistencia a corte de probetas con riego de liga convencional para su comparación con el riego de liga modificado.

De los resultados mostrados en la tabla y la gráfica 4.7 se puede observar que, para las briquetas ligadas con riego convencional tienen una menor resistencia al corte obteniendo un valor máximo de 253.6 kg (0.330 MPa). En el cual realizando el análisis se pudo evidenciar de un error con un valor de 5.12% como valor máximo.

**Tabla 4.5.** Resumen estadístico de los resultados de resistencia a corte

<b>Resistencia al corte (N)</b>							
<b>Riego de liga modificado con polvo de silicio</b>							
<b>Dotación</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. est.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. a corte</b>
<b>%</b>						<b>mm</b>	<b>MPa</b>
2	245.87	256.02	24.04	219.37	264.65	3.07	0.34
4	288.14	292.18	18.66	268.34	305.14	3.93	0.39
6	352.11	349.42	17.42	336.66	371.12	3.73	0.48
8	348.19	349.42	7.40	340.33	354.99	3.86	0.48
10	306.25	303.67	19.31	289.01	327.30	3.53	0.42
<b>Riego de liga modificado con grafito</b>							
<b>Dotación</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. est.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. a corte</b>
<b>%</b>						<b>mm</b>	<b>Mpa</b>
2	278.27	274.35	14.02	267.03	294.14	3.07	0.38
4	340.73	336.66	14.21	329.33	356.79	3.93	0.47
6	371.74	378.90	23.44	346.19	391.64	3.73	0.51
8	354.58	349.12	18.14	340.30	375.21	3.86	0.49
10	318.63	318.33	13.91	305.19	333.00	3.53	0.44
<b>Riego de liga convencional</b>							
<b>Dotación</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. est.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. a corte</b>
<b>-</b>						<b>mm</b>	<b>MPa</b>
-	242.80	245.03	11.74	230.37	253.60	2.70	0.33

Fuente: elaboración propia

**Figura 4.8.** Comparación de la carga de rotura del riego de liga con polvo de silicio vs riego de liga con grafito



Fuente: elaboración propia

**Figura 4.9.** Resistencia media del riego de liga convencional

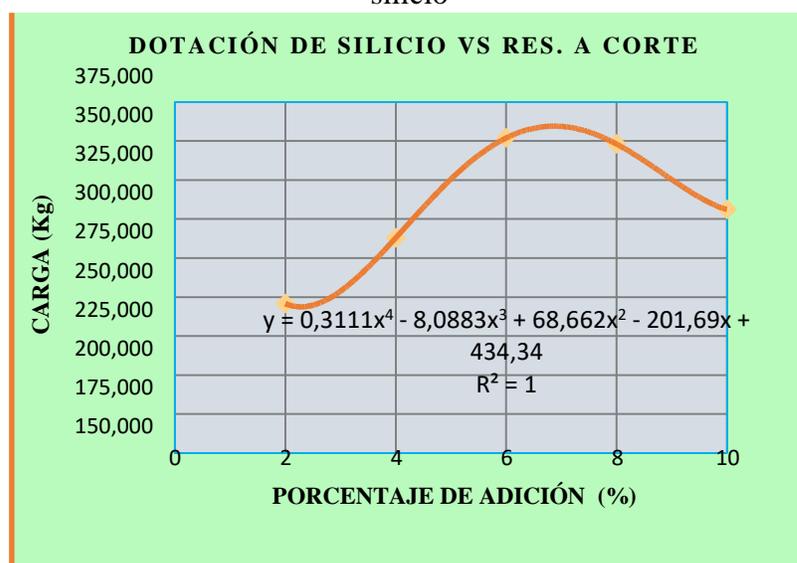


Fuente: elaboración propia

Se observa que los valores medios de resistencia a corte para las dotaciones de 2,4,6,8 y 10 % de silicio y grafito, hay una diferencia notable de resistencia del grafito en comparación con el silicio, presentando el grafito su máxima resistencia media de 371.74 kg (0.515 MPa) y el silicio presenta 352.11 kg (0.487MPa).

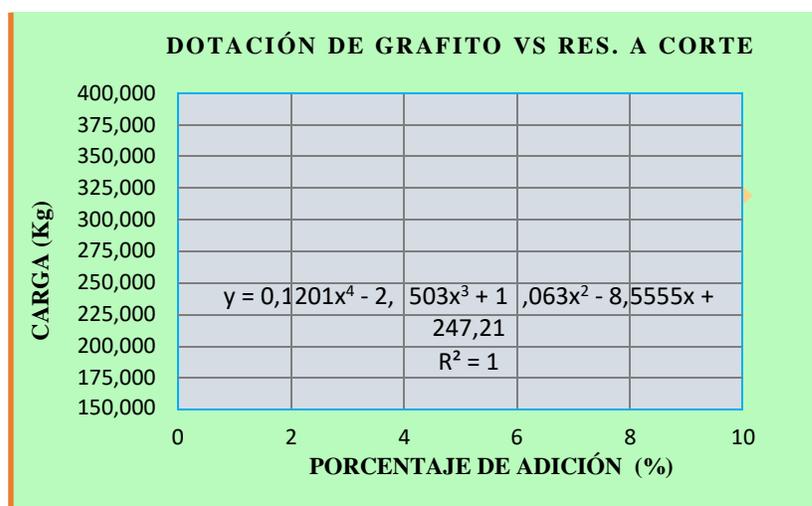
Se aprecia también que el riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito tiene una diferencia notable de resistencia a corte en comparación con el riego de liga convencional, ya que el convencional solo llega a resistir 242.81 kg (0.336 MPa), llegando a deducir que el polvo de silicio y grafito mejoran la adherencia entre capas y por ende habrá una mayor durabilidad del riego de liga.

