

**CAPÍTULO I**  
**DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

## CAPÍTULO I

### DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

#### 1.1. Introducción

Las mezclas asfálticas utilizadas en la ejecución de pavimentos flexibles deben conseguir determinadas características estructurales y funcionales, que son fundamentales para garantizar su resistencia y durabilidad durante su periodo de diseño.

En nuestro país se ha vuelto un común denominador la mala calidad de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles, las mismas que al poco tiempo de haber sido colocadas denotan un deterioro, provocando la destrucción de los mismos.

El control de calidad de las mezclas asfálticas se lo realiza sobre una muestra que se extrae de la planta asfáltica, en la cual se determina sus parámetros según el diseño Marshall. La calidad final de la mezcla una vez colocada y compactada, el control consiste en la extracción de testigos en la cual se evalúa su densidad comparándolo con la densidad Marshall patrón. Sin embargo, esta metodología de control no considera los parámetros de mecánicos de la capa asfáltica una vez ejecutado.

Los pavimentos flexibles se encuentran sometidos a un ciclo constante de carga y descarga debido al tráfico al que sirve. El constante paso de tráfico da lugar a la aparición de fisuraciones y fallas por ahuellamiento, etc.

Por ello se ha llevado a cabo estudios sobre la aplicación del ensayo de tracción indirecta orientado a la búsqueda de una metodología de control de calidad de mezclas asfálticas que evalúe las características mecánicas de la mezcla. La determinación de la resistencia a tracción indirecta en distintas mezclas asfálticas representa este parámetro mecánico que puede ser una herramienta sumamente útil para evaluar la calidad del proceso constructivo de la capa asfáltica. Adicionalmente el ensayo de tracción indirecta permite analizar los esfuerzos de tensión en un plano vertical de falla, como en el plano horizontal.

Con todo lo mencionado en lo anterior, se desarrolla esta presente investigación que estará centrada en el análisis de las características mecánicas de resistencia de las mezclas asfálticas, mediante el ensayo de tracción indirecta, regida según la norma NLT-346/90, con cuyos resultados se pretende establecer una herramienta de control que pueda brindar

y/o garantizar una mezcla de buena calidad, como también durabilidad y seguridad, en el tiempo de servicio.

## **1.2. Justificación**

La estructura típica conformada por carpeta asfáltica, base y subbase granular soportan esfuerzos de tracción debajo de la carpeta asfáltica y de compresión a nivel de las otras capas incluido el terreno de fundación, es por esto que al conocer la coyuntura actual de nuestro país donde la mayor parte de nuestras carreteras están concebidos como carreteras de pavimento flexible, tienden a fisurarse prematuramente, debido a los esfuerzos que soportan por la circulación del tráfico pesado.

Asimismo, se observa que los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica, originando esfuerzos en la fibra inferior de la carpeta, por lo que se debe estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas de tal forma, conocer y mejorar el diseño de las mezclas asfálticas.

Teniendo en cuenta los problemas presentes de fatiga del material, microfisuras, fisuras, fisuras longitudinales, fisuras transversales y por último llegado a la falla del pavimento con las fisuras piel de cocodrilo en las vías de comunicación (camino asfaltados) se debe determinar la propiedad de la mezcla asfáltica en la Resistencia a Tracción la cual requiere de métodos simples y representativos para la evaluación de las mezclas asfálticas.

De esta manera, se alcanzará a evaluar las mezclas asfálticas locales observando como parámetro la Resistencia a la Tracción, destacando la utilidad del ensayo a tracción indirecta, que permite obtener la carga máxima que aguanta una mezcla asfáltica antes de romper.

### **1.2.1. Aporte académico**

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper. Hasta 1965 solo se utilizaba para determinar la resistencia a tracción indirecta, pero desde entonces se ha ido profundizando en su estudio llegando a ser un ensayo con grandes perspectivas de futuro. Estados Unidos destaca como pionero en el avance de su estudio en la década de los 90, donde se realiza un gran

número de investigaciones, muchas de ellas quedan recogidas en el 4º Internacional Symposium de la RILEM. Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas asfálticas, además es un procedimiento muy simple y está especificado en la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

### **1.2.2. Aplicación técnica – práctica**

Las deformaciones de tracción que se forman en la parte inferior de las capas asfálticas, que constituyen la mayor parte de nuestras carreteras, provocan su rotura mecánica, por lo que deben ser estudiadas con detalle para poder mejorar el comportamiento mecánico y el diseño de los firmes. Para determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas se requiere de métodos suficientemente simples y representativos para que su aplicación también sea aceptada. En este sentido el ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

### **1.2.3. Importancia social**

Las carpetas asfálticas ejecutadas en nuestro medio tienen un periodo de vida útil, por tanto, se debe cerciorar técnicamente que todos los componentes de la misma deben cumplir a cabalidad las normas establecidas, para que así funcione el paquete estructural con todos sus componentes como un solo elemento estructural y no así de manera disgregada.

## **1.3. Planteamiento del problema**

### **1.3.1. Situación problemática**

Actualmente en nuestro país se ha podido observar en las diferentes obras que se vienen ejecutando que el control de calidad de las mezclas asfálticas no ha sido el adecuado, el cual no garantiza la durabilidad de las vías pavimentadas haciendo que el mantenimiento sea ejecutado en menos del tiempo previsible.

El análisis en el diseño de las mezclas asfálticas se realiza a partir de la composición de los agregados minerales, el cemento asfáltico y los parámetros obtenidos según el

procedimiento Marshall es la propiedad de la Estabilidad. Con esta metodología no se consideran los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica lo cual conlleva a que el control sea insuficiente.

Los diseños de las mezclas asfálticas ejecutadas y reflejadas en la ejecución de la carpeta asfáltica de nuestro medio, tienen un periodo de vida útil, por lo tanto, se debe cerciorar técnicamente que los diseños ejecutados deban cumplir ciertos requisitos de calidad y deban enmarcarse en las normas establecidas.

De esta manera se garantice la correcta transmisión de esfuerzos en todo el paquete estructural con todos sus componentes (Carpeta asfáltica, capa base, capa subbase y terreno de fundación) trabajando como un solo elemento estructural.

Las Especificaciones Técnicas Generales que contienen los diferentes proyectos no regulan el aspecto del control y seguimiento de la calidad de las mezclas asfálticas en cuanto a su propiedad de Resistencia a Tracción, esto debido a que principalmente un pavimento es concebido para trabajar a compresión.

### **1.3.2. Delimitación del tiempo**

Las mezclas asfálticas que son utilizadas actualmente, no son sujetas a un análisis y control en cuanto a sus propiedades mecánicas.

### **1.3.3. Delimitación del espacio**

Para la determinación de la propiedad de la Resistencia mediante el Ensayo a Tracción Indirecta de una mezcla asfáltica, se realizará todos los ensayos para la elaboración de los especímenes y su respectiva evaluación en el Laboratorio de Asfaltos de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

### **1.3.4. Formulación del problema**

¿Cuál será la confiabilidad de la resistencia a la tracción indirecta por el método de tracción indirecta, empleando diferentes tipos de mezclas asfálticas?

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas en frío y en caliente, considerando el uso del ensayo brasileño de tracción indirecta; de tal manera, se pueda establecer su confiabilidad para la construcción de pavimentos flexibles.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Obtener información de la bibliografía existente relacionada a la temática.
- Realizar la caracterización de materiales (agregados, cemento asfáltico y emulsión), a fin de cumplir las normas establecidas.
- Elaborar especímenes de mezclas asfálticas en frío y en caliente siguiendo el método Marshall.
- Determinar la resistencia de los especímenes (briquetas) mediante el ensayo a tracción indirecta.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de resistencia a tracción indirecta de los dos tipos de mezclas asfálticas.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos de la investigación del ensayo a tracción indirecta, realizada en mezclas asfálticas de pavimento para zonas de clima templado.

## **1.5. Alcance**

El presente trabajo de investigación: “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA EN DIFERENTES TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA”, se enmarca en una investigación de tipo explicativo o causal y diseño experimental.

La investigación de tipo explicativo o causal está orientado a determinar la causa y efecto de un fenómeno específico, a fin de establecer una solución apropiada para la obtención de resultados o valores representativos u óptimos de resistencia en mezclas asfálticas, elaboradas en caliente con cemento asfáltico, (C. A. 85/100) y en frío con

emulsión tipo RR-2C de rotura rápida, a través del ensayo a tracción indirecta (método brasileño), para que la misma sea aplicada como referente o una nueva alternativa de control en mezclas asfálticas.

De esta manera la investigación está enfocada en un diseño experimental, debido a que la variable independiente es manipulada y la variable dependiente será sometida a medición, para la obtención de resultados.

Por tanto, el presente trabajo de investigación será de utilidad, ya que aportará con nuevos conocimientos al plantear la alternativa del método brasileño de tracción indirecta para que sirva como herramienta de control y a su vez asegure la calidad de las mezclas durante su elaboración, por lo que las capas asfálticas tengan un mejor desempeño una vez puesta en servicio.

## 1.6. Hipótesis

El ensayo a tracción indirecta en especímenes de mezclas asfálticas elaboradas en frío y en caliente, proporciona resistencias altamente confiables.

## 1.7. Conceptualización de las variables

- **Variable independiente:** Tipos de mezcla asfáltica.

**Tabla 1.1** Variable independiente

| Independiente               | Operacionalización                                       |                             |                    |                              |
|-----------------------------|--|-----------------------------|--------------------|------------------------------|
| Variable nominal            | Conceptualización  | Dimensión                   | Indicador          | Valor/acción técnicas a usar |
| Tipos de mezclas asfálticas | Consiste en un agregado mineral y materiales bituminosos | Granulometría de los áridos | %                  | Valor determinado            |
|                             |  | Tenacidad                   | Kg/cm <sup>2</sup> | -                            |
|                             |  | Cemento asfáltico           | % o gr             | Cantidad medible             |
|                             |  | Emulsión                    | % o gr             |                              |
|                             |  | Estabilidad                 | lb                 | Valor calculado              |

Fuente: Elaboración propia

➤ **Variable dependiente:** Resistencia a tracción indirecta.

**Tabla 1.2** Variable dependiente

| <b>Dependiente</b>                           | <b>Operacionalización</b>  |  |                     |                                     |
|--|--|--|---------------------|-------------------------------------|
| <b>Variable nominal</b>                      | <b>Conceptualización</b>   | <b>Dimensión</b>                                 | <b>Indicador</b>    | <b>Valor/acción técnicas a usar</b> |
| Resistencia a tracción de mezclas asfálticas | Deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica y llevarla a la rotura por tracción a lo largo del plano diametral | Resistencia a tracción indirecta                 | Kgf/cm <sup>2</sup> | Valor calculado                     |
|  |  | Determinación de parámetro de control de mezclas | -                   | -                                   |

Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO II**  
**ESTADO DE CONOCIMIENTO**

## CAPÍTULO II

### ESTADO DE CONOCIMIENTO

#### 2.1. Marco conceptual

##### 2.1.1. Mezclas asfálticas o bituminosas

Se entiende por mezcla bituminosa a la mezcla de agregados pétreos en proporciones exactas y un ligante asfáltico, de tal manera que las partículas queden cubiertas por una película continua de este último. La mezcla se fabrica de forma mecánica en centrales fijas o móviles, luego se transporta a obra, donde se extiende y se compacta.

Las operaciones de manejo, extendido y compactación también se realizan a temperaturas controladas y muy superiores a las del ambiente. Su aplicación es una de las más frecuentes en el ámbito vial, se utilizan en capas de rodadura, intermedias y de base y se caracterizan por:

- La calidad de los áridos (limpieza, resistencia mecánica).
- La viscosidad del ligante, que es betún puro o mejorado.
- La alta calidad en la mezcla (compacidad, homogeneidad, calidad de la envuelta).
- Un mayor control durante su fabricación (separación de los áridos en varias fracciones, aportación de filler).
- Su excelente comportamiento (estabilidad, durabilidad, tenacidad).
- Su calidad como capa de rodadura (regularidad, textura, comodidad).

##### 2.1.1.1. Funcionalidad de la mezcla asfáltica en un pavimento flexible

El pavimento es la estructura compuesta por varias capas de distintos materiales que se caracterizan por su utilidad estructural para transmitir y soportar cargas en las vías. Las mezclas asfálticas sirven característicamente para soportar directamente las cargas dinámicas producidas por las acciones de neumáticos y transmitir estas a las capas inferiores de la estructura del pavimento, induciendo de esta manera condiciones adecuadas de rodadura. Es por eso que se la conoce como capa de rodadura; mientras que

el resto de capas están destinadas a ser la capacidad de soporte (capacidad estructural) del pavimento.

Con el fin de determinar el posible comportamiento de la mezcla asfáltica en la estructura del pavimento, se prepara una mezcla en laboratorio en la que se analiza principalmente tres propiedades.

**Densidad.** Es el peso de un volumen específico de mezcla. La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón y la densidad obtenida in situ se expresa como un porcentaje de la misma.

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

**Contenido de asfalto.** El contenido total de asfalto, es la cantidad necesaria que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla, manejo y durabilidad. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es decir, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados, para que estos tengan una manejabilidad aceptable.

#### **2.1.1.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas**

El diseño de una mezcla asfáltica consiste, de un modo muy general, en seleccionar el tipo y la granulometría de los áridos a utilizar, más el tipo y el contenido de ligante, de manera tal que se cumplan los requerimientos específicos del proyecto para obtener las propiedades pretendidas en una mezcla.

Por tanto, se entiende por diseño al proceso de selección de los componentes que intervienen en una mezcla de tal modo de lograr un balance deseado en estas propiedades. También debe considerarse que esta selección estará influenciada por la sección estructural del firme, es decir que la función de la capa bituminosa puede variar, por lo que siempre deberá tenerse en cuenta que el diseño de mezcla y el diseño estructural están relacionados de modo interactivo.

Monismith, Finn y Vallerga han resumido una lista de las propiedades de la mezcla que deben considerarse en el diseño, con los factores que pueden influir en ellas y que se describen a continuación.<sup>1</sup>

**Tabla 2.1.** Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

| <b>Propiedad</b>             | <b>Definición</b>  | <b>Variables que pueden influir</b>  |
|------------------------------|--|--|
| Rigidez                      | Relación entre tensión y deformación a una temperatura y tiempo de carga dados   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Rigidez del betún</li> <li>- Grado de compactación</li> <li>- Sensibilidad al agua</li> </ul>  |
| Estabilidad                  | Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos períodos de aplicación de carga)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Textura superficial del árido</li> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Rigidez del betún</li> <li>- Contenido de betún</li> <li>- Grado de compactación</li> <li>- Sensibilidad al agua</li> </ul> |
| Durabilidad                  | Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción abrasiva del tráfico  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contenido de betún</li> <li>- Naturaleza del betún</li> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Grado de compactación</li> <li>- Sensibilidad al agua</li> </ul>                                       |
| Resistencia a la fatiga      | Habilidad de la mezcla a flexionar repetidamente sin romperse  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Contenido de betún</li> <li>- Grado de compactación</li> <li>- Rigidez del betún</li> <li>- Sensibilidad al agua</li> </ul>  |
| Resistencia a la fisuración  | Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Tipo de árido</li> <li>- Contenido de betún</li> <li>- Grado de compactación</li> <li>- Rigidez del betún</li> </ul>   |
| Resistencia al deslizamiento | Capacidad de la mezcla para proveer un adecuado coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento bajo condiciones húmedas | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Textura y resistencia pulimento del árido</li> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Contenido de betún</li> </ul>   |
| Permeabilidad                | Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulometría del árido</li> <li>- Contenido de betún</li> <li>- Grado de compactación</li> </ul>   |

Fuente: Elaboración propia

<sup>1</sup> Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/3406514.pdf?sequence=14&isAllowed=y>.