**Figura 4.10.** Variación de la resistencia a corte respecto a la dotación de polvo de silicio



Fuente: elaboración propia

**Figura 4.11.** Variación de la resistencia a corte respecto a la dotación de grafito



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Ensayo de carga (compresión) en la prensa hidráulica

Estos ensayos se realizaron siguiendo el método de resistencia a compresión de probetas cilíndricas ASTM C109, con el cual se realizó el ensayo hasta que se diera su primera fisura de las probetas ligadas por diferentes porcentajes de polvo de silicio y grafito añadidos al riego de liga RC-70 (curado rápido), con una carga aplicada en capa inferior de la probeta.

Se realizó el ensayo para ver el comportamiento de las dos capas ante la aplicación de una carga y observar si trabajan mejor de manera conjunta debido a la mejora de adherencia entre las 2 capas, Para poder obtener el mejor porcentaje de polvo de silicio y grafito que muestre el riego de liga necesario para lograr la una máxima adherencia, se hizo variar las tasas de silicio y grafito cada 2% tanto para el polvo de silicio como el grafito.

Tomar en cuenta que se trabajó en la prensa hidráulica de probetas de hormigón con el fin de poder aplicar carga a cada probeta y ver su comportamiento ante la acción de la carga que produce en cada probeta.

##### 4.1.2.1 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con silicio

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

**Tabla 4.6.** Resumen estadístico de los resultados de resistencia a compresión de riego modificado con silicio

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error de riego de liga modificado con silicio											
Tasa de silicio	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv. estándar	Esf. Compr.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
%	N°	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
2	P1	1372.80	1354.60	1354.70	25.50	1.87	3.07	0.65	18.18	0.013	1.34
	P2	1336.67							17.94	0.013	1.32
4	P1	1669.04	1658.20	1658.2	15.30	2.29	3.93	0.89	10.87	0.007	0.66

6	P2	1647.36							10.80	0.007	0.65
	P1	1921.92	1885.50	1885.80	51.10	2.61	3.73	0.6	36.47	0.019	1.93
	P2	1849.67							35.78	0.019	1.90
8	P1	1719.61	1734.00	1734.10	20.40	2.40	3.86	0.61	14.39	0.008	0.83
	P2	1748.51							14.51	0.008	0.84
10	P1	1611.23	1650.50	1651.00	56.20	2.28	3.53	0.32	39.26	0.024	2.38
	P2	1690.71							40.22	0.024	2.44

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla se puede observar que el error porcentual no difiere mucho en este ensayo siendo el máximo de 2.44 % de todos los porcentajes en el porcentaje de 10% de silicio, se observa la mejor resistencia a compresión y por ende la que trabaja mejor en forma monolítica es decir llegaron a trabajar mejor en forma conjunta debido a la una mejor adherencia entre capas, esta es la de dotación de 6% de silicio llegando a resistir 2.61 MPa. La mínima resistencia se presenta en el porcentaje de 2% con un valor de 1.875 MPa.

#### 4.1.2.2 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con grafito

**Tabla 4.7.** Resumen estadístico de los resultados de resistencia a compresión de riego modificado con grafito

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error de riego de liga modificado con grafito											
Tasa de grafito	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv. Estánd	Esf. Compr.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
%	N°	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
2	P1	1567.89	1585.80	1585.90	25.50	2.19	3.07	0.45	17.96	0.011	1.13
	P2	1604.01							18.17	0.011	1.15
4	P1	1777.42	1714.90	1716.00	86.90	2.37	3.93	0.34	62.51	0.036	3.65
	P2	1654.59							60.32	0.035	3.52
6	P1	1965.28	1950.80	1950.80	20.40	2.70	3.73	0.52	14.50	0.007	0.74
	P2	1936.38							14.40	0.007	0.74
8	P1	1726.84	1744.80	1744.90	25.50	2.41	3.86	0.32	17.97	0.010	1.03
	P2	1762.97							18.16	0.010	1.04
10	P1	1625.69	1650.80	1651.00	35.80	2.28	3.53	0.29	25.09	0.015	1.52
	P2	1676.27							25.48	0.015	1.54

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla se puede observar que el error porcentual no difiere mucho en este ensayo siendo el máximo de 3.65 % en el porcentaje de 4% de silicio, se observa la mejor resistencia a compresión y por ende la que trabaja mejor en forma monolítica, es decir ambas capas trabajan mejor de manera conjunta debido a la mejor adherencia que existe entre las 2 capas esto se ve en la de dotación de 6% de grafito llegando a resistir 2.7 MPa. La mínima resistencia se presenta en el porcentaje de 2% con un valor de 2.195 MPa.

#### 4.1.2.3 Interpretación y tratamiento estadístico de resultados obtenidos con riego convencional

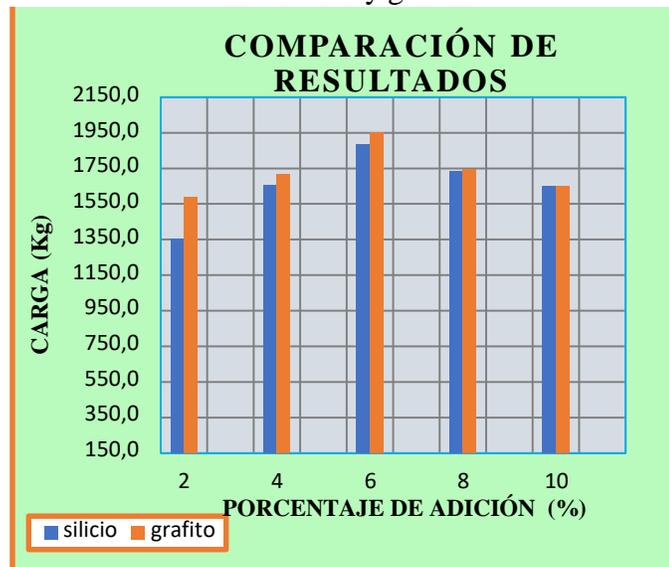
**Tabla 4.8.** Resumen estadístico de los resultados de resistencia a compresión de riego convencional

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error riego de liga convencional											
Tasa	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Deformación	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					Estánd.	Compr.					
-	Nº	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	mm	-	-	-	%
-	P1	1430.60	1333.30	1329.45	55.34	1.84	2.70	0.56	97.28	0.073	7.30
	P2	1336.67							3.35	0.002	0.25
	P3	1271.64							61.68	0.046	4.63
	P4	1293.32							40.00	0.030	3.00
	P5	1322.22							11.10	0.008	0.83
	P6	1351.12							17.80	0.013	1.33

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla 4.8 se puede observar que el error porcentual difiere un poco en este ensayo siendo el máximo de 7.30 % en la probeta 1, se observa la mejor resistencia a compresión es de 1.84 MPa y que en comparación con el riego de liga con silicio y grafito es mucho menor y se lo podrá apreciar en la siguiente gráfica.

**Figura 4.12.** Variación de la resistencia a compresión del riego de liga modificado con silicio y grafito



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.13.** Variación de la resistencia a compresión del riego de liga convencional



Fuente: Elaboración propia

Mediante las gráficas se puede observar que existe una diferencia en cuanto a la resistencia a compresión de las probetas modificadas con riego de liga modificada

con silicio y grafito con las probetas realizadas con riego de liga convencional llegando a resistir con grafito 1950 kg y con la convencional 1430 kg, que en diferencia porcentual sería una del 27% en cuanto a resistencia a compresión.

#### 4.1.3 Ensayo de relación volumétrica

Este ensayo se lo hizo con el fin de evaluar cuál es el comportamiento, o que incidencia tiene la adición de polvo de silicio y grafito al riego de liga convencional con respecto al peso volumétrico de cada probeta respecto al porcentaje añadido de silicio y grafito, el cual se describe a continuación.

#### Relación volumétrica de probetas con silicio

**Tabla 4.9.** Resumen estadístico de los resultados de relación volumétrica de riego con silicio

Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error										
Tasa de silicio	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					estándar					
%	N°	Kg/cm <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>3</sup>	Kg	Kg	MPa	-	-	-	%
2	P1	2.32	2.32	2.31	0.007	0.003	0.56	0.00	0.001	0.16
	P2	2.33						0.01	0.003	0.39
	P3	2.32						0.01	0.002	0.23
4	P1	2.35	2.33	2.32	0.015	0.003	0.34	0.02	0.007	0.71
	P2	2.32						0.01	0.006	0.62
	P3	2.33						0.00	0.000	0.09
6	P1	2.40	2.37	2.37	0.024	0.003	0.56	0.03	0.010	1.06
	P2	2.37						0.00	0.0001	0.01
	P3	2.35						0.02	0.010	1.04
8	P1	2.35	2.34	2.32	0.014	0.003	0.48	0.02	0.007	0.72
	P2	2.33						0.01	0.002	0.28
	P3	2.33						0.01	0.004	0.44
10	P1	2.30	2.30	2.29	0.006	0.003	0.61	0.01	0.003	0.31
	P2	2.29						0.01	0.002	0.28
	P3	2.30						0.00	0.0003	0.03

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla de valores estadísticos se puede observar no varía mucho en relación al porcentaje de silicio añadido al riego de liga, ya que la máxima relación volumétrica es de 2.37 kg/cm<sup>3</sup> considerando la media de cada uno de los porcentajes y la mínima es de 2.30 presente en la dotación de 10% de silicio.