## **2.1.2. Clasificación de las mezclas asfálticas**

Existen diferentes tipos de mezclas asfálticas o bituminosas, dependiendo de los parámetros que estén dispuestos para el análisis del investigador, entre ellos se tienen a los siguientes.

### **2.1.2.1. Por fracciones de agregado pétreo empleado**

- **Masilla asfáltica:** Polvo mineral más ligante.
- **Mortero asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto asfáltico:** Agregado grueso más mortero.
- **Macadam asfáltico:** Agregado grueso más ligante.

### **2.1.2.2. Por el tamaño máximo del agregado pétreo**

- **Mezclas gruesas:** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- **Mezclas finas:** Se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

### **2.1.2.3. Por la granulometría**

- **Mezclas continuas:** Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- **Mezclas discontinuas:** Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

### **2.1.2.4. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica**

Según la proporción de huecos luego de la compactación, las mezclas se clasifican según la normativa española, en las siguientes:

- **Mezclas densas y semidensas:** De acuerdo a la normalización española tienen un porcentaje de huecos que varía entre el 3 y el 9%, dependiendo de la categoría de tráfico pesado que soporte la capa y de la ubicación de la misma en el firme. Son las más empleadas en capas de rodadura, puesto que su bajo porcentaje de huecos es de un 3 a un 6% en este caso - las vuelve casi impermeables.
- **Mezclas gruesas:** Se diferencian de las anteriores en la granulometría un poco más abierta, en el menor contenido de filler y de ligante. No son tan impermeables como las cerradas y por lo tanto no se aplican en capas de rodadura sino en las intermedias y de base. Mezclas abiertas: su porcentaje de huecos supera el 12%, la estructura formada adquiere resistencia por rozamiento interno.
- **Mezclas porosas o drenantes:** Su porcentaje de huecos es mayor del 20%, tienen de este modo una gran permeabilidad, permiten evacuar el agua de lluvia rápidamente al utilizarlas como capa de rodadura. Difieren de las mezclas cerradas en que su granulometría está formada por un bajo contenido de árido fino para alcanzar tanta porosidad y suelen utilizarse betunes modificados para proporcionar mayor durabilidad.

Tanto las mezclas abiertas como porosas tienen características y comportamiento muy diferentes a las cerradas y semicerradas, y en consecuencia necesitan otros métodos de dosificación y ensayos, por lo que su estudio no se incluye en este trabajo.

#### **2.1.2.5. Por la temperatura de puesta en obra**

Según sea el proceso utilizado para lograr el cubrimiento de los áridos por el ligante asfáltico, las mezclas asfálticas se dividen en:

- **Mezclas asfálticas en caliente:** Son mezclas entre agregado – asfalto que utilizan como material ligante al cemento asfáltico que no es fluido a temperatura ambiente, por tanto, requiere ser calentado a altas temperaturas hasta lograr disminuir su viscosidad a un valor requerido. En el proceso de elaboración es necesario calentar el agregado a temperaturas similares a las del ligante a fin de mantener la viscosidad y en ningún caso, la diferencia de temperatura entre el asfalto y los áridos debe ser mayor a 10 °C.

- **Mezclas asfálticas en frío:** Las mezclas asfálticas en frío se subdividen en dos grupos según el proceso utilizado para fluidificar el asfalto base:

**Mezclas en frío con asfalto rebajado,** que son la combinación árida–asfalto que utilizan como ligante un cemento asfáltico rebajado, también conocido como asfalto líquido.

**Mezclas en frío con emulsiones asfálticas,** que son mezclas árido-asfalto que utilizan como ligante el mismo cemento asfáltico empleado en caliente y en frío con asfalto rebajado, con la diferencia de que este se encuentra emulsionado en una fase acuosa.

**Tabla 2.2** Clasificación de mezclas asfálticas

| <b>Parámetros de clasificación</b>       | <b>Tipo de mezcla</b>  |
|--|--|
| Fracciones de árido empleado             | Masilla<br>Mortero<br>Hormigón<br>Macadam  |
| Temperatura de puesta en obra            | En caliente En frío  |
| Huecos en la mezcla (h)                  | Cerradas ( $h < 6\%$ )<br>Semicerradas ( $6\% < h < 12\%$ )<br>Abiertas ( $h > 12\%$ )<br>Porosas ( $h > 20\%$ ) |
| Tamaño máximo del agregado ( $t_{max}$ ) | Gruesas ( $t_{max} > 10\text{mm}$ )<br>Finas ( $t_{max} < 10\text{mm}$ )   |
| Estructura del agregado                  | Con esqueleto mineral<br>Sin esqueleto mineral   |
| Granulometría                            | Continuas<br>Discontinuas  |

Fuente: Kreamer et. At. 2004

De los diversos tipos de mezclas bituminosas existentes en la actualidad, tal como se muestra en la tabla 2.2, en el presente trabajo se limitará a dos grandes grupos de estudio: temperatura de puesta en obra (mezcla en caliente y frío optando ambos tipos) y granulometría (mezclas densas, abiertas y semicerradas se optará por la mezcla densa), para la elaboración de la mezcla en caliente se utilizara cemento asfáltico convencional

85/100 BETUNEL, y para las mezclas asfálticas elaboradas en frío será la emulsión de rotura rápida EMULTEC RR-2C.

### **2.1.3. Cemento asfáltico**

Es un material oscuro de origen natural, que actúa como ligante en las mezclas asfálticas. Es resistente a una gran cantidad de ácidos y es impermeable, lo que lo hace idóneo para la construcción de superficies de rodadura en los pavimentos flexibles.

El cemento asfáltico es un ligante denso que a la temperatura ambiente es semisólido, usualmente pegajoso y de color variable entre café muy oscuro y negro.

Una de sus principales características es su viscosidad, la cual cambia dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre sometido. Otra característica importante es su durabilidad, la cual hace referencia a la resistencia al envejecimiento, es decir su capacidad de conservar sus características iniciales con el pasar de los tiempos.

El cemento asfáltico se prepara comercialmente en 5 grados o rangos de consistencia definidos a partir del ensayo de penetración. La designación corriente de los cinco grados de cemento asfáltico utilizados en pavimentación y su significado será como se muestra a continuación:

PEN 40 – 50 Cemento asfáltico con penetración entre 40 a 50 décimas de milímetro

PEN 60 – 70 Cemento asfáltico con penetración entre 60 a 70 décimas de milímetro

PEN 85 – 100 Cemento asfáltico con penetración entre 85 a 100 décimas de milímetro

PEN 120–150 Cemento asfáltico con penetración entre 120 a 150 décimas de milímetro

PEN 200–300 Cemento asfáltico con penetración entre 200 a 300 décimas de milímetro

### **2.1.4. Emulsión asfáltica**

Se llama emulsión asfáltica a la dispersión de un sólido o un líquido (fase dispersa) en forma de glóbulos minúsculos, en un líquido no miscible con el elemento disperso (fase continua). Cuando las dos fases permanecen en equilibrio sin que las partículas en suspensión se aglomeren o se sedimenten, se dice que la emulsión es estable. Ciertas emulsiones exigen la presencia de un agente emulsificador para conservar la estabilidad.

Las emulsiones asfálticas son dispersiones en agua de glóbulos asfálticos de dos a cinco micrones de diámetro, que se mantienen estables en presencia de un agente emulsificante que pueden ser ácidos grasos o resinas con bases fuertes que son normalmente utilizados para la fabricación de emulsiones aniónicas o los resultantes de la acción de ácidos minerales sobre compuestos amínicos que son usados para la elaboración de emulsiones catiónicas.

El contenido de asfalto de las emulsiones bituminosas para la pavimentación varía normalmente entre 50 y el 65% del peso total.<sup>2</sup>

Los glóbulos de asfalto contenidos en una emulsión están cargados con electricidad que pueden ser positivas o negativas dando origen a las emulsiones catiónicas o aniónicas respectivamente.

Cuando dos fases de una emulsión asfáltica se disocian completamente separándose netamente de la fase acuosa se dice que ocurre un rompimiento de la emulsión.

El rompimiento de una emulsión asfáltica es provocado por una modificación en el equilibrio electroestático que mantiene a los glóbulos de asfalto en suspensión en la fase acuosa y que puede deberse a la evaporación de esta última, a cambios notables de su pH o a la reacción entre la fase acuosa y el material pétreo.

**Figura 2.1** Esquema de rompimiento de la emulsión asfáltica



Fuente: Chova del Ecuador, Bitumix, Boletín técnico, pag 6

<sup>2</sup> Fuente: Montejo Alfonso, Ingeniería de pavimentos. Tomo 2, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2006, pag.46

#### 2.1.4.1. Propiedades de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas poseen propiedades que condicionan las características de la misma y su comportamiento. Entre las principales propiedades están las siguientes:

- Estabilidad al almacenamiento.
- Estabilidad ante los agregados pétreos.
- Grado de adhesividad
- Viscosidad
- Características reológicas.

#### 2.1.4.2. Tipos de emulsión asfáltica

Según la estabilidad de las emulsiones asfálticas, estas se pueden clasificar en emulsión de rompimiento rápido, de rompimiento medio y de rompimiento lento.

**Emulsión de rotura rápida:** Es un sistema constituido por la dispersión de una fase asfáltica en una fase acuosa, presentando partículas cargadas positivamente. Normalmente se utiliza en los siguientes tipos de servicio: tratamiento superficial simple, tratamiento superficial múltiple, capa de sellado / baño diluido, pintura adhesiva y macadán bituminoso.

Estas emulsiones están diseñadas para reaccionar rápidamente con el árido revirtiendo su estado de emulsión al de asfalto, formando una película relativamente gruesa. Estas emulsiones se aplican normalmente mediante riego, presentando una excelente performance en diferentes zonas geográficas a distintas altitudes y climas

Generalmente se aplica a temperatura ambiente, que puede variar entre 25° C y 70° C; sin embargo, siempre se debe respetar la temperatura de aplicación ideal en función de su viscosidad. Nunca deben calentarse por encima de los 70° C.

**Emulsión de rotura media:** Estas emulsiones están diseñadas para mezclarse con agregados gruesos y no rompen inmediatamente al entrar en contacto con el árido. Se utilizan en mezclas que permanecen trabajables por algunos minutos, las cuales deben realizarse en plantas, ya sean móviles o fijas.

**Emulsión de rotura lenta:** Estas emulsiones están diseñadas para máxima estabilidad de mezclado. Se utilizan con agregados de gradación densa y alto contenido de finos. Poseen largos periodos de trabajabilidad para asegurar una buena mezcla con los agregados. Los grados de rotura lenta presentan bajas viscosidades. Las emulsiones lentas dependen totalmente de la evaporación para alcanzar la coalescencia de las partículas de asfalto. Para acelerar el proceso de ruptura se puede agregar cemento o cal hidratada a los agregados.

#### **2.1.4.3. Agregados pétreos**

La denominación técnica de “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas y finos. En términos generales, en un ensayo de granulometría por cribado o tamizado, las partículas con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm son reconocidas como gravas. Aquellas con diámetro entre 0.075 mm y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0.075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla.

Los agregados pétreos en un pavimento flexible, se encuentran en diferentes granulometrías, desde la base, hasta la carpeta asfáltica, teniendo en cuenta que en la capa donde se exigen más es donde se ubica la mezcla asfáltica. “En estos últimos materiales los agregados conforman entre el 88% y el 96% de la masa y más del 75% del volumen”.

Los agregados deben cumplir con ciertas características para que así nuestras mezclas se desempeñen de mejor manera, ya que de ellos depende una gran parte del comportamiento de las mezclas.

La idoneidad de estos agregados recae sobre sus características tales como la granulometría, durabilidad, textura, porosidad, forma, afinidad con el asfalto, etc.

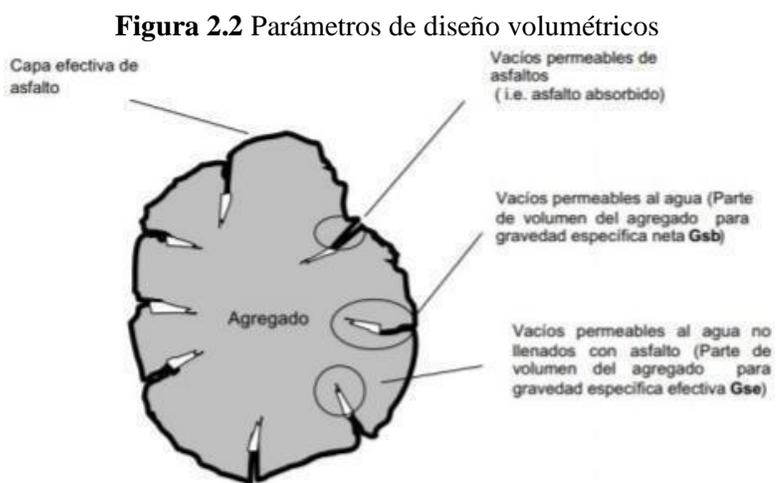
#### **2.1.5. Diseño de mezclas asfálticas**

En el estudio de mezclas asfálticas no resulta importante tan solo entender a los agregados y al asfalto por separado, sino su funcionamiento en conjunto a través de su mezcla en porciones adecuadas que puedan tener un buen desempeño apegado a las especificaciones técnicas.

El método Marshall de diseño de mezcla HMA fue desarrollado originalmente por Bruce Marshall en la década de 1940, mientras trabajaba para el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El procedimiento fue posteriormente adoptado y refinado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Una amplia gama de ingenieros y organizaciones han propuesto mejoras y variaciones a este procedimiento de diseño, las publicaciones del Instituto de Asfalto son consideradas por muchos como las mejores referencias para este y muchos otros métodos de diseño mixto (NCRHP, 2011).

### 2.1.6. Características volumétricas de las mezclas asfálticas

Para evaluar el comportamiento y desempeño de una MAC preparada en laboratorio y cuando sea puesta en servicio, es necesario definir algunas características principales dentro de sus propiedades volumétricas que se determinan usando medidas de masa y/o volumen de la mezcla y/o sus componentes individuales, tanto del asfalto como del agregado.



Fuente: [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)

#### Gravedad específica bruta “Bulk” ( $G_{mb}$ )

La misma se la puede definir como la relación entre el peso de una unidad de volumen de mezcla asfáltica caliente compactada y el peso de un volumen igual de agua (incluyendo vacíos permeables como parte de dicho volumen). (Haddock, 2011) Es importante conseguir un elevado  $G_{mb}$  en las mezclas compactadas en un pavimento terminado, puesto que se pretende alcanzar un desempeño óptimo que perdure. El  $G_{mb}$

de una mezcla se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 ó ASTM D2726. El resultado obtenido en el laboratorio se lo considera como una densidad de referencia, y es empleada como guía para verificar si la densidad de las capas asfálticas compactadas es óptima. (Asphalt Institute, 1992).

$$Gmb = \frac{A}{B - C}$$

Donde: A = Masa de la muestra en el aire (gr.)

B = Masa de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr.)

C = Masa de la muestra en agua (gr.)

### **Densidad máxima teórica (Gmm)**

La densidad máxima teórica es la relación entre la masa de una unidad de volumen de mezcla asfáltica sin compactar, y la masa de un volumen de agua (incluyendo vacíos permeables como parte del volumen). Este valor es comúnmente conocido como gravedad "RICE". (Haddock, 2011)

El ensayo RICE es utilizado para encontrar la densidad o gravedad específica máxima teórica, empleando las normas ASTM D 2041, y AASHTO T 209. Dichas normas establecen el procedimiento necesario para obtener la gravedad o densidad teórica máxima de mezclas asfálticas que no hayan sido compactadas, y que se encuentren a 25°C de temperatura.

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

Donde: A = Peso picnómetro + agua (gr.)

B = Peso picnómetro + agua + material (gr.)

C = Peso de la mezcla suelta (gr.)

### **Porcentaje de vacíos con aire (Va)**

Los vacíos con aire corresponden al volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado revestidos que conforman la mezcla de pavimentación. El "Va" es

el porcentaje de vacíos respecto al volumen total de la muestra compactada. (Asphalt Institute, 1997)

En una mezcla es preciso que algún porcentaje de vacíos esté contenido dentro de las mezclas densamente graduadas, para que el asfalto pueda expandirse. Usualmente en los diseños Marshall los porcentajes de vacíos autorizados (en mezclas asfálticas de laboratorio) pueden variar entre 3 y 5 por ciento para capas superficiales (Asphalt Institute, 1992).

$$Va = 100 * \left( \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \right)$$

Donde: Va = Vacíos de aire en la mezcla compactada, en porcentaje del volumen total.

Gmm = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

Gmb = Gravedad específica de una mezcla compactada.

### **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios intergranulares de aire entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación que incluye los huecos de aire y el contenido efectivo de asfalto, expresado como un porcentaje del volumen total. (Asphalt Institute, 1997)

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bruta del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. Por lo tanto, el VMA se puede calcular restando el volumen del agregado determinado por su peso específico bruto, del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. (Asphalt Institute, 1997).

$$VMA = 100 * \left( \frac{Gmb * Ps}{Gsb} \right)$$

Donde: Gsb = Gravedad específica bruta del agregado.

Gmb = Gravedad específica bruta de las briquetas compactadas.

Ps = Porcentaje o contenido de agregados.

### Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Los vacíos rellenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de espacios intergranulares vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran ocupados por asfalto, es decir es el porcentaje de los VMA que están llenos de asfalto efectivo. (Asphalt Institute, 1997).

$$VFA = \frac{100 * (VMA - Va)}{VMA}$$

Donde: VFA = Volumen llenos de asfalto, en %.

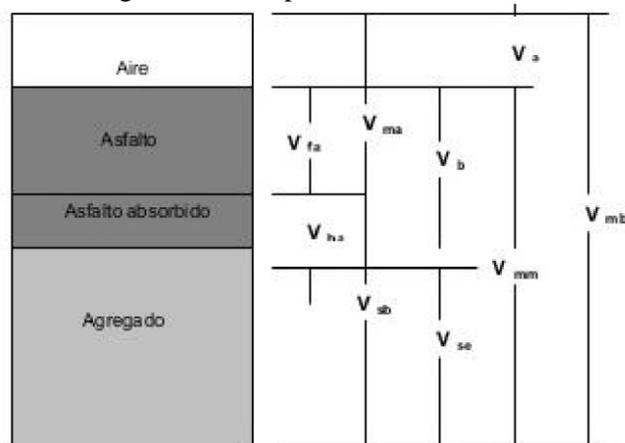
Va = Porcentaje de vacíos con aire.

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

### Contenido de asfalto efectivo (Pbe)

Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

**Figura 2.3** Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica



Fuente: [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)

Donde:

V<sub>ma</sub> = Volumen de vacíos en agregado mineral V

V<sub>mb</sub> = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V<sub>mm</sub> = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos

V<sub>fa</sub> = Volumen de vacíos llenados con asfalto

$V_a$  = Volumen de vacíos de aire

$V_b$  = Volumen de asfalto

$V_{ba}$  = Volumen de asfalto absorbido

$V_{sb}$  = Volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)

$V_{se}$  = Volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

### **2.1.7. Ensayos sobre mezclas**

Dentro de los ensayos utilizados, muchos son empíricos y se aceptan a través de comparaciones entre los resultados con ellos obtenidos y la experiencia de obra. Presentan el inconveniente que el modo de sollicitación es muy diferente del existente en el firme y no permiten determinar una característica intrínseca del material.

Estos ensayos empíricos pueden proveer importante información siempre y cuando se respeten los límites y criterios utilizados al interpretar los resultados, es decir, es muy importante tener en cuenta en la aplicación de estos ensayos su campo de validez. Solo pueden aplicarse a la caracterización de mezclas cuando experimentalmente se haya comprobado una buena correlación entre los resultados obtenidos en laboratorio y su comportamiento real en el firme.

También existen los ensayos de simulación, que intentan reproducir en laboratorio las sollicitaciones que producen el fallo en el firme, del modo más aproximado posible.

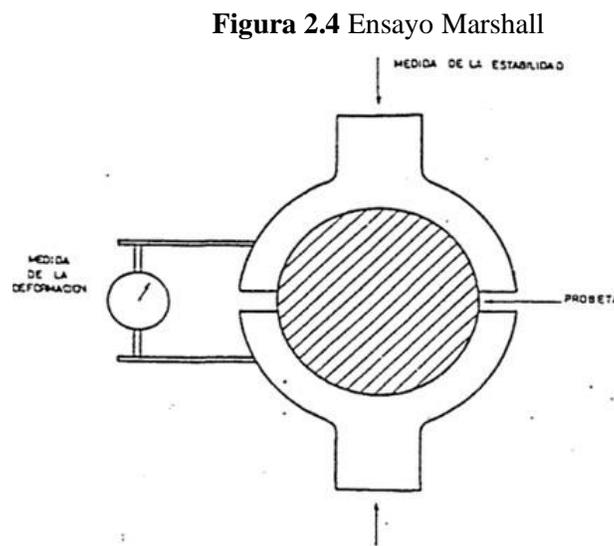
En todos los ensayos es fundamental que las condiciones de los mismos estén referidas al rango de temperaturas y sollicitaciones que experimentará la mezcla en el pavimento durante su vida de servicio.

### **2.1.8. Ensayo Marshall Flujo y Estabilidad**

El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos, y se basa en un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura, compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados, y precalentadas

a 60s C, mediante la aplicación de una carga vertical a través de una mordaza perimetral y a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min. El método establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

En la figura 2.4 se observa un simple esquema de la probeta rodeada por las mordazas a través de las cuales se aplica la carga hasta la rotura.



Fuente: [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)

**Estabilidad Marshall:** es un índice de la resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada y está definido como el número total de Newton requeridos para que falle un espécimen de mezcla asfáltica compactada a una temperatura de 60°C

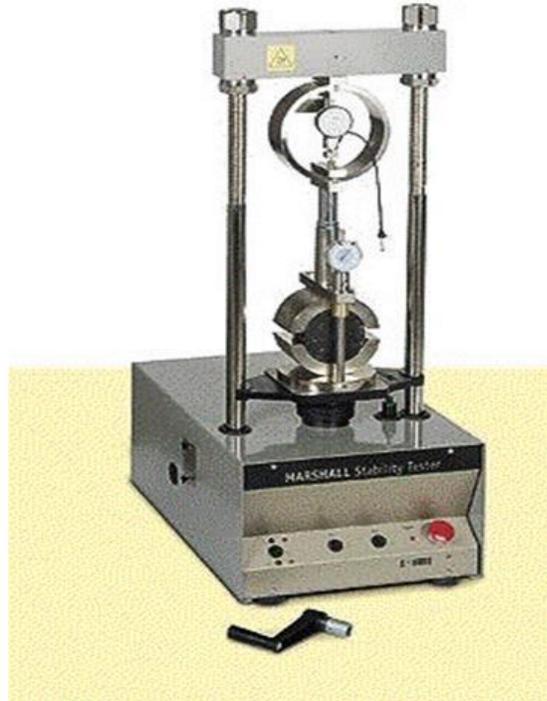
**Flujo:** es un indicador de su flexibilidad y pérdida de resistencia a la deformación, el flujo Marshall el valor en 1/100mm que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la falla de la probeta.

### Equipo requerido para el ensayo Marshall

Máquina de ensayo Marshall, con dispositivo eléctrico, diseñada para aplicar las cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para el ensayo

de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo.

**Figura 2.5** Equipo Marshall



Fuente: [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)

### **2.1.9. Ensayo de Tracción Indirecta**

#### **Generalidades**

El ensayo de tracción indirecta fue desarrollado por Thomas Kennedy, es un ensayo que se destaca por su sencillez de ejecución y confiabilidad en sus resultados al mostrar poca dispersión. Este ensayo, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

La determinación de la resistencia a Tracción Indirecta en las mezclas asfálticas representa un parámetro mecánico, que puede resultar una herramienta sumamente útil para evaluar la calidad del proceso constructivo de la capa asfáltica, valorando la cohesión de la mezcla. El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa de asfalto o zona de tracción.

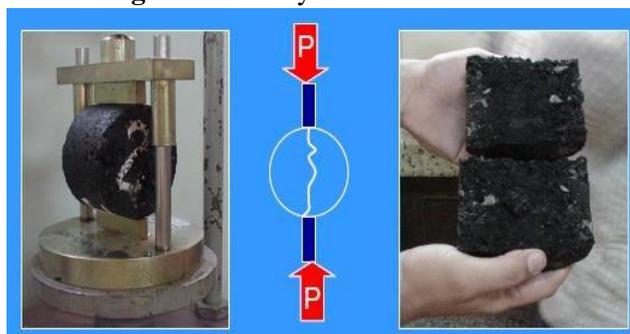
### 2.1.9.1.Descripción del ensayo

El ensayo de tracción indirecta es un método práctico y simple para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar las fallas causadas por tensiones de tracción.

Este ensayo consiste en deformar por compresión diametral a una probeta cilíndrica aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura por tracción a lo largo del plano vertical diametral.

Las probetas son de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura, iguales a las utilizadas en el ensayo Marshall. Permite calcular la resistencia a tracción que está relacionada con la cohesión de la mezcla.

**Figura 2.6** Ensayo de resistencia a la tracción

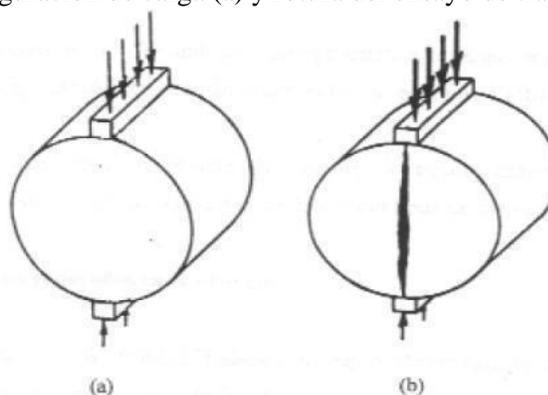


Fuente: (Ensayos para diseño de mezclas asfálticas. Julia Eugenia R., Universidad del Cauca)

Para la ejecución del ensayo se prepara la briqueta ubicándola en un cabezal Lottman, el cual posee unas barras de superficie que se acoplan a la superficie de las briquetas; estas se ubican en lados opuestos, a manera de generatrices. La probeta es sometida a una compresión diametral uniforme, y la velocidad de carga es igual a 50.8 mm/min.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

**Figura 2.7** Configuración de carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b)



Fuente: upcommons.upc.edu

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo.

Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

Por la norma la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 50,8 mm/min, igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de  $25 \pm 1$  °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan.

El Departamento de carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15 - 20%.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo de tracción indirecta no solo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también nos informa sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas.

#### **2.1.9.2. Aplicación del ensayo de Tracción Indirecta**

El ensayo a tracción indirecta indicada en la norma NLT-346/96 consiste en ensayar especímenes a compresión diametral aplicando una carga estática a una velocidad constante de 50,8mm/min.

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la resistencia a compresión diametral, tracción indirecta, de mezclas asfálticas o bituminosas utilizadas en pavimentación de carreteras. El procedimiento se emplea tanto para probetas del material fabricado en laboratorio o en obra como para las probetas o testigos extraídas del pavimento.

Este método de ensayo permite, por una parte, definir un parámetro capaz de caracterizar la mezcla asfáltica y por otra, optimizar en función del contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante.

#### 2.1.9.2.1. Equipo utilizado para el ensayo

**Prensa:** Para ensayar las briquetas se empleará cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de  $0,85 \pm 002$  mm/s y una carga de 100 kN (10 kgf) como mínimo.

La prensa utilizada para el ensayo Marshall que se describe en la norma NLT-159 cumple con las características requeridas para este ensayo, lo cual la hace adecuada para satisfacer el objeto de la presente norma (NLT-346/96).

A continuación, se muestra las especificaciones de la prensa Marshall.

**Tabla 2.3** Especificaciones de la prensa Marshall

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Capacidad</b>             | Dial marca 44,5 KN (10000 lbf) máxima.  |
| <b>Anillo de carga</b>       | 30 KN (6744 lbf) de capacidad.  |
| <b>Controles</b>             | Interruptor de funcionamiento arriba/abajo/parada con pilotos indicadores del límite de funcionamiento. |
| <b>Motor</b>                 | 3/4 CV., reversible.  |
| <b>Velocidad</b>             | 50,8 mm (2 pulg.) por minuto.   |
| <b>Carrero</b>               | 64 mm (2,5 pulg.) máximo.   |
| <b>Apertura</b>              | 254 mm (10 pulg.) entre montantes; 191 mm (7-1/2 pulg.) entre el platino y el pistón de carga.          |
| <b>Dimensiones generales</b> | 356 mm o. x 584 mm p. a 1016 mm a. (14 pulg. a 23 pulg. a 40 pulg.).                                    |
| <b>Pesa</b>                  | Neto 84 kg (185 libras); embalado 91 kg (200 libras).   |

Fuente: NLT-159/00

**Figura 2.8** Prensa Lottman

Fuente: [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)

**Recinto termostático:** Un recinto de capacidad suficiente para guardar las probetas para el ensayo y mantenerlas a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C, y en el caso de variación a la que se requiera.

**Calibrador:** Para medir con precisión de  $\pm 0,1$  mm el diámetro y la altura de las briquetas para el ensayo.

**Dispositivo de sujeción de la probeta:** El dispositivo permitirá la sujeción mediante contacto de la probeta por sus caras planas, utilizando dos tornillos de ajuste, así como la colocación de la probeta de forma que dos de sus generatrices, diametralmente opuestas estén contenidas en el plano diametral perpendicular a los platos de la prensa. El contacto de estas dos generatrices con los elementos transmisores de la carga se puede hacer por medio de dos bandas de apoyo de madera contrachapada o cartón sin defectos, de 3 mm de espesor, 25 mm de ancho y de longitud igual o ligeramente superior a la generatriz de la probeta. Las bandas de apoyo no se utilizarán en más de un ensayo. También se puede situar la probeta directamente entre los dos platos de la prensa, siempre que se asegure el paralelismo entre ellos durante la carga, que es nuestro caso. **Sistema de medida** ( $\pm 0,01$  mm) de desplazamiento vertical.

**Sistema de medida** ( $\pm 0,01$  mm) de desplazamiento horizontal.

### 2.1.10. Distribución teórica de tensiones

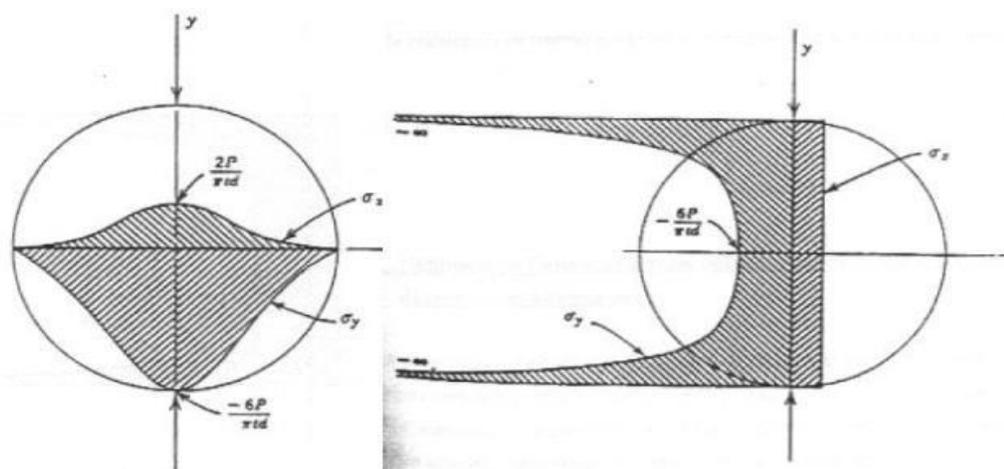
La solución teórica de la distribución de tensiones dentro de una probeta cilíndrica está basada en el análisis de un material de comportamiento elástico y lineal.

Cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión diametral desarrolla un estado de tensiones bidimensional en su interior. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción.

El análisis de rotura de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas sometidas a compresión diametral demuestra que la fisura inicial ocurre cuando la tensión horizontal de tracción desarrollada en el plano vertical de carga alcanza el valor de la resistencia a tracción del material

Tomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson desarrollaron las tensiones teóricas que se dan en una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en el ensayo de tracción indirecta. Esta distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontales y verticales para una carga concentrada.<sup>3</sup>

**Figura 2.9** Distribución teórica sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta



Fuente: [upcommons.upc.edu](https://upcommons.upc.edu)

<sup>3</sup> Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf>

### 2.1.11. Distribución de tensiones en el plano horizontal

En la distribución de tensiones en el diámetro horizontal, se puede observar que en el centro de la probeta el esfuerzo de compresión vertical es 3 veces superior al de tracción horizontal.

Las tensiones producidas en el diámetro horizontal son las siguientes:

**Tensión horizontal:**

$$\sigma_x = \frac{2 * P}{\pi * t * d} * \left[ \frac{d^2 - 4 * x^2}{d^2 + 4 * x^2} \right]$$

**Tensión vertical:**

$$\sigma_y = -\frac{2 * P}{\pi * t} * \left[ \frac{2}{d - 2 * y} + \frac{2}{d + 2 * y} - \frac{1}{d} \right]$$

**Tensiones tangenciales:**

$$\tau_{xy} = 0 \text{ Donde:}$$

P = Carga total aplicada (N).

t = Altura de la probeta (mm ± 0,1mm).                      d

= Diámetro de la probeta (mm ± 0,1mm).                      x, y =

Coordenadas respecto al centro de la probeta.

### 2.1.12. Distribución de tensiones en el diámetro vertical

En la zona central de la probeta, se produce un estado biaxial de tensiones, donde la tensión vertical de compresión es 3 veces superior a la de tracción horizontal generada.

Así mismo se puede ver cómo los máximos de tensión vertical se localizan en los puntos de aplicación de la carga vertical. Por este motivo se puede pensar que la rotura se puede iniciar en estos puntos por agotamiento a compresión, pero realmente estas tensiones son pequeñas debido a que en la práctica la carga aplicada se distribuye en un área finita definida por una pieza metálica de contacto entre la prensa y la probeta.

Cabe mencionar que tanto el tipo de carga como la anchura de esta pieza metálica tienen una gran influencia en la distribución de tensiones de la probeta real. Las tensiones en el diámetro vertical, a lo largo del eje de carga, son las siguientes:

**Tensión horizontal:**

$$\sigma_x = \frac{2 * P}{\pi * t * d} = cte$$

**Tensión vertical:**

$$\sigma_y = -\frac{2 * P}{\pi * t} * \left[ \frac{2}{d - 2 * y} + \frac{2}{d + 2 * y} - \frac{1}{d} \right]$$

**Tensiones tangenciales:**

$$\tau_{xy} = 0 \text{ Donde:}$$

P = Carga total aplicada (N).

t = Altura de la probeta (mm  $\pm$  0,1mm).                      d

= Diámetro de la probeta (mm  $\pm$  0,1mm).                      x, y =

Coordenadas respecto al centro de la probeta.

**2.1.13. Tensión de rotura**

Las ecuaciones descritas anteriormente son válidas para un sólido elástico lineal idealizado. Aunque la mayoría de los materiales no son elásticos, los valores de tensión horizontal se aproximan suficientemente a los reales. El fallo inicial se produce por rotura a tracción, por lo tanto, la resistencia a tracción indirecta en el momento de la rotura viene dada por la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{2 * P_{max}}{\pi * t * d}$$

Donde:  $S_t$  = Es la resistencia a la rotura por tracción

indirecta.                      P = Es la carga máxima o carga de rotura

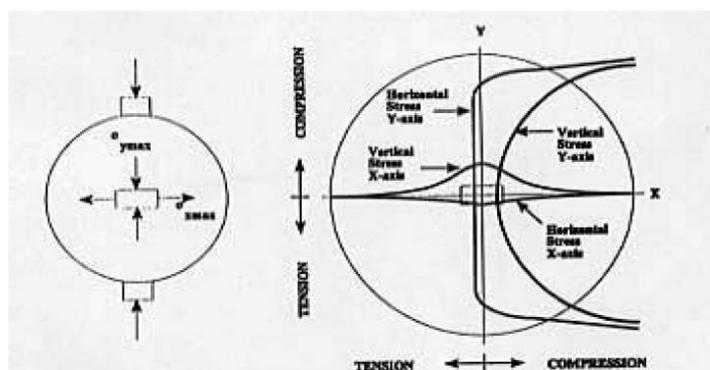
t = Es el espesor o altura de la probeta de la probeta

d = Es el diámetro de la probeta

$x, y$  = Son las coordenadas respecto al centro de la probeta.

De acuerdo a estas condiciones de carga lineal, la probeta fallaría alrededor de los puntos de carga debido a tensiones de compresión y no en la porción central de las muestras debido a tensiones de tracción. No obstante, estas tensiones de compresión se reducen considerablemente distribuyendo la carga a lo largo de una placa de carga, que no sólo reduce las tensiones de compresión vertical, sino que cambia las tensiones horizontales a lo largo del diámetro vertical de tracción a compresión cerca de los puntos de aplicación, quedando entonces una distribución de tensiones.

**Figura 2.10** Distribución de tensiones en probeta sometida a una carga aplicada sobre placa de carga de apoyo



Fuente: [upcommons.upc.edu](http://upcommons.upc.edu)

#### 2.1.14. Rangos de confiabilidad de resistencia a tracción indirecta

Este ensayo puede utilizarse para el proyecto y también para el control de calidad de las mezclas bituminosas durante su fabricación o durante la puesta en obra.

Si consideramos que el ensayo de tracción indirecta simula el estado de tensión en la posición más baja de la capa de mezclas asfálticas, esto lo convierte en una herramienta interesante para utilizarla como un ensayo clave en el estudio de las mezclas bituminosas. Con el valor añadido que es un ensayo simple y práctico, los resultados de la prueba no se ven afectados por las condiciones superficiales de la probeta. Así mismo se ha visto que la rotura se produce en una zona de tensiones constante, lo que implica una baja dispersión en los resultados.

Roque R. y B. Ruth demostraron que el módulo a temperaturas inferiores a 30°C suponiendo un comportamiento elástico de la capa, calculado utilizando una galga

extensométrica en la zona de tensiones constante mediante el ensayo de tracción indirecta, da una excelente predicción de la tensión y la deflexión del pavimento en servicio. Este hecho demuestra que el valor del módulo obtenido con el ensayo de tracción indirecta es un buen estimador del módulo de la capa del pavimento.

Las conclusiones que extrajo fueron que:

“El ensayo de tracción indirecta es relativamente sencillo y rápido de realizar con probetas cilíndricas extraídas del pavimento, con pocas dispersiones en los resultados y muy apto para realizar controles rutinarios. La línea seguida en todos estos estudios parece la correcta y la administración federal de carreteras de los EEUU (FHWA) ha invertido en esta dirección de estudio con los siguientes objetivos: - Seleccionar un ensayo y un método de pruebas simples que permitan al ingeniero determinar las características fundamentales para el diseño estructural de los pavimentos. Una vez seleccionado, se busca una fácil repetitividad del ensayo, para que los resultados nos permitan determinar unos valores fiables de las características mecánicas que buscamos (módulo de rigidez, coeficiente de Poisson, fatiga).”

La investigación realizada por Baladi y encargada por la FHWA busca estos objetivos con la ayuda del ensayo de tracción indirecta. Aunque una revisión extensa de la literatura de los diferentes ensayos determinó que los resultados del ensayo a tracción indirecta eran los más prometedores, tenían el problema de que había gran dispersión. Para solucionar esta falta de constancia Baladi y el equipo de la universidad de Michigan diseñaron un nuevo instrumento adaptable al ensayo de tracción indirecta, con las siguientes características:

- La deformación del espécimen ensayado se puede medir en 3 direcciones utilizando uno o dos sensores en cada dirección.
- El aparato de medida se puede utilizar con diferentes sistemas de carga: hidráulica o triaxial, con un sistema de guía para evitar posibles rotaciones y oscilaciones.
- Facilita la alineación en cualquier tipo de prensa y la utilización de sensores LVTD.

A partir de los resultados de los ensayos y los análisis analíticos y estadísticos, dan a conocer las siguientes conclusiones:

- Con el nuevo equipo de tracción indirecta los resultados son constantes, razonables y se pueden reproducir exactamente para cualquier combinación de variables.
- La dispersión de resultados entre especímenes ensayados con la misma dosificación y condiciones de ensayo da valores inferiores al 7%.
- La temperatura de ensayo y el porcentaje de huecos en la mezcla son las variables que tienen más influencia en las características resilientes de la mezcla.

En el trabajo de investigación realizado conjuntamente la Universidad Carleton (Ottawa) y la Universidad Al-Azhar (El Cairo), se demuestra que los criterios convencionales de diseño no proveen un indicador confiable para la selección de la mezcla más eficiente y que el uso de un criterio que incluya la Tracción Indirecta de la mezcla ofrecería un método de diseño más confiable. Basado en los resultados de ensayos de laboratorio se demuestra también que este ensayo detecta la influencia del tipo de betún en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas. Con la tesis doctoral realizada por Adriana Martínez sobre la elaboración de una propuesta de asegurar la calidad de ejecución de las mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta, se vuelve a dar otro paso adelante en la aplicación del ensayo a tracción indirecta. El estudio busca asegurar la calidad de ejecución de las mezclas bituminosas a través del estudio de las variables que tienen una mayor influencia en el comportamiento mecánico de las mezclas. Para ello se evaluaron en cada caso la resistencia a tracción indirecta, densidad, porcentaje de huecos y deformación.

En la tesis se demuestra una correlación entre la compacidad y la resistencia a tracción de las mezclas evaluadas en laboratorio, siendo la tracción indirecta un parámetro más sensible que el nivel de compactación para detectar cambios en las variables estudiadas.

## **2.2. Marco normativo**

Para realizar el ensayo de Tracción Indirecta que es el tema central de la presente investigación, se hará uso de la Norma de ensayo NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas”, es importante mencionar que la prensa utilizada para el ensayo Marshall, descrita en la Norma NLT-159/00 cumple con los parámetros requeridos para el ensayo de tracción, por tanto, es la adecuada para emplearla en este ensayo.

A continuación, se muestra un resumen de los ensayos requeridos para la elaboración y evaluación de mezclas asfálticas como capa de rodadura. **Tabla 2.4** Ensayos requeridos para la elaboración de mezclas asfálticas

| Material   | Ensayo  | Norma  |               | Descripción  | Cantidad mínima de material para el ensayo | Especificación y/o Disposición                    |  |
|--|---|--|---------------|--|--|---|--|
|  |   | ASTM   | AASHTO        |  |  |   |  |
| Agregados  | Granulometría por tamizado (Diseño de Mezcla asfáltica)       | C 136<br>C 117   | T 27<br>T 11  | Cumplimiento de requisitos de calidad y la verificación de las características de resistencia y durabilidad  | 60 kg                                      | CR-2010.<br>Sección: 703.7                        |  |
|  | Caracterización de los agregados (Diseño de mezcla asfáltica) | Abrasión de los Ángeles                                  |               |  | T 96                                       | 150 kg  | CR-2010.<br>Subsecciones 418.04.02.02, 418.04.02.03 y 418.04.02.04 |
|  |   | Disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio (5 ciclos) | ---           |  | T 104                                      |   |  |
|  |   | Límite líquido   | D 4318        |  | T 89                                       |   |  |
|  |   | Índice de durabilidad agregado grueso y agregado fino    | ---           |  | T 210                                      |   |  |
|  |   | Caras fracturadas  | D 5821        |  | ---  |   |  |
|  |   | Libre de materia orgánica, grumos o arcillas             | ---           |  | ---  |   |  |
|  |   | Índice de plasticidad                                    | D 4318        |  | T 89                                       |   |  |
| Asfalto  | Clasificación por viscosidad a 60oC                           | Norma RTCA   |               | Caracterización del asfalto para cumplimiento de calidad y propiedades de diseño de la mezcla asfáltica  | 2 galones                                  | CR-2010.<br>Sección 702.01                        |  |
|  | Clasificación por penetración a 25oC                          | Norma RTCA   |               |  | 2 galones                                  |   |  |
| Mezcla asfáltica<br>Diseño en planta o antes de colocación | Graduación de agregados                                       | ---  | T 30<br>T 308 | Análisis granulométrico según el tipo de mezcla asfáltica  | 3 kg                                       | CR-2010.<br>Subsección 418.04.02.01               |  |
|  | Contenido de asfalto  | ---  | T 308         | Evaluación del contenido de asfalto, comparándolo con el de diseño y fórmula de trabajo  | 3 kg                                       | CR-2010. Subsección 418.06.02                     |  |
|  | Contenido de agua   | D 95   | ---           | Determinación del contenido de agua en la mezcla   | 1 kg                                       | ---   |  |
|  | Densidad de la mezcla   | D 2726<br>D2041  | T 245<br>T209 | Determinación de las densidades para obtener los porcentajes de vacíos en la mezcla  | 10 kg                                      | CR.2010<br>Sección: 402.17 y Subsección 418.06.02 |  |
|  | Porcentaje de vacíos de aire                                  | ---  | ---           | Verificación del cumplimiento del porcentaje de vacíos de diseño   | 12 kg                                      | CR-2010<br>Sección: 402.03 y Subsección 418.06.02 |  |
|  | Estabilidad y flujo   | D 6977   | T 245         | Comprobación del contenido óptimo de asfalto para el porcentaje vacíos especificado, mediante el cumplimiento de la resistencia y deformación máxima permitida | 10 kg                                      |   |  |
|  | VMA   | ---  | ---           | Cantidad de espacios llenos de aire y asfalto dentro de la mezcla  | ---  |   |  |
|  | VFA   | ---  | ---           | Espacios llenos efectivamente de finos en la mezcla  | ---  |   |  |
|  | Relación polvo-asfalto  | ---  | ---           | Verificación de contenido de finos en la mezcla  | ---  |   |  |
|  | Resistencia retenida a la tensión diametral                   | D 4123   | T 283         | Evaluación de la adherencia agregado-asfalto   | 20 kg                                      |   |  |

Fuente: Kreamer et. At. 2004

### 2.3.Marco referencial

En la actualidad existen varios estudios internacionales importantes relacionados al tema que se presenta en la presente tesis, y con el fin de ampliar los conocimientos se presenta a continuación los conocimientos extraídos de las experiencias y estudios que se realizaron.

En el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha estudiado la posibilidad de implementación del ensayo de tracción indirecta en el control de ejecución de capas asfálticas, mediante el análisis de sensibilidad del ensayo y un estudio de correlación entre los valores obtenidos en laboratorio y en testigos extraídos de numerosas obras. De las conclusiones obtenidas ha surgido un criterio de aceptación de la mezcla bituminosa que permite evaluar su calidad mecánica y no solo su compacidad.