### Relación volumétrica de probetas con grafito

**Tabla 4.10.** Resumen estadístico de los resultados de relación volumétrica de riego con grafito

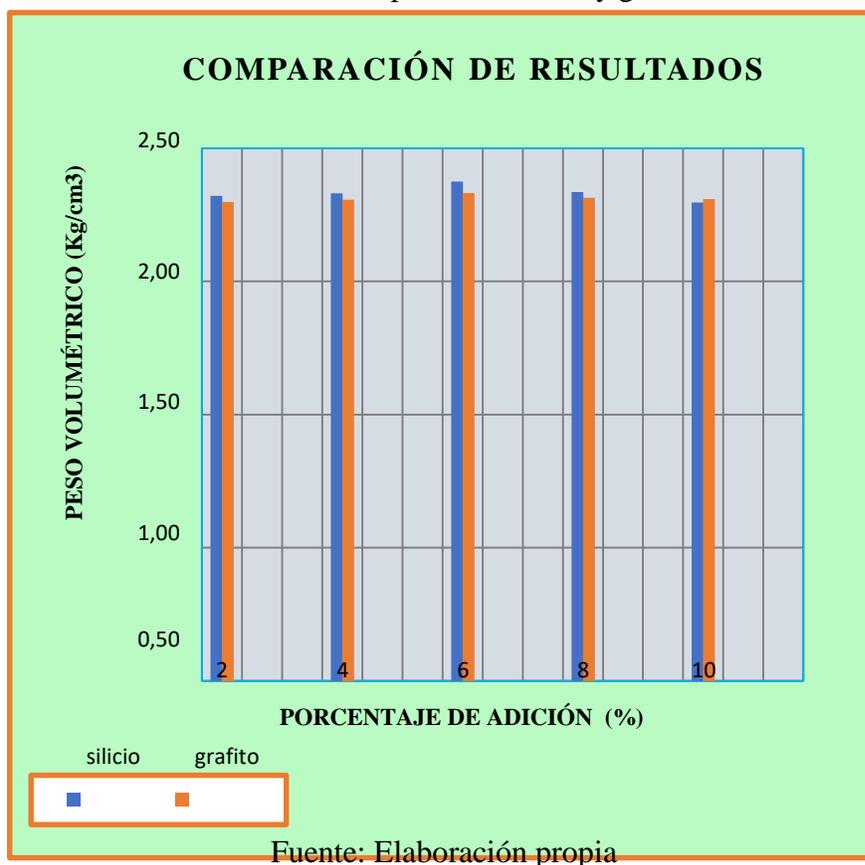
Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y análisis de error										
Tasa de grafito	Probeta	Carga de rotura	Media	Mediana	Desv.	Esf.	Coef varianza	Error absoluto	Error relativo	Error porcentual
					estándar					
%	N°	Kg	Kg	Kg	Kg	MPa	-	-	-	%
2	P1	2.29	2.30	2.29	0.005	0.003	0.65	0.01	0.0024	0.24
	P2	2.30						0.00	0.0005	0.05
	P3	2.30						0.00	0.0019	0.19
4	P1	2.30	2.31	2.31	0.007	0.003	0.45	0.01	0.0035	0.35
	P2	2.31						0.00	0.0015	0.15
	P3	2.31						0.00	0.0020	0.20
6	P1	2.32	2.33	2.32	0.014	0.003	0.53	0.01	0.0050	0.47
	P2	2.35						0.02	0.0073	0.73
	P3	2.33						0.01	0.0026	0.26
8	P1	2.30	2.31	2.31	0.012	0.003	0.62	0.01	0.0055	0.55
	P2	2.31						0.00	0.0001	0.01
	P3	2.33						0.01	0.0056	0.56
10	P1	2.31	2.31	2.30	0.005	0.003	0.74	0.00	0.0009	0.09
	P2	2.31						0.00	0.0018	0.18
	P3	2.32						0.01	0.003	0.27

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla de valores estadísticos se puede observar no varía mucho en relación al porcentaje de grafito añadido al riego de liga, ya que la máxima relación volumétrica es de 2.35 kg/cm<sup>3</sup> en el porcentaje de 6% de grafito considerando la media de cada uno de los porcentajes y la mínima es de 2.30 presente en la dotación de 2% de grafito al riego de liga.

Se podrá observar en la siguiente grafica la comparación de relación volumétrica entre el riego de liga modificado con polvo de silicio y el riego de liga modificado con grafito.

**Figura 4.14.** Variación del peso volumétrico de probetas con riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito



#### 4.1.4 Ensayo de cántabro (desgaste)

Para el análisis del ensayo de cántabro no se realizó un análisis estadístico solo se valoró el porcentaje de pérdida de las probetas con cada porcentaje de adición tanto de silicio como de grafito al riego de liga, y se trabajó con el mejor porcentaje obtenido tanto del silicio (7%) como del grafito (6.1%).

#### Probetas realizadas con riego de liga modificado con silicio

**Tabla 4.11.** Desgaste de las probetas modificadas con silicio

Número de probeta	Desgaste por cántabro riego modificado con 7% de silicio					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de pérdida de desgaste
N.	gr	D (cm)	H (cm)	(gr)	(gr)	(%)
1	3265.00	9.50	19.9	940.00	821.00	24.73
2	3256.00	9.50	20.0	964.00	827.00	23.78
3	3277.00	9.50	20.0	987.00	823.00	23.20
4	3301.00	9.50	19.9	921.00	825.00	25.84
5	3283.00	9.50	20.0	963.00	828.00	24.09

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.15.** Pérdida por desgaste de probetas con riego de liga modificado con polvo de silicio



Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.11 y gráfica 4.15 se puede observar la variación de desgaste que tuvieron las probetas mediante el ensayo de cántabro, donde se observa que la probeta que tuvo un mayor agarre fue la probeta número 3, pero que entre todas tienen un similar desgaste ya que se trabajó con el mejor porcentaje de dotación de silicio.