Así mismo han desarrollado un proyecto de investigación basado en la aplicación del Ensayo de Tracción indirecta a 5°C en testigos extraídos del pavimento, con el fin de obtener un parámetro de resistencia a tracción de la capa asfáltica y que resulte útil para comparar la calidad obtenida con la pretendida. En un principio se verificó la sensibilidad del ensayo, que fue aplicado en mezclas de tipo densas, semidensas y gruesas, elaboradas con un asfalto convencional, y de acuerdo a las pautas del pliego de Prescripciones Técnicas Generales de España, y se estudió la variación de resistencia con respecto a variables de composición y elaboración de la mezcla.

De los estudios realizados se han puesto de manifiesto una serie de resultados que confirman la posibilidad de aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de ejecución de las mezclas bituminosas, donde se han propuesto unas resistencias mínimas a exigir a las mezclas, de acuerdo con su tipo de granulometría.

- Mezclas D-20 y S-20      25 Kg/cm<sup>2</sup>
- Mezclas D-12 y S-12      20 Kg/cm<sup>2</sup> y deseable 25 Kg/cm<sup>2</sup>
- Mezclas G-25 y G-20      20 Kg/cm<sup>2</sup>

A partir de esta experiencia, en las Universidades Nacionales del Comahue y de La Plata se ha iniciado un proyecto de investigación tendiente a evaluar la posible implementación en Argentina de esta metodología de control adicional. El objetivo principal es conocer

los valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas elaboradas en este país, teniendo en cuenta tanto el efecto de los diferentes materiales como el de las técnicas constructivas locales. Los resultados que se obtuvieron de los testigos extraídos en dos rutas la primera elaborada con asfalto modificado fue de 35 kg/cm<sup>2</sup> y de la segunda ruta elaborada con asfalto convencional 70-100 fue de 30 kg/cm<sup>2</sup>.

También en la tesis de título “Aplicación del Ensayo de Tracción Indirecta en Mezclas Asfálticas en Caliente Para el Control de Calidad en Carpetas Asfálticas en el Ecuador” elaborado por Erick Santiago A. y Victor H. Tabango A. realizan la investigación con el fin de conocer nuevos parámetros del producto final en la ejecución de un firme, mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta tanto en testigos como en briquetas con el fin de conocer los parámetros de comportamiento físico-mecánico de la mezcla puesta en obra, y que las empresas concesionarias tengan certeza de la calidad conseguida. Cuyos resultados obtenidos de diferentes proyectos son los siguientes:

| <b>Compañías</b> | <b>R. Briquetas<br/>Kg/cm<sup>2</sup></b> | <b>R. Testigos<br/>Kg/cm<sup>2</sup></b> |
|------------------|---|--|
| Menatlas         | 28  | 21,4                                     |
| H.C.             | 27  | 19,4                                     |
| TEA              | 26  | 18,4                                     |

La Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 11, de Julio 2009, de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellin (Colombia), muestra la investigación realizada por Oscar Javier R. y Jhon Fredy R. sobre la influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica, en la cual analizan el efecto en la resistencia a tracción indirecta de reemplazar el relleno mineral por cemento, cal y ceniza volante con diferentes porcentajes, en cuyos resultados dan a conocer que el reemplazo del relleno mineral tiene efecto en la resistencia de la mezcla con respecto al relleno natural, aumentando en cierta medida la resistencia en el caso del relleno con ceniza volante.

Así mismo en una investigación realizada en Chile por Carlos W. D., Erika M. P., y Mario D. O. sobre el Control de Calidad de Mezclas Bituminosas Mediante el Ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta, con base en la experiencia de la Universidad Politécnica de Cataluña, realizan el análisis de los resultados obtenidos aplicando el ensayo de tracción indirecta sobre testigos extraídos de vías urbanas de regiones de ese país,

comparándolas con probetas que reproducen las características de obra en cuanto a agregados de planta, cemento asfáltico, etc. en la cual con los resultados que obtienen, llegan a la conclusión de la posibilidad de emplear este ensayo en el control de ejecución de mezclas asfálticas, y que los resultados obtenidos se traducen en características mecánicas del pavimento, dando una idea mejor respecto al comportamiento esperado para cualquier pavimento.

#### **2.4. Análisis del aporte teórico**

En la construcción de una carretera, las mezclas asfálticas constituyen las capas con mayores exigencias dentro de la estructura del pavimento. Hay muchas fases involucradas y actividades diferentes que entran en el proceso de construcción de un pavimento de mezcla asfáltica. Su elaboración, colocación y terminación son procesos complicados, donde intervienen muchos factores que definirán la calidad final de la capa.

El control de calidad del producto suele establecerse sobre la adhesividad y sobre la resistencia a las deformaciones plásticas (estabilidad Marshall), ignorando otras propiedades que pueden resultar igualmente significativas en el comportamiento del material: módulo, abrasión, resistencia a la fatiga, etc. Para ello debe seleccionarse un tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla que resulte en un balance entre la precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible, pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, de recurso económicos y de equipamiento.

La realización del presente trabajo contribuirá a la búsqueda de una metodología de aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas que cubra ciertos aspectos de la puesta en obra que no son considerados por los procedimientos utilizados actualmente, y que pueden afectar el comportamiento en servicio del firme.

**CAPÍTULO III**

**CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA**

**INFORMACIÓN**

## CAPÍTULO III

### CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

#### 3.1. Criterios del diseño metodológico

##### 3.1.1. Unidad de estudio o muestra

Ensayos de laboratorio sobre mezclas asfálticas en frío y caliente.

##### 3.1.2. Población

La población de estudio en esta investigación está constituida por ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento de las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente y en frío.



##### 3.1.3. Muestra

Considerando que se quiere analizar las propiedades mecánicas de resistencia de las mezclas asfálticas la muestra estará dada a partir del Ensayo a Tracción Indirecta de las distintas muestras de mezclas asfálticas elaboradas en caliente (C.A. 85/100) y frío (emulsión RR-2C).

➤ Ensayo a Tracción Indirecta (método brasileño)

- Resistencia
- Esfuerzos verticales y horizontales
- Deformaciones

### 3.1.4. Muestreo

Se hará la evaluación del comportamiento de la resistencia a la tracción mediante el Ensayo de Tracción Indirecta, observando los cambios producidos en las mezclas asfálticas elaboradas con materiales de la región.

Para determinar la cantidad de ensayos a realizar se realizó el método probabilístico estratificado. Para ello se utilizó las siguientes fórmulas:

| N                         | Por Proporción   | Varianzas  |
|---------------------------|--|--|
| Infinito<br>(Desconocido) | $n = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$                          | $n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$                             |
| Finito<br>(Conocido)      | $n = \frac{N * z^2 * p * q}{(n - 1)e^2 + z^2 * p * q}$ | $n = \frac{N * z^2 * \sigma^2}{(N - 1)e^2 + z^2 * \sigma^2}$ |

Donde.

N = Tamaño de la población o universo n = Tamaño de la muestra

buscado z = Parámetro estadístico que depende del nivel de

confianza (NC) e = Error de estimación máximo aceptado p =

Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito) q =

Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

El valor de p y q depende del tamaño de la población, según la estadística si no se tiene algún antecedente sobre el tamaño de la población de estudio, se asumen los valores de “p = 0,5 y q = 0,5”.

Al no existir un antecedente sobre el tamaño de población y muestreo de esta investigación, se utilizará para el cálculo de la cantidad de ensayos la fórmula de “población infinita” para obtener una cantidad de muestras iniciales.

$$Z = 1,96 \quad p = 0,50 \quad q = 0,50 \quad e = 0,05$$

Entonces para:

$$Z = 1.96; N.C = 95\%; p = 0.5; q = 0.5; e = 0.05$$

$$n = \frac{z^2 * p * q}{e^2} = \frac{1,96^2 * 0,5 * 0,5}{0,05^2} = 384$$

Con el valor obtenido reemplazamos a la siguiente fórmula

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * P_i * q_i}{\frac{N * e^2}{z^2} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n N_i * P_i * q_i} = \frac{96}{\frac{384 * 0.05^2}{1.96^2} + \frac{1}{384} * 96} = 192.04$$

Una vez obtenida una población previa que es n=192, nos damos una cantidad intencional de ensayos, para cada uno los ensayos de laboratorio a realizar, hasta completar la cantidad N calculada.

Con cantidades Ni se aplica la fórmula de población finita conocida y se determina la muestra (número de ensayos a realizarse) para cada ensayo.

| N.C | z     |
|-----|-------|
| 50% | 0,574 |
| 80% | 1,28  |
| 85% | 1,44  |
| 90% | 1,64  |
| 95% | 1,96  |
| 99% | 2,58  |

**Tabla 3.1** Planilla de muestra estratificada

| Ensayos                               |  | Ni          | Pi          | qi          | Ni*Pi*qi  | Fi       | ni      | nt         |
|---------------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|------------|
| Caracterización de los agregados      | Granulometría de grava                         | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 1          |
|                                       | Granulometría de gravilla                      | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 1          |
|                                       | Granulometría de arena                         | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 1          |
|                                       | Equivalente de arena                           | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Peso específico y absorción de agregado grueso | 6           | 0.5         | 0.5         | 1.5       | 0.03125  | 3.00    | 6          |
|                                       | Peso específico y absorción de agregado fino   | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Peso unitario agregado grueso                  | 6           | 0.5         | 0.5         | 1.5       | 0.03125  | 3.00    | 6          |
|                                       | Peso unitario agregado fino                    | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Desgaste de los ángeles                        | 6           | 0.5         | 0.5         | 1.5       | 0.03125  | 3.00    | 2          |
| Caracterización del cemento asfáltico | Penetración                                    | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Punto de inflamación                           | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Peso específico                                | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Punto de ablandamiento                         | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Viscosidad saybolt furol                       | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Película delgada                               | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Ductilidad                                     | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
|                                       | Caracterización de la emulsión                 | Penetración | 4           | 0.5         | 0.5       | 1        | 0.02083 | 2.00       |
| Viscosidad saybolt furol              |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Peso específico                       |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Punto de ablandamiento                |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Residuo por destilación               |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Película delgada                      |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Ductilidad                            |  | 4           | 0.5         | 0.5         | 1         | 0.02083  | 2.00    | 3          |
| Ensayos sobre mezclas asfálticas      | Marshall                                       | 40          | 0.5         | 0.5         | 10        | 0.20833  | 20.03   | 36         |
|                                       | Tracción indirecta                             | 54          | 0.5         | 0.5         | 13.5      | 0.28125  | 27.04   | 34         |
| <b>Total</b>                          |  | <b>192</b>  | <b>12.5</b> | <b>12.5</b> | <b>48</b> | <b>1</b> |         | <b>138</b> |

Fuente: Elaboración propia

Realizado el cálculo se obtiene un muestreo de 138 ensayos de laboratorio a realizar para un nivel de confiabilidad de 95%.

### **Cantidad de ensayos a realizar**

Se determinó la cantidad de 138 ensayos de laboratorio a realizarse.

Esta cantidad de ensayos es representativa porque tiene nivel de confianza y margen de error.

### **3.2 Control y validación interna**

Los datos o resultados que se obtengan de los ensayos que se realizarán estarán regidos por las normativas correspondientes para cada ensayo (ASTM, AASHTO, NBR y NLT346/90 para el caso del ensayo de tracción indirecta). Así mismo se realizarán comparaciones entre los resultados obtenidos en los dos tipos de mezclas y analizar las variaciones de sus resultados de las mismas, lo cual nos servirá para establecer la confiabilidad del método, que significará una alternativa de control de calidad para mezclas asfálticas.

Mediante la realización de los ensayos de laboratorio se obtendrán resultados tanto de agregados, cemento asfáltico, emulsión asfáltica, valores de comportamiento de las mezclas asfálticas y los diferentes ensayos de resistencias a las mezclas asfálticas, con los cuales se hará una comparación para comprobar que estén dentro de los parámetros establecidos por las diferentes normas.

De los datos obtenidos en los diferentes ensayos se realizará una evaluación de los mismos mediante la regresión estadística con la finalidad de desechar o eliminar los valores que se encuentren muy dispersos. De igual forma se utilizarán las mediciones estadísticas (media, moda, mediana, desviación estándar), que ayudarán a establecer si los resultados se encuentran dentro de un rango aceptable.

### **3.2.1. Descripción de los ensayos de laboratorio**

#### **3.2.1.1. Ensayos de laboratorio a realizarse para agregados**

Los ensayos de control y verificación de las características de los agregados pétreos para hormigón asfáltico son de gran importancia porque tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material.

- Granulometría
- Peso Unitario de agregado fino y grueso
- Desgaste de los ángeles
- Equivalente de la arena
- Peso específico y absorción del agregado fino
- Peso específico y absorción agregado grueso

#### **3.2.1.2. Ensayos de caracterización del Cemento Asfáltico 85/100 (Mezcla en caliente)**

Para caracterizar y evaluar la calidad del ligante asfáltico existen diversos ensayos tradicionales que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material, la importancia del conocimiento de los requisitos y exigencias de calidad del ligante asfáltico.

- Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol
- Ensayo de penetración
- Ensayo de ductilidad
- Ensayo de punto de inflamación
- Ensayo de peso específico
- Ensayo de punto de ablandamiento
- Ensayo de película delgada

#### **3.2.1.3. Ensayos de caracterización de Emulsión Asfáltica RR-2C (Mezcla en frío)**

Para caracterizar y evaluar la calidad de la emulsión, realizaremos los ensayos en base a las especificaciones técnicas de dicha emulsión ya que es de suma importancia tener conocimiento de los requisitos y exigencias de calidad del ligante asfáltico.

- Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol

- Ensayo de penetración
- Ensayo de residuo por destilación
- Ensayo de ductilidad
- Ensayo de punto de ablandamiento
- Ensayo de película delgada
- Ensayo de peso específico

### **Ensayo sobre la mezcla asfáltica (Frío y caliente)**

- Ensayo Marshall
- Tracción Ensayo de Indirecta

#### **3.2.1.1. Ensayo de tracción indirecta**

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo a tracción indirecta está normalizado según la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

#### **Aparatos y materiales necesarios**

**Prensa:** Para ensayar las probetas se empleará cualquier tipo de prensa de compresión que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de  $0,85 \pm 0,02$  mm/s (50.8 mm/min), y una carga de 100 KN como mínimo.

Para satisfacer el objetivo de este ensayo se realiza una adecuación o modificación a la prensa utilizada para el ensayo Marshall (descrita en la norma NLT-159).

**Recinto termostático:** Un recinto de capacidad suficiente para guardar las probetas para ensayo y mantenimiento a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C.

**Calibrador:** Para medir con precisión de  $\pm 0.1$  mm el diámetro y la altura de las probetas para el ensayo.

**Dispositivo de sujeción de la probeta:** El dispositivo permitirá la sujeción mediante contacto de la probeta por sus caras planas, utilizando dos tornillos de ajuste, así como la

colocación de la probeta de forma que dos de sus generatrices, diametralmente opuestas, estén contenidas en el plano diametral perpendicular a los platos de la prensa.

**Sistemas de medida:** De precisión  $\pm 0.1$  mm de desplazamiento vertical y de  $\pm 0.1$  de desplazamiento horizontal.

### **3.3. Caracterización de los materiales**

#### **3.3.1. Criterios a utilizar**

Los materiales a ser usados en esta investigación deberán cumplir con las especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para la misma se utilizarán materiales existentes en el departamento de Tarija, los cuales se ajustan dentro de las normativas vigentes, además de tenerlas a disponibilidad para su obtención.