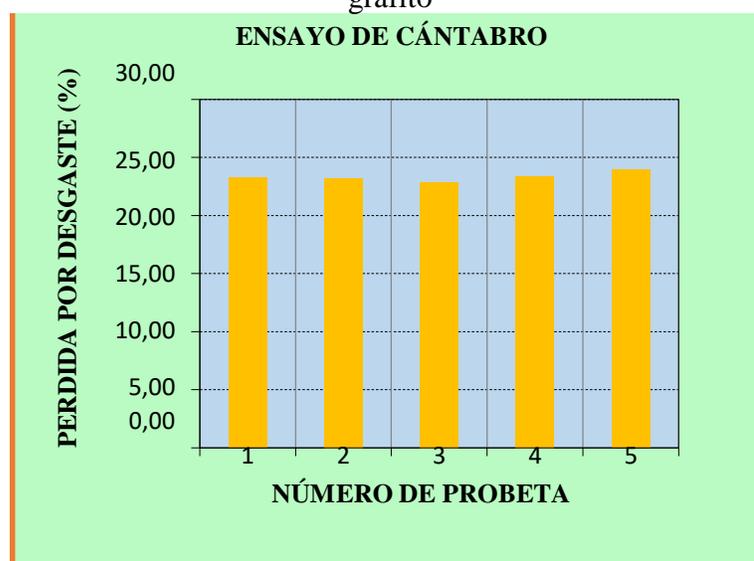
### Probetas realizadas con riego de liga modificado con grafito

**Tabla 4.12.** Desgaste de las probetas modificadas con grafito

Número de probeta	Desgaste por cántabro riego modificado con 6% de grafito					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de pérdida de desgaste
N.	gr	D (cm)	H (cm)	(gr)	(gr)	(%)
1	3274.00	9.50	19.8	985.00	821.00	23.24
2	3310.00	9.50	19.9	996.00	827.00	23.23
3	3292.00	9.50	20.0	1002.00	823.00	22.85
4	3298.60	9.50	20.0	989.00	825.00	23.35
5	3318.50	9.50	19.9	978.00	828.00	23.93

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.16.** Perdida por desgaste de probetas con riego de liga modificado con grafito



Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.12 y gráfica 4.16 se puede observar la variación de desgaste que tuvieron las probetas mediante el ensayo de cántabro, donde se observa que la probeta que tuvo un mayor agarre fue la probeta número 2, pero que entre todas tienen un similar desgaste ya que se trabajó con el mejor porcentaje de dotación de grafito.

### Probetas realizadas con riego de liga convencional

**Tabla 4.13.** Desgaste de las probetas con riego de liga convencional

Número de prob.	Desgaste por cántabro					
	Peso inicial	Volumen		Peso después de desgaste	Peso de la capa de asfalto	Valor de pérdida de desgaste
N.	gr	D (cm)	H (cm)	(gr)	(gr)	(%)
1	3263.00	9.50	20.0	906.00	821.00	26.02
2	3258.00	9.50	19.9	899.00	827.00	26.24
3	3271.00	9.50	20.0	901.00	823.00	26.30
4	3254.00	9.50	19.8	874.00	825.00	27.23
5	3278.00	9.50	20.0	889.00	828.00	26.87

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.17.** Perdida por desgaste de probetas con riego de liga convencional



Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.13 y grafica 4.17 se observa que para las probetas con riego de liga convencional el desgaste es mayor al 25%, es decir que en comparación con las modificadas es mucho mayor.

Como análisis final del ensayo de cántabro en las anteriores graficas se puede observar que existe una mejor resistencia al desgaste con la adición de grafito comprobando que tiene un porcentaje menor al del riego modificado con silicio y el riego de liga convencional obteniendo una perdida inferior al 25% mientras que los otros dos si tienen perdidas mayor al 25%.

#### **4.2 Validación de resultados**

Con la finalidad de comprobar la idoneidad del dispositivo para la medición del porcentaje aplicado de silicio y grafito con el cual se propone una metodología o sistema alternativo de mejora en la durabilidad respecto al tiempo con la mejora de la adherencia, y la validación de los resultados obtenidos esta investigación para un mejor control en cuanto a la mejora en puesta en obra del riego de liga.

Para validar los resultados obtenidos en esta investigación se trabajó con probetas con riego de liga modificado con el mejor porcentaje obtenido de acuerdo a las diferentes dotaciones con las que se trabajó, y siguiendo todas las recomendaciones y especificaciones técnicas que se usan en otros países para la mejora de puesta en obra de riego de liga que influirá en la durabilidad de pavimento en construcción.

**Seguimiento de aplicación de riego de liga en campo.-** Se realizó un seguimiento en campo con la finalidad de observar cuales son las deficiencias y errores que se presentan y cometen a la hora de la puesta en obra del riego de liga y poder hacer una comparación con el sistema alternativo propuesto en esta investigación y observar el control que se hace en campo que se observó en el tramo de camino en construcción Temporal- San Jacinto realizado por la empresa departamental SE.DE.CA. (Servicio departamental de caminos) donde se controló la dotación para lo cual se usó de bandejas para la medición del ligante aplicado.

Para el riego de imprimación en proyecto de asfaltado la empresa utilizó el ligante tipo MC-30, cuya dosificación 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/m<sup>2</sup> conforme al tipo y textura de la base y del material bituminoso elegido.

Las deficiencias que se observó se describirán mediante fotografías describiendo las observaciones que se hicieron.