#### **3.3.2. Materiales de aporte**

##### **3.3.2.1. Agregados pétreos**

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales (agregados pétreos) de los cuales se extrae material para la ejecución de las mezclas asfálticas para la conformación de la carpeta asfáltica, tanto en la ciudad (bacheos) como los caminos asfaltados, vecinales.

Para el presente proyecto el material pétreo utilizado se obtuvo de la planta de asfalto y áridos (chancadora) que está ubicada en la comunidad de San José de Charaja, la cual provee de material a la Institución SEDECA de la ciudad de Tarija.

Después de analizar sus propiedades se observa que cumple con lo que indica Especificaciones Técnicas para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales y fabricadas en Caliente y en Frío.

**Figura 3.1** Ubicación de la planta de áridos



Fuente: Google Earth

**Figura 3.2** Planta de áridos



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico BETUNEL 85-100 cuya fabricación y procedencia es de Brasil, debido a que es el único cemento asfáltico que se pudo encontrar en la ciudad además de que cumple con las Especificaciones técnicas avaladas por la ABC, para una mezcla asfáltica convencional densa. Siendo estos analizados en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Tabla 3.2** Especificaciones técnicas del cemento asfáltico

| <b>Especificaciones técnicas formulario c-1 – ensayos de verificación de calidad del material</b> | <b>Límites</b> | <b>Método</b>                    | <b>Reproductibilidad</b> |
|---|----------------|----------------------------------|--------------------------|
| Penetración a 25 °C, 100gr. 0,1 mm  | 85 a 100       | NBR-6578/ASTM D5/AASHTO T201     | ± 4dmm                   |
| Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C seg   | 85 min         | NBR-14950/ASTM D86/AASHTO T72    | ± 2%                     |
| Ensayo de la Mancha 20% □Xilol□   | Negativo       | /ASTM D2170/AASHTO T102          | ND                       |
| Punto de Ablandamiento °C   | 43 a 46        | NBR-6560/ASTM D36/AASHTO T53     | ± 3°C                    |
| Ductilidad a 25 °C 5cm/min, cm  | 100 min        | NBR-6293/ASTM D113/AASHTO T51    | Consult NBR              |
| Viscosidad de Brookfield a 135°C, cP  | 214 min        | NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316 | ND                       |
| Viscosidad de Brookfield a 150°C, cP  | 97 min         | NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316 | ND                       |
| Viscosidad de Brookfield a 177°C, cP  | 28 a 114       | NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316 | ND                       |
| Temperatura de Mistura, °C (**) (***)   | Indicativo     | Cálculo                          | ND                       |
| Temperatura de Compactación, °C (**) (***)  | Indicativo     | Cálculo                          | ND                       |
| Índice de Penetración de Pleiffer   | -1,5 a 0,5     | Cálculo / Cálculo                | ND                       |
| Punto de Inflamación C.O.C °C   | 230 min        | NBR-11341/ASTM D92/AASHTO T46    | ± 18°C                   |
| Solubilidad en Tricloroetileno  | 99 min         | NBR-14855/ASTM D2042/AASHTO T44  | ±0,26%                   |
| Densidad a 25 °C c/25 °C  | 0,99 min       | NBR-6296/AASHTO T228             | ±0,005                   |
| <b>ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO PELÍCULA DELGADA (TFOT) 32mm, 163°C (AASHTO T240)</b>                 |                |                                  |                          |
| (R) TFOT- Pérdida de Masa   | 1 max          | NBR-6578/ASTM D5/AASHTO T201     | Consult. NBR             |
| (R) TFOT- Penetración del Residuo, % de la penetración original                                   | 50 min         | Cálculo                          | ND                       |
| (R) TFOT- Pérdida por calentamiento   | 1 max          | Cálculo / AASHTO T-179           | ± 4dmm                   |
| Densidad a 25 °C c/25 °C  | 1 a 1,05       | NBR-6298/AASHTO T-228            | ±0,005                   |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.2.3. Emulsión asfáltica**

Para las mezclas asfálticas elaboradas en frío se utilizará como material ligante la emulsión asfáltica EMULTEC RR-2C el cual es aplicable a mezclas asfálticas en frío. Para tal efecto se adquirió la emulsión cuyo proveedor en Bolivia tiene sus oficinas en la ciudad de Santa Cruz (QUIMITEC Asfaltos S.A), el cual cumple con las especificaciones técnicas como material para la elaboración de mezclas asfálticas.

Las especificaciones del producto se observan en el siguiente recuadro.

**Tabla 3.3** Especificaciones técnicas de la emulsión

| Propiedades  | Método    | Unidades  | Especificación     |
|--|-----------|-----------|--------------------|
| Viscosidad de Saybolt Furol, 50°C  | NBR 14491 | Seg.      | 100 – 400          |
| Sedimentación, 5 días  | NBR 6570  | % masa    | 5 máx.             |
| Tamizado (0,84mm)  | NBR 14393 | % masa    | 0,1 máx.           |
| Resistencia al agua, mín. de cobertura<br>- Agregado seco<br>- Agregado húmedo | NBR 6300  | %         | 80 mín.<br>80 mín. |
| Carga da partícula húmedo  | NBR 6567  | ---       | POSITIVA           |
| Destilación, solvente destilado a 360°C  | NBR 6568  | % volumen | 0 – 3              |
| Residuo seco   | NBR 14376 | % masa    | 67                 |
| Demulsibilidad   | NBR 6569  | % masa    | 50 mín.            |
| <b>Ensayos sobre residuo de emulsión obtenida por NBR 14896</b>                |           |           |                    |
| Penetración (100 g, 5s, 25°C)  | NBR 6576  | 0,1 mm    | 45 – 150           |
| Punto de Ablandamiento   | NBR 6560  | °C        | 55 mín.            |
| Viscosidad de Brookfield, 135°C, Spindle 21, 20 rpm                            | NBR 15184 | cP        | 600 mín.           |
| Recuperación Elástica, 25°C, 20 cm   | NBR 15086 | %         | 70 mín.            |

Fuente: Especificación técnica del fabricante de la emulsión asfáltica RR-2C

### 3.3.3. Caracterización del agregado pétreo

Los ensayos de caracterización de los agregados se los realiza para el respectivo control y verificación de los materiales pétreos a utilizar, además de mostrarnos el comportamiento del material en obra.

Nota. El procedimiento y cálculos de los ensayos se detallará en Anexo A.

#### 3.3.3.1. Análisis granulométrico de los agregados (Marco referencial AASHTO T27, ASTM C-136)

##### Definición

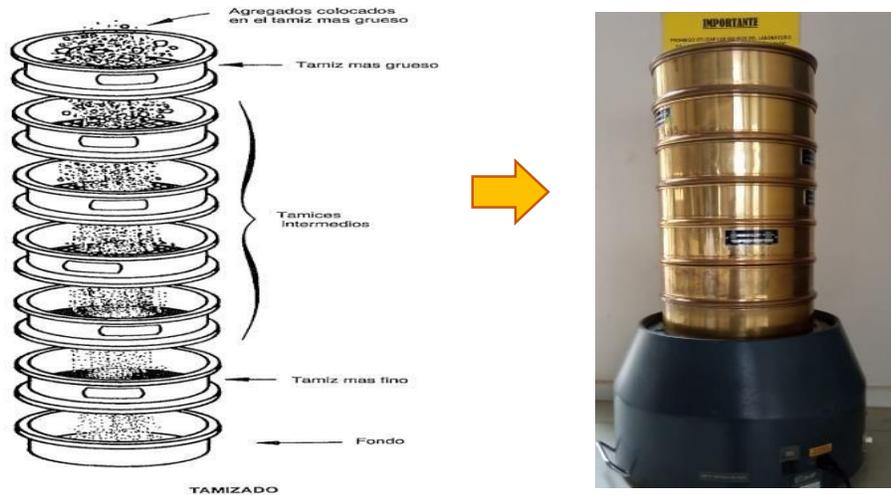
Se denomina granulometría, a la distribución en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

##### Objetivo

Obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar y graficar la curva granulométrica para establecer la distribución de los materiales de los

granos presentes en una masa de suelo, que debe estar dentro de las especificaciones establecidas.

**Figura 3.3** Esquema de tamizado de los agregados



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.4** Proceso de tamizado manual



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

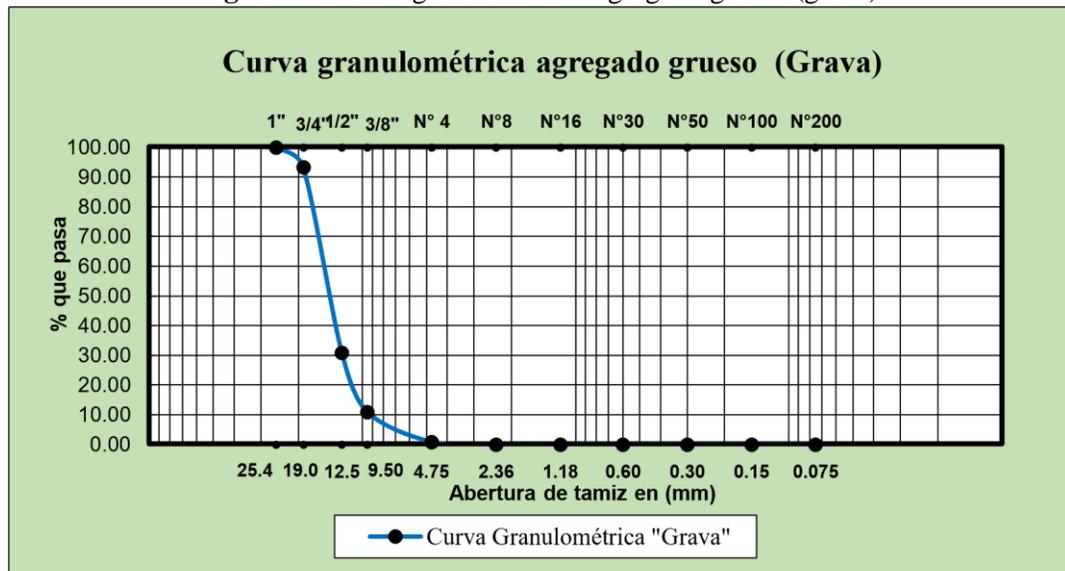
### Granulometría – Agregado Grueso (Grava)

**Tabla 3.4** Resultado de la granulometría del agregado grueso

| Tamices | Tamaño | % que pasa del total |
|---------|--------|----------------------|
| 1"      | 25,4   | <b>100,00</b>        |
| 3/4"    | 19     | <b>93,44</b>         |
| 1/2"    | 12,5   | <b>30,85</b>         |
| 3/8"    | 9,5    | <b>11,02</b>         |
| Nº4     | 4,75   | <b>0,88</b>          |
| Nº8     | 2,36   | <b>0,01</b>          |
| Nº16    | 1,18   | <b>0,01</b>          |
| Nº30    | 0,6    | <b>0,01</b>          |
| Nº50    | 0,3    | <b>0,01</b>          |
| Nº100   | 0,15   | <b>0,01</b>          |
| Nº200   | 0,075  | <b>0,01</b>          |
| BASE    | -      | <b>0,01</b>          |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.5** Curva granulométrica agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

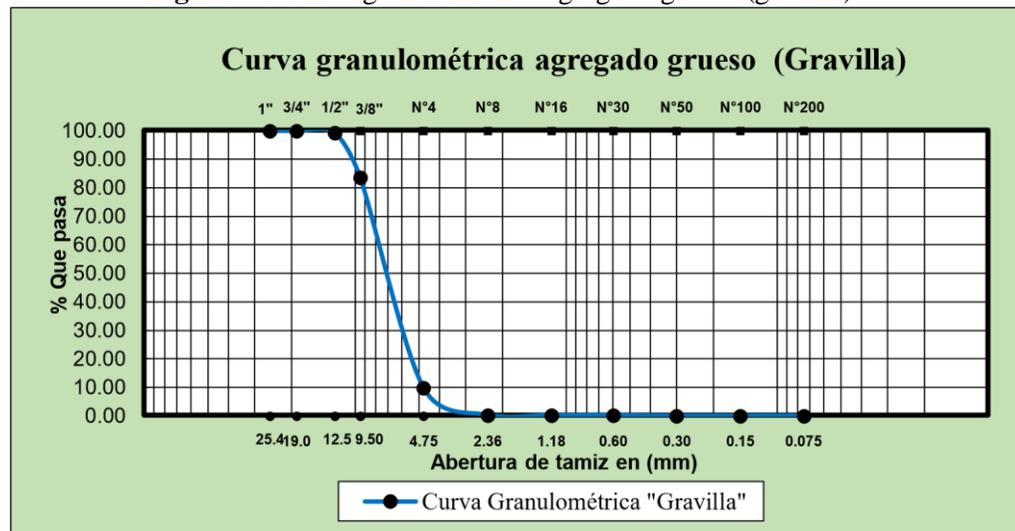
### Granulometría – Agregado Grueso (Gravilla)

Tabla 3.5 Resultado de la granulometría de la gravilla

| Tamices | Tamaño | % que pasa del total |
|---------|--------|----------------------|
| 1"      | 25,4   | 100,00               |
| 3/4"    | 19     | 100,00               |
| 1/2"    | 12,5   | 99,26                |
| 3/8"    | 9,5    | 83,78                |
| N°4     | 4,75   | 9,83                 |
| N°8     | 2,36   | 0,35                 |
| N°16    | 1,18   | 0,23                 |
| N°30    | 0,6    | 0,21                 |
| N°50    | 0,3    | 0,01                 |
| N°100   | 0,15   | 0,01                 |
| N°200   | 0,075  | 0,01                 |
| BASE    | -      | 0,01                 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 Curva granulométrica agregado grueso (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

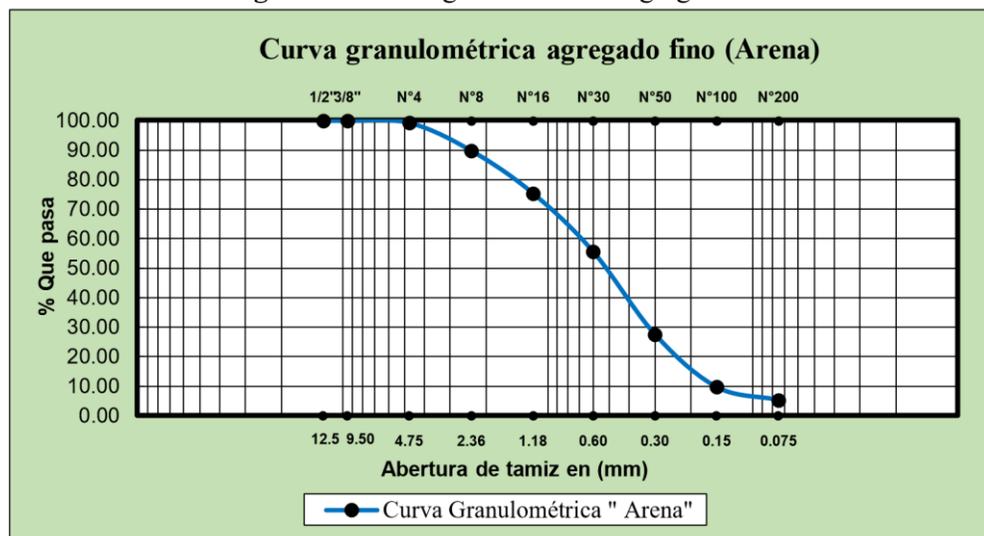
### Granulometría – Agregado Fino (Arena)

**Tabla 3.6** Resultado de la granulometría del agregado fino

| Tamices | Tamaño | % que pasa del total |
|---------|--------|----------------------|
| 1/2     | 12,5   | 100,00               |
| 3/8"    | 9,5    | 100,00               |
| N°4     | 4,75   | 99,32                |
| N°8     | 2,36   | 89,86                |
| N°16    | 1,18   | 75,40                |
| N°30    | 0,6    | 55,62                |
| N°50    | 0,3    | 27,60                |
| N°100   | 0,15   | 9,71                 |
| N°200   | 0,075  | 5,32                 |
| BASE    | -      | 0,01                 |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.7** Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.3.2. Método para determinar el equivalente de arena (Marco referencial ASTM D-2419)

##### Definición

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

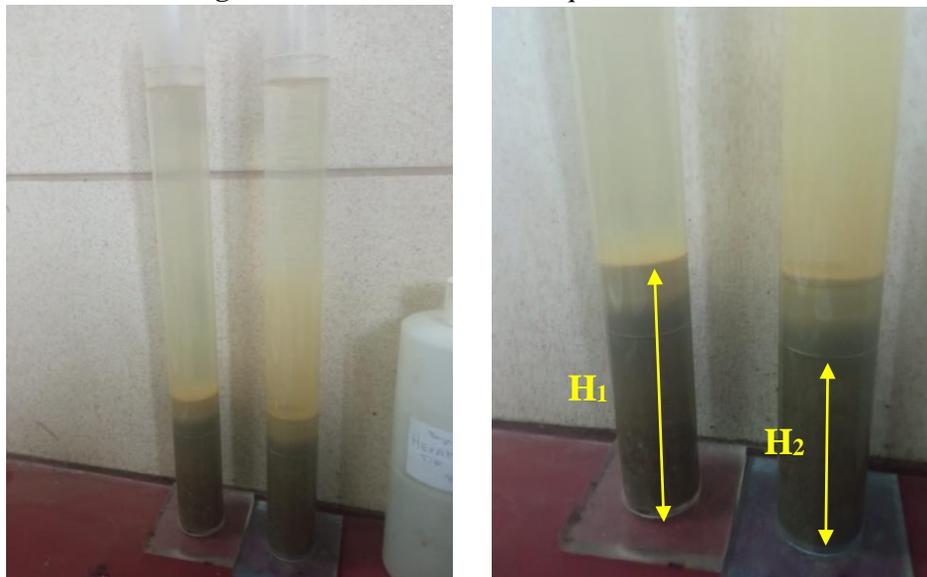
método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena.

Establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4.75 mm (N°4).

### Objetivo

Tiene como objetivo determinar la calidad que tiene un suelo que se va a emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

**Figura 3.8** Determinación del equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

### Resultados

$$E. A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

**Tabla 3.7** Resultado del equivalente de arena

| Equivalente de Arena (%) | Norma |
|--------------------------|-------|
| 92,82                    | >50 % |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.3. Abrasión del agregado grueso mediante la máquina de los ángeles (Marco referencial ASTM C 131, AASHTO T-96)

#### Definición

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los ángeles.

#### Procedimiento

La muestra y la carga abrasiva correspondiente, se colocan en la máquina de Los Ángeles. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad, luego se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el de 1.70 mm (No.12).

**Figura 3.9** Material granular dispuesto para tamizar en la malla N° 12



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.8** Tabla de pesos de agregado y número de esferas según la gradación

| 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        |
| <b>Peso total</b>  |          | <b>5000±10</b>                      | <b>5000±10</b> | <b>5000±10</b> | <b>5000±10</b> |
| NÚMERO DE ESFERAS  |          | 12                                  | 11             | 8              | 6              |
| N° DE REVOLUCIONES |          | 500                                 | 500            | 500            | 500            |
| TIEMPO DE ROTACIÓN |          | 30                                  | 15             | 15             | 15             |

Fuente: Norma ASTM, C131

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

**Tabla 3.9** Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles (grava 3/4)

| Gradación | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | % De desgaste | Especificación ASTM |
|-----------|-------------------|-----------------|---------------|---------------------|
| A         |                   |                 |               | 35 % Max            |
| B         | 5000              | 3605            | 27,9          | 35 % Max            |
| C         |                   |                 |               | 35 % Max            |
| D         |                   |                 |               | 35 % Max            |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10** Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles (gravilla 3/8)

| Gradación | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | % De desgaste | Especificación ASTM |
|-----------|-------------------|-----------------|---------------|---------------------|
| A         |                   |                 |               | 35 % Max            |
| B         |                   |                 |               | 35 % Max            |
| C         | 5000              | 3706            | 25,88         | 35 % Max            |
| D         |                   |                 |               | 35 % Max            |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.4. Peso específico y absorción del agregado grueso (Marco referencial ASTM D 127, AASHTO T85)

Este método tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas. Para agregados con tamaño igual o mayor a 4,75 mm (tamiz N° 4).

Se comienza por mezclar completamente el agregado de 3/4, y el agregado de 3/8, la cantidad determinada.

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C.

Después se lo sumerge en agua, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.).

Luego, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de 25°C.

**Figura 3.10** Ensayo de peso específico del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.11** Resultados del ensayo de 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 |
|--|--|--|----------------|
| 2,61   | 2,64   | 2,70   | 1,26           |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12** Resultados del ensayo 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 |
|--|--|--|----------------|
| 2,62   | 2,65   | 2,72   | 1,43           |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.5. Peso específico y absorción del agregado fino (Marco referencial ASTM C 128, AASHTO T84)

#### Objetivo

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 cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

#### Resumen del método

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

**Figura 3.11** Muestra sumergida y muestra saturada con superficie seca

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.12** Matraz + agua + muestra

Fuente: Elaboración propia

**Resultados****Tabla 3.13** Resultados del ensayo de peso específico del agregado fino

| <b>Peso específico a granel (gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso específico aparente (gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% de absorción</b> |
|---|---|---|-----------------------|
| 2,71  | 2,72  | 2,75  | 0,51                  |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.6. Peso unitario de los agregados (Marco referencial ASTM C29, AASHTO T19)

El peso unitario de los agregados fino y grueso tiene como objetivo describir el peso unitario de la medida de agregados a la temperatura ambiente.

El peso unitario es el peso de la unidad de volumen de material a granel en las condiciones de compactación y humedad en que se efectúa el ensayo.

**Figura 3.13** Peso unitario del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.14** Peso unitario del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

### Peso unitario del agregado grueso (Grava)

**Tabla 3.14** Resultados de peso unitario suelto y compactado del agregado grueso

| Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|--|--|
| 1,41                                       | 1,48   |

Fuente: Elaboración propia

### Peso unitario del agregado grueso (Gravilla)

**Tabla 3.15** Resultados de peso unitario suelto y compactado de la gravilla

| Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|--|--|
| 1,39                                       | 1,43   |

Fuente: Elaboración propia

### Peso unitario del agregado fino (Arena)

**Tabla 3.16** Resultados de peso unitario suelto y compactado del agregado fino

| Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso unitario compactado (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|--|--|
| 1,53                                       | 1,70   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4. Caracterización del cemento asfáltico

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del ligante asfáltico, es necesario realizar los diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real; en este punto realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el ligante asfáltico, que ejecutamos para evaluar nuestra mezcla asfáltica.

Estos ensayos se los realizó en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Juan Misael Saracho.

### **3.3.4.1. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102)**

#### **Definición**

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 centímetros cúbicos de líquido, a una temperatura determinada, a través de un tubo de dimensiones específicas.

#### **Procedimiento**

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro.

Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso. Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida, de manera que quede introducido más de 6.3 mm. y menos de 9.5 mm.

Se vierte la muestra en el tubo hasta que deje de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante.

Se coloca el frasco calibrado de 60 cm<sup>3</sup> en una posición tal que quede centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco.

El ensayo se empieza sacando rápidamente el tapón del corcho del tubo, poniendo en marcha al mismo tiempo el cronómetro. Se para el cronómetro cuando la parte inferior del menisco alcanza la graduación del cuello del frasco calibrado.

**Figura 3.15** Ensayo de viscosidad de saybolt-furol

Fuente: Elaboración propia

**Resultados****Tabla 3.17** Resultados del ensayo de viscosidad saybolt-furol

| Promedio<br>(seg) | Especificaciones |     |
|-------------------|------------------|-----|
|                   | Min              | Max |
| 318               | 85               | -   |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.4.2. Ensayo de ductilidad (ASTM D113 AASHTO T51)**

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos.

**Procedimiento**

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes. Se vierte el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire.

Se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de 25°C durante otros 30 minutos. A

continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

Se pone en marcha el ductilímetro, el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada, hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que haya separado ambas pinzas hasta ese instante.

**Figura 3.16** Realización del ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.18** Resultados de ensayo de ductilidad

| Promedio<br>(cm) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 129              | 100              | -   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4.3. Ensayo de punto de inflamación por el vaso abierto de Cleveland (ASTM D92, AASHTO T 48)

Este método 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.

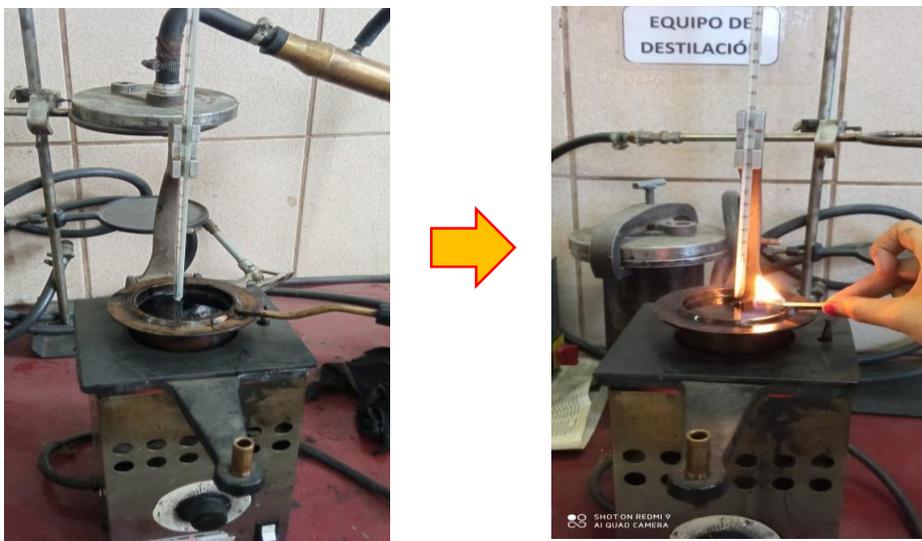
#### Procedimiento

Llenar la copa con el cemento asfáltico y aplicar calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Cuando la temperatura de la muestra esté por debajo del punto

de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación.

Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

**Figura 3.17** Ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.19** Resultados de ensayo de punto de inflamación

| Promedio<br>(°C) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 256              | 230              | -   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4.4. Ensayo de peso específico (ASTM D-70)

Se entiende como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C.

## Procedimiento

Se limpia el picnómetro para su calibración, esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración. Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Posteriormente verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

**Figura 3.18** Ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.20** Resultados de ensayo de peso específico

| Promedio<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Especificaciones |      |
|-----------------------------------|------------------|------|
|                                   | Min              | Max  |
| 1,04                              | 1                | 1,05 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4.5. Ensayo de penetración (ASTM D-5, AASHTO T201)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

#### Procedimiento

Se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 gramos de material que se colocará en un recipiente que se calienta cuidadosamente hasta que esté fluido, se lo coloca en 3 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en baño María por una hora a 25°C.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

**Figura 3.19** Penetración de la muestra

Fuente: Elaboración propia

**Resultados****Tabla 3.21** Resultados del ensayo de penetración

| Promedio<br>(mm) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 90               | 85               | 100 |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.4.6. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D 36-89, AASHTO T 53-92)**

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a la que estos asfaltos se hacen fluidos.

**Procedimiento**

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una temperatura determinada y se anota la temperatura en el momento en que la

bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

**Figura 3.20** Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.22** Resultados de punto de ablandamiento

| Promedio<br>(°C) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 44               | 42               | 53  |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4.7. Ensayo de la película delgada (ASTM D 1754)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar las pérdidas en peso de aceite y de compuestos asfálticos cuando se calientan.

#### Procedimiento.

Agitar y mezclar completamente la muestra calentándola, para asegurar una muestra homogénea antes de remover la porción para ensayo. Colocar  $50 \pm 0.5$  g de la muestra en el recipiente y pesar con aproximación a 0.01 g. Si el material se ha calentado, enfriar a temperatura ambiente antes de hacer la pesada inicial.

Regular el horno a una temperatura de  $163^{\circ}\text{C}$  ( $325^{\circ}\text{F}$ ), y colocar el recipiente con la muestra en su interior sobre la placa circular, en uno de los huecos. Cerrar el horno y poner a girar la placa durante todo el ensayo, a una velocidad de 5 a 6 r.p.m. Mantener la temperatura a  $163^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  ( $325 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$ ) durante 5 horas después que la muestra se haya introducido y el horno alcance la temperatura especificada. El tiempo de 5 horas empieza cuando la temperatura llegue a  $162^{\circ}\text{C}$  ( $324^{\circ}\text{F}$ ).

Al terminar el período de calentamiento se saca la muestra, se deja enfriar y se pesa calculando la pérdida en peso que se ha producido.

**Figura 3.21** Ensayo de película delgada



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

**Tabla 3.23** Resultados de película delgada

| Promedio<br>(gr) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 0,8              | -                | 1   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5. Caracterización de la emulsión asfáltica

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del ligante asfáltico, es necesario realizar diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real; en esta parte, realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el ligante asfáltico, que ejecutamos para evaluar nuestra mezcla asfáltica.

#### 3.3.5.1. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E102, NBR 14491)

El ensayo de viscosidad para la emulsión asfáltica; se lo realiza de igual manera que el ensayo para hallar la viscosidad de un cemento asfáltico.

**Figura 3.22** Ensayo de viscosidad saybolt a emulsión RR-2C



Fuente: Elaboración propia

### Resultados

**Tabla 3.24** Resultados de viscosidad saybolt-furol

| Promedio<br>(seg) | Especificaciones |     |
|-------------------|------------------|-----|
|                   | Min              | Max |
| 203               | 100              | 400 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.2. Ensayo de residuo por destilación (ASTM D6997 NBR 14376)

Este método de prueba se utiliza en procedimientos para una determinación rápida de porcentaje de residuos en emulsiones asfálticas compuestas principalmente de una base asfáltica semisólida o líquida, agua y un agente emulsionante.

#### Resumen de procedimiento

El ensayo se realiza colocando una cantidad especificada de asfalto fluidificado en un matraz de destilación conectado a un condensador. El asfalto fluidificado se calienta gradualmente hasta una temperatura especificada y se anota la cantidad de disolvente destilada a diversas temperaturas. Cuando se alcanza la temperatura de 360 °C se mide la cantidad de asfalto restante y se expresa como porcentaje en volumen de la muestra original.

**Figura 3.23** Ensayo de residuo por destilación



Fuente: Elaboración propia

#### Resultados

**Tabla 3.25** Resultados de ensayo de residuo por destilación

| Promedio<br>(%) | Especificaciones |     |
|-----------------|------------------|-----|
|                 | Min              | Max |
| 75              | 67               | -   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.3. Ensayo de penetración (ASTM D5, NBR 6576)

Esta prueba se la realiza al asfalto residual después de que ha roto la emulsión, y se ha eliminado la fase acuosa. El procedimiento para este ensayo es igual al presentado en el ensayo realizado al cemento asfáltico.