**Figura 4.18.** Riego de imprimación no uniforme



Fuente: Elaboración propia

Se pudo observar que la dotación de riego de liga no es uniforme a lo largo de todo el tramo debido a factores de mantenimiento de equipo distribuidor y condiciones de pendiente de la carretera.

**Figura 4.19.** Condición de la superficie



Fuente: Elaboración propia

Otra falla que se pudo observar es la condición de la superficie a ser aplicada por el riego de liga que presenta muchas irregularidades la más importante de limpieza ya que la capa base se observa que tiene mucho contenido de filler o polvo que es un efecto nocivo para las propiedades del riego de liga, otra falla sería la textura de la superficie debido a la circulación de los vehículos.

**Figura 4.20.** Control de la dotación de riego de liga



Fuente: Elaboración propia

Mediante el control que se hace en capo se pudo evidenciar que no existe una dotación de riego de liga a lo largo de todos los puntos de control, esto se debe a que previa a una aplicación de riego de liga se debe realizar un tramo de prueba para corregir todas las fallas que se pudieran presentar respecto a la dotación.

**Control de dotación por método de las bandejas.-** Las bandejas utilizadas para este ensayo de medición de ligante, eran de dimensión de 30 x 30 cm.

**Tabla 4.14.** Resultados de la medición de la cantidad de riego de imprimación, usando el método de las bandejas

Densidad MC-30				0,932	gr/m <sup>3</sup>
Área bandeja	Peso inicial	Peso final	Ligante en la bandeja	Peso de ligante	Dosis de ligante
m <sup>2</sup>	gr	gr	gr	gr/m <sup>2</sup>	lt/m <sup>2</sup>
0.09	544	632	88	977.78	1.05
0.09	600	708	99	1100.00	0.93
0.09	581	675	94	1044.44	0.86
0.09	571	657	86	955.56	0.97

Fuente: Laboratorio de la empresa

Se puede observar la diferencia de dotación que existe de un punto a otro punto de control a lo largo de la vía, estos datos fueron obtenidos de la empresa SE.DE.CA.

#### **Análisis de las probetas con capa base y riego de liga modificado y convencional sometido a exposición de humedad a través de agua sobre la superficie con riego de liga**

Una vez se dejó expuesto al agua la superficie regada con riego de liga modificada con polvo de silicio y grafito y el riego convencional por un periodo de 7 días se observó en las gráficas.

**Figura 4.21.** Penetración del agua en las probetas



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar que la probeta con riego de liga convencional que está a lado derecho de la imagen es el agua se infiltró en la capa base, mientras que en la probeta con silicio de lado izquierdo de la imagen el agua penetra en menor cantidad quedando agua aun en la superficie, mientras que en la probeta del medio modificada con grafito la infiltración del agua fue mínima en comparación con los otras probetas quedando mayor cantidad de agua en su superficie.

Una vez observado la infiltración de cada probeta se procedió a romperla para ver la profundidad de infiltración de agua en cada probeta que se mostrara a continuación.

**Figura 4.22.** Penetración del agua en la probeta de riego de liga convencional



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.23.** Penetración del agua en la probeta de riego de liga modificado con silicio



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.24.** Penetración del agua en la probeta de riego de liga modificado con grafito



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas arriba se puede observar como el agua penetra hacia la capa base de la probeta con riego de liga convencional en una profundidad aproximada de 8 milímetros, en la probeta con riego de liga modificado con silicio también se puede apreciar que hubo una penetración del agua de aproximadamente de 3 a 4 milímetros y en la probeta donde se modificó el riego de liga con grafito se observa que la penetración del agua fue mínima de aproximadamente 1 milímetro.

### **4.3 Análisis de costos**

El análisis de costos se realizará para el riego de liga modificado con polvo de silicio y grafito, al mejor porcentaje de ambos que presentó un alto valor de resistencia a corte, determinado mediante el ensayo de adherencia (corte).

**Análisis de costo de riego de liga.-** El análisis de costo para el riego de liga de curado rápido RC-70, para una dotación de 0.5 litros por metro cuadrado, se detallará 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 convencional para una tasa de 0.5 lt/m<sup>2</sup>

DATOS GENERALES					
	PRO YEC TO :	ANALISIS DE LA MEJORA DE PUEST A EN OBRA Y DURABILIDAD DE LOS RIEGOS DE LIGA CON NANOMAT ERIALES ( POLVO DE SILICIO Y GRAFIT O)			
	ACTIVIDAD :	Riego de liga convencional			
	UNIDAD :	m2			
	MONEDA :	BOLIVIANOS			
1. MATERIALES					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Cemento Asfáltico 85-100	Kg.	0.32	7.85	2.51
2	Gasolina	lt.	0.19	3.74	0.69
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>3.20</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	chofer	Hr.	0.001	15	0.015
2	aydante	Hr.	0.002	12.50	0.03
3	Operador de planta	Hr.	0.001	18.75	0.02
4	Capataz	Hr.	0.001	17.50	0.02
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.08</b>
<b>CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)</b>				65.00 %	0.05
<b>IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES) (14.94%)</b>				14.94 %	0.02
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.14</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Camion distribuidir de asfalto	Hr.	0.001	223.00	0.22
2	Escoba Mecanica	Hr.	0.001	35.00	0.04
3	Planta diluidora de asfalto	Hr.	0.001	389.00	0.39
<b>HERRAMIENT AS = (% DEL TOT AL DE MANO DE OBRA)</b>			5.00 %		0.01
<b>TOTAL MAQUINARIA, EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>					<b>0.65</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
<b>GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)</b>			5.00 %		0.20
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>					<b>0.20</b>
5. UTILIDAD					
<b>UTILIDAD = % DE (1+2+3+4)</b>			10.00 %		0.42
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>0.42</b>
6. IMPUESTOS					
<b>IMPUESTOS = % DE (1+2+3+4+5)</b>			3.09 %		0.14
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>0.14</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO = (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>4.77</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO CON DOS (2) DECIMALES</b>					<b>4.77</b>

### Planilla de costo de riego de liga modificada con silicio para una tasa de 0.5 lt/m<sup>2</sup>

DATOS GENERALES					
PROYECTO :		ANALISIS DE LA MEJORA DE PUESTA EN OBRA Y DURABILIDAD DE LOS RIEGOS DE LIGA CON NANOMATERIALES ( POLVO DE SILICIO Y GRAFITO)			
ACTIVIDAD :		Riego de liga modificado con silicio 7%			
UNIDAD :		m2			
MONEDA :		BOLIVIANOS			
1. MATERIALES					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Cemento Asfáltico 85-100	Kg.	0.30	7.85	2.36
2	Gasolina	lt.	0.18	3.74	0.67
	Polvo de silicio	Kg.	0.04	50.00	1.75
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>4.78</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	chofer	Hr.	0.001	15	0.015
2	aydante	Hr.	0.002	12.50	0.03
3	Operador de planta	Hr.	0.001	18.75	0.02
4	Capataz	Hr.	0.001	17.50	0.02
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.08</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				65.00 %	0.05
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES) (14.94%)				14.94 %	0.02
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.14</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Camion distribuidir de asfalto	Hr.	0.001	223.00	0.22
2	Escoba Mecanica	Hr.	0.001	35.00	0.04
3	Planta diluidora de asfalto	Hr.	0.001	389.00	0.39
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			5.00 %		0.01
<b>TOTAL MAQUINARIA, EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>					<b>0.65</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			5.00 %		0.28
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>					<b>0.28</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD = % DE (1+2+3+4)			10.00 %		0.59
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>0.59</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS = % DE (1+2+3+4+5)			3.09 %		0.20
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>0.20</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO = (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>6.64</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO CON DOS (2) DECIMALES</b>					<b>6.64</b>

### Planilla de costo riego de liga modificado con grafito para una tasa de 0.5lt/m<sup>2</sup>

DATOS GENERALES					
PROYECTO :		ANALISIS DE LA MEJORA DE PUESTA EN OBRA Y DURABILIDAD DE LOS RIEGOS DE LIGA CON NANOMATERIALES ( POLVO DE SILICIO Y GRAFITO)			
ACTIVIDAD :		Riego de liga modificado con grafito 6%			
UNIDAD :		m2			
MONEDA :		BOLIVIANOS			
1. MATERIALES					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Cemento Asfáltico 85-100	Kg.	0.31	7.85	2.43
2	Gasolina	lt.	0.18	3.74	0.67
	Grafito	Kg.	0.03	80.00	2.40
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>5.51</b>
2. MANO DE OBRA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	chofer	Hr.	0.001	15	0.015
2	aydante	Hr.	0.002	12.50	0.03
3	Operador de planta	Hr.	0.001	18.75	0.02
4	Capataz	Hr.	0.001	17.50	0.02
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.08</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				65.00 %	0.05
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE; SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES) (14.94%)				14.94 %	0.02
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0.14</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					
	Descripcion	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Camion distribuidir de asfalto	Hr.	0.001	223.00	0.22
2	Escoba Mecanica	Hr.	0.001	35.00	0.04
3	Planta diluidora de asfalto	Hr.	0.001	389.00	0.39
HERRAMIENTAS = (% DEL T OTAL DE MANO DE OBRA)			5.00 %		0.01
<b>TOTAL MAQUINARIA, EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>					<b>0.65</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			5.00 %		0.32
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>					<b>0.32</b>
5. UTILIDAD					
UTILIDAD = % DE (1+2+3+4)			10.00 %		0.66
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>0.66</b>
6. IMPUESTOS					
IMPUESTOS = % DE (1+2+3+4+5)			3.09 %		0.23
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>0.23</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO = (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>7.51</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO CON DOS (2) DECIMALES</b>					<b>7.51</b>

Realizando un análisis a los precios unitarios tanto del riego de liga convencional como al riego de liga modificado con nanomateriales (polvo de silicio y grafito), tenemos un incremento de precio igual a:

Riego de liga modificado con 7 % de polvo de silicio.

$$\text{Incremento} = \frac{P_{si} - P_{cn}}{P_{cn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{6.64 - 4.77}{4.77} * 100$$

$$39.20\% = 39.20\%$$

Al modificar el riego de liga convencional con polvo de silicio en un 7% existe un incremento en el costo de 39.20% llegando a incrementarse el precio en 1.87 bs.

Riego de liga modificado con 6 % de grafito.

$$\text{Incremento} = \frac{P_{gf} - P_{cn}}{P_{cn}} * 100$$

$$\text{Incremento} = \frac{7.51 - 4.77}{4.77} * 100$$

$$55.34\% = 55.34\%$$

Al modificar el riego de liga convencional con grafito en un 6% existe un incremento en el costo de 55.34% llegando a incrementarse el precio en 2.74 bs.

A nivel internacional se tiene precios de 260 dólares la tonelada de polvo de silicio y un precio de 350 dólares la tonelada de grafito.

Realizando un análisis de costos en comparación con la mejora en la adherencia del riego de liga se tiene que la mejor opción económica es la modificación de riego de liga con polvo de silicio en un 7% debido a que mejora su propiedad de adherencia en un 30.6% en comparación con el convencional y este tiene un incremento de precio de

37.94% siendo mucho menor que el riego de liga modificado con grafito, pero obteniendo resultados más bajos que el mismo.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- ✓ Se concluye a nivel general que la metodología alternativa propuesta en el presente trabajo, el cual se basa en la mejora de puesta en obra y durabilidad del riego de liga, es directamente influenciada por la adición de polvo de silicio y grafito en diferentes porcentajes de los mismos al riego de liga de curado rápido RC.
- ✓ Se observó que el riego de liga es necesario para asegurar la correcta unión entre capas de un pavimento flexible, 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, con una superficie bien preparada en cuanto a limpieza, uniformidad y correcta compactación el cual debe ser correctamente controlado en obra al momento de puesto en obra del riego de liga.
- ✓ Se determinó que la mejor dotación en porcentaje de polvo de silicio es de 7% al riego de liga convencional en función a una ecuación y para el grafito el mejor porcentaje fue de 6% de adición al riego de liga convencional de curado rápido RC-70, tanto para el ensayo de corte (adherencia) y resistencia a compresión.
- ✓ Con la incorporación nanomateriales (polvo de silicio y grafito) se consigue una mejora en la propiedad de la adherencia de 30.6% con el mejor porcentaje de silicio, y de 33.3% con el mejor porcentaje de grafito, en comparación con el riego de liga convencional.
- ✓ Se obtuvo una resistencia a corte (adherencia) de 360.8 kg., y una resistencia a compresión de 2.61 Mpa. con el mejor porcentaje de silicio adicionado al riego de liga que fue de 7%.

- ✓ Se obtuvo una resistencia a corte (adherencia) de 374.8 kg., y una resistencia a compresión de 2.70 Mpa. con el mejor porcentaje de grafito adicionado al riego de liga de 6%.
- ✓ Mediante el ensayo de desgaste por cántabro se observó que el mejor agarre por adherencia entre la capa base granular y la capa de pavimento flexible fue con la adición de grafito al riego de liga obteniendo un desgaste de 23.93% mucho menor al sufrido por el riego de liga con grafito y al convencional.
- ✓ El mejor resultado en cuanto a la mejora en la adherencia del riego de liga se lo consiguió con el mejor porcentaje de grafito en comparación con el grafito.
- ✓ Se observó que la textura y la limpieza que presenta la superficie, en la cual se realiza el ensayo, influye en la absorción del riego de liga, ya que la absorción aumenta a medida que aumenta la rugosidad superficial y existe mayor presencia de polvo en la vía, esto se pudo evidenciar al momento realizar el seguimiento de aplicación de riego de liga en obra y también se lo ve al momento de ruptura de las probetas y se pudo apreciar la penetración que hubo del riego de liga en la capa base de suelo granular.
- ✓ Con la adición de polvo de silicio al riego de liga convencional en cuanto al precio se tiene un incremento de 42.34% equivalente a 2.02 bs más que el costo del riego de liga convencional.
- ✓ Con la adición de grafito al riego de liga convencional en cuanto al precio se tiene un incremento de 37.31% equivalente a 1.78 bs más que el costo del riego de liga convencional.
- ✓ La adherencia entre capa base y capa de rodadura mejora considerablemente con la adición de polvo de silicio y grafito, y esto hará que una carretera dure más su vida útil respecto al tiempo en comparación con el riego de liga convencional que se usa hoy en día en nuestro medio.
- ✓ Se verifico fallas que se cometen en nuestro medio a la hora de aplicar el riego de liga, donde no se cumplen muchas especificaciones técnicas y recomendaciones para la correcta puesta en obra del riego de liga especialmente la limpieza de impurezas de la superficie.

## 5.2 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 como solvente, los cuales son inflamables, por eso se recomienda trabajar en una zona alejada del fuego.
- ✓ Se recomienda que en nuestro medio se ponga en práctica todas las recomendaciones y especificaciones técnicas que se tiene para que pueda aumentar la vida útil de nuestras carreteras y ahorrar recursos económicos.
- ✓ Como un parámetro razonable para una buena adherencia es recomendable que se cumpla con al menos 0,3 Mpa. de resistencia al corte, esto según las investigaciones realizadas.
- ✓ Se recomienda tomar en cuenta la uniformidad de la aplicación del riego de liga para que los valores que se obtengan al realizar el ensayo de corte, den valores más precisos de la adherencia, ya que de esto dependerá unión entre capas y evitara fallas en la estructura ante la acción de cargas de tránsito.
- ✓ Se recomienda que en nuestro medio se realicen ensayos más profundos acerca de la adherencia entre capas para que las mismas se ejecuten de mejor manera en obra y se tengan mejores resultados de durabilidad de un pavimento.