**Figura 3.24** Ensayo de penetración (emulsión)



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

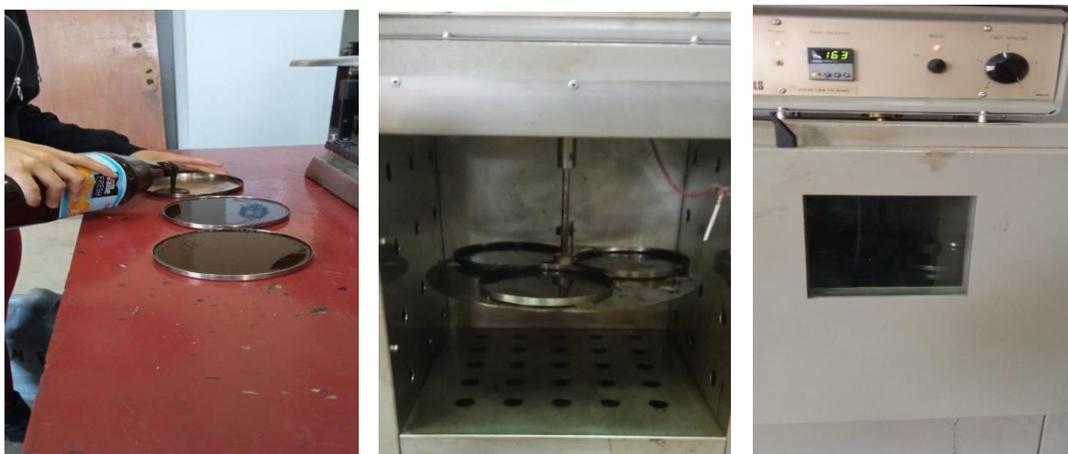
**Tabla 3.26** Resultados de ensayo de penetración

| Promedio<br>(mm) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 58               | 45               | 150 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.4. Ensayo de película delgada (ASTM D1754)

Este ensayo en la emulsión asfáltica se utiliza para determinar la pérdida de masa del asfalto que sufrió el material a lo largo del tiempo.

**Figura 3.25** Ensayo de película delgada de la emulsión

Fuente: Elaboración propia

**Resultados****Tabla 3.27** Resultados de película delgada

| Promedio<br>(gr) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 0,97             | -                | 1   |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.5.5. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D36, NBR 6560)**

El ensayo establece, como la temperatura a la cual el asfalto es suficientemente blando para que una esfera de acero de diámetro de 3/8" pase a través de un anillo de diámetro 5/8" en el cual se encuentra la muestra de asfalto. El procedimiento se sigue igual como se mostró en el ensayo para el cemento asfáltico. Este ensayo se lo realiza al residuo resultante de la destilación de la emulsión.

**Figura 3.26** Ensayo de punto de ablandamiento al asfalto residual de la emulsión



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.28** Resultados de punto de ablandamiento

| Promedio<br>(°C) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 57               | 55               | -   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.6. Ensayo de ductilidad

Es la capacidad de estirarse en forma de un hilo sin romperse. El procedimiento para este ensayo es igual al presentado en el ensayo realizado al cemento asfáltico. **Figura 3.27**

Ensayo de ductilidad a asfalto residual



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.29** Resultados de ductilidad

| Promedio<br>(mm) | Especificaciones |     |
|------------------|------------------|-----|
|                  | Min              | Max |
| 106              | 100              | -   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.7. Ensayo de peso específico del asfalto residual (Marco referencial ASTM D244-09)

Se entiende como peso específico de un material la relación de su peso a una temperatura determinada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, generalmente a los 25 grados centígrados.

El peso específico de los asfaltos sólidos se determina por inmersión directa en agua mientras que la de los semisólidos, líquidos y emulsificados se los determina por medio del picnómetro y desplazamiento.

La gravedad específica además de indicar sobre la calidad y origen del material bituminoso sirve para determinar las equivalencias de los pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación y para algunos cálculos importantes en el diseño de mezclas bituminosas.

**Figura 3.28** Ensayo de peso específico de asfalto residual

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.30** Resultados de peso específico de asfalto residual

| Promedio<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Especificaciones |      |
|-----------------------------------|------------------|------|
|                                   | Min              | Max  |
| 1,01                              | 1                | 1,05 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.6. Presentación de resultados de los ensayos de caracterización de los materiales

#### 3.3.6.1. Agregados pétreos

**Tabla 3.31** Resumen de resultados de caracterización de agregados

| Ensayo                             |            | Resultado | Especificación |      | Norma       |  |
|------------------------------------|------------|-----------|----------------|------|-------------|--|
| Desgaste de los ángeles (grava)    |            | 27,9      | 35% max        |      | ASTM C 131  |  |
| Desgaste de los ángeles (gravilla) |            | 25,88     | 35% max        |      | ASTM C 131  |  |
| Equivalente de arena               |            | 92.82     | >50%           |      | ASTM D 2419 |  |
| Peso específico granel(grava)      |            | 2,61      | 2,35           | 2,75 | ASTM D 127  |  |
| P.E. saturado sup. Seca            |            | 2,64      |                |      |             |  |
| P.E. aparente                      |            | 2,70      |                |      |             |  |
| Absorción                          |            | 1,26      |                |      |             |  |
| Peso específico granel(gravilla)   |            | 2,62      |                |      |             |  |
| P.E. saturado sup. Seca            |            | 2,65      |                |      |             |  |
| P.E. aparente                      |            | 2,72      |                |      |             |  |
| Absorción                          |            | 1,43      |                |      |             |  |
| Peso específico granel (arena)     |            | 2,71      | 2,21           | ---  | ASTM C128   |  |
| P.E. saturado sup. Seca            |            | 2,72      |                |      |             |  |
| P.E. aparente                      |            | 2,75      |                |      |             |  |
| Absorción                          |            | 0,51      |                |      |             |  |
| P.U. Grava                         | Suelto     | 1,41      | ---            | ---  | ASTM C29    |  |
|                                    | Compactado | 1,48      | ---            | ---  |             |  |
| P.U. Gravilla                      | Suelto     | 1,39      | ---            | ---  |             |  |
|                                    | Compactado | 1,43      | ---            | ---  |             |  |
| P.U. Arena                         | Suelto     | 1,53      | ---            | ---  |             |  |
|                                    | Compactado | 1,70      | ---            | ---  |             |  |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.6.2. Cemento asfáltico

**Tabla 3.32** Resumen de resultados de caracterización de cemento asfáltico

| Ensayo                   | Resultado | Especificación |      | Norma      |
|--------------------------|-----------|----------------|------|------------|
| Viscosidad saybolt furol | 318       | 85             |      | ASTM E102  |
| Ductilidad               | 129       | 100            |      | ASTM D113  |
| Punto de inflamación     | 256       | 230            |      | ASTM D92   |
| Peso específico          | 1,04      | 1              | 1,05 | ASTM D70   |
| Penetración              | 90        | 85             | 100  | ASTM D5    |
| Punto de ablandamiento   | 44        | 42             | 53   | ASTM D36   |
| Película delgada         | 0,8       |                | 1    | ASTM D1754 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.6.3. Emulsión asfáltica

**Tabla 3.33** Resumen de los resultados de caracterización de emulsión asfáltica

| Ensayo                   | Resultado | Especificación |      | Norma        |
|--------------------------|-----------|----------------|------|--------------|
| Viscosidad saybolt furol | 203       | 100            | 400  | NBR 14491    |
| Residuo por destilación  | 75        | 67             |      | ASTM D6997   |
| Penetración              | 58        | 45             | 150  | NBR 6576     |
| Película delgada         | 0,97      |                | 1    | ASTM D1754   |
| Punto de ablandamiento   | 57        | 55             |      | NBR 6560     |
| Ductilidad               | 106       | 100            |      | ASTM D113    |
| Peso específico          | 1,01      | 1              | 1,05 | ASTM D244-09 |

Fuente: Elaboración propia

## 3.4. Mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica que se utilizará será una mezcla asfáltica densa elaborada en caliente con cemento asfáltico convencional 85/100 y elaborada en frío con emulsión RR-2C, siguiendo la metodología Marshall.

### 3.4.1. Métodos de diseño

El objetivo del diseño de una mezcla es desarrollar una combinación económica de agregados y asfalto. La forma, procedimiento o método que se utilice para diseñar una mezcla debe cumplir con todos los requerimientos correspondientes a los pavimentos flexibles, tales como la estabilidad, cantidad mínima de vacíos, trabajabilidad, etc.

El diseño de una mezcla se regula a través de la elección de una franja granulométrica según las especificaciones técnicas y un porcentaje de asfalto, de modo que una vez elaborada y puesta en terreno, cumpla con las exigencias para la cual fue diseñada.

Los métodos de dosificación buscan determinar un porcentaje de asfalto óptimo a partir del análisis de las propiedades de la mezcla. Estos métodos de diseño se basan en el empleo de ensayos mecánicos.

Entre los métodos de diseño más conocidos para mezclas asfálticas, se puede mencionar el método Marshall y el método Hveen. Para esta investigación se utilizará el método de diseño Marshall.

#### **3.4.2. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall**

El método de Marshall, solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

#### **3.4.3. Procedimientos e instrumentos para la realización del diseño Marshall**

El siguiente procedimiento será aplicado para calcular en contenido óptimo de cemento asfáltico, preparados con cemento asfáltico, emulsión asfáltica y agregados no mayores

de 2.54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101.6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2.5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152.4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

**Molde de Compactación.** Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

**Martillo de compactación** con base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").

**Extractor de Muestras.** Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.

**Mordaza.** Consiste de dos semicilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.

**Medidor de deformación.** Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

**Prensa.** 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 30 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

**Horno.** 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 150mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$  ( $140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{F}$ ), deberá tener

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

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

**Tamices.** 25 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 12.5 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N° 4), 2.36 mm (N° 8), 300  $\mu$ m (N° 50) y 75  $\mu$ m (N° 200).

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

**Balanza.** Para pesar agregado y asfalto de 5 kg. de capacidad, y sensibilidad de un 1 gr. Para pesar probetas compactadas de 2 kg. de capacidad y sensibilidad de 0.1 gr

#### **3.4.4. Franja aceptable de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas densas**

Para la elaboración de una mezcla densa o cerrada, la granulometría de las distintas fracciones de áridos constituyentes de la mezcla deben estar comprendidas en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las franjas granulométricas de control. Estas franjas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica del agregado utilizado.

**Tabla 3.34** Franjas granulométricas

| Tamaño de tamiz  | Designación de la mezcla usando el Tamaño Máximo Nominal de Agregado |                 |                 |                   |                  |
|--|--|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
|  | 37,5 mm<br>(1 ½ in)  | 25 mm<br>(1 in) | 19 mm<br>(¾ in) | 12,5 mm<br>(½ in) | 9,5 mm<br>(⅜ in) |
|  | Porcentaje total que pasa (en peso)                                  |                 |                 |                   |                  |
| 50 mm (2 in)   | 100  | -               | -               | -                 | -                |
| 37,5 mm (1 ½ in)   | 90 a 100   | 100             | -               | -                 | -                |
| 25,0 mm (1 in)   | -  | 90 a 100        | 100             | -                 | -                |
| 19,0 mm (¾ in)   | 56 a 80  | -               | 90 a 100        | 100               | -                |
| 12,5 mm (½ in)   | -  | 56 a 80         | -               | 90 a 100          | 100              |
| 9,5 mm (⅜ in)  | -  | -               | 56 a 80         | -                 | 90 a 100         |
| 4,75 mm (N° 4)   | 23 a 53  | 29 a 59         | 35 a 65         | 44 a 74           | 55 a 87          |
| 2,36 mm (N° 8)   | 15 a 41  | 19 a 45         | 23 a 49         | 28 a 56           | -                |
| 1,18 mm (N° 16)  | -  | -               | -               | -                 | -                |
| 0,60 mm (N° 30)  | -  | -               | -               | -                 | 7 a 23           |
| 0,30 mm (N° 50)  | 4 a 16   | 5 a 17          | 5 a 19          | 5 a 21            | -                |
| 0,15 mm (N° 100)   | -  | -               | -               | -                 | 2 a 10           |
| 0,075 mm (N° 200)  | 0 a 5  | 1 a 7           | 2 a 8           | 2 a 10            | 5 a 12           |
| Cemento asfáltico<br>Porcentaje en peso del total de la mezcla | 3 a 8  | 3 a 9           | 4 a 10          | 4 a 11            | 5 a              |

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

### 3.4.5. Curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica para el diseño Marshall

En base a los parámetros de granulometría exigidos para la elaboración de mezclas asfálticas densas, expuestas en la tabla 3.26, con relación al tamaño máximo del agregado utilizado, se realiza la combinación de los agregados (grava, gravilla, arena) con la finalidad de cumplir con los requisitos planteados, ya que casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con lo requerido en las franjas granulométricas.

Para la presente investigación se realizará la mezcla o combinación de los agregados provenientes de la planta de asfalto y áridos de la comunidad de San José de Charaja; para ello la combinación se dispondrá de la siguiente manera:

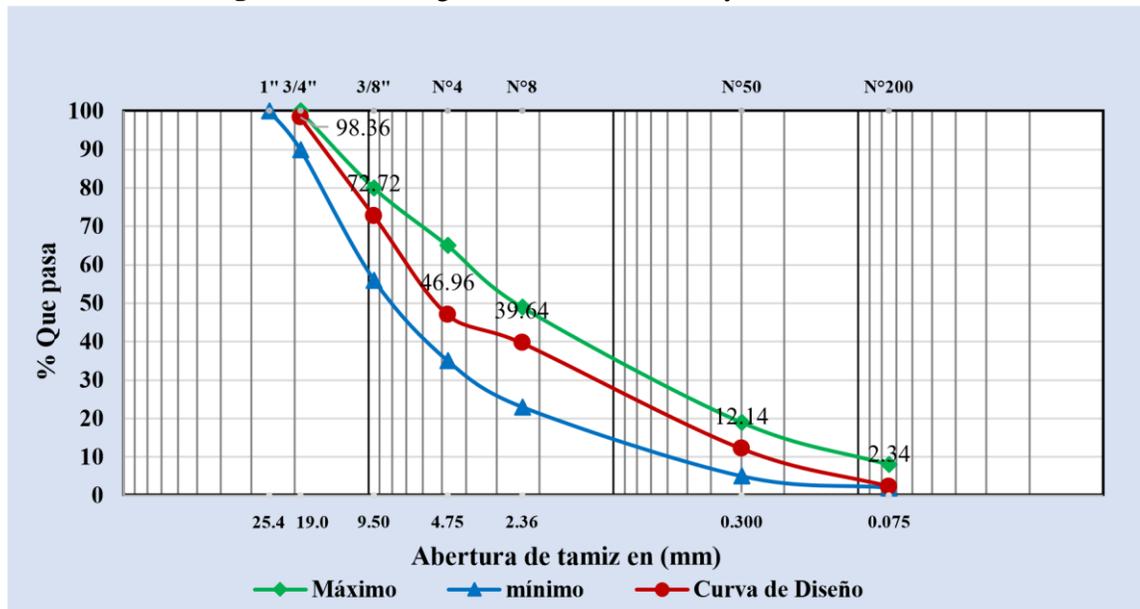
|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Agregado grueso (Grava de ¾)    | 25% |
| Agregado grueso (Gravilla de ⅜) | 31% |
| Agregado fino (Arena)           | 44% |

**Tabla 3.35** Curva granulométrica formada para el diseño de mezclas asfálticas densas

| Tamices    | tamaño<br>(mm) | Dosificación      |                   |                   |         |          |         | Curva de Dosificación |           |        |                      | Especificaciones |        |
|------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|----------|---------|-----------------------|-----------|--------|----------------------|------------------|--------|
|            |                | Grava             | Gravilla          | Arena             | Grava   | Gravilla | Arena   | Peso Ret.             | Ret. Acum | % Ret  | % que pasa del total | Mínimo           | Máximo |
|            |                | Peso Ret.<br>(gr) | Peso Ret.<br>(gr) | Peso Ret.<br>(gr) | (%)     | (%)      | (%)     | 100,00                |           |        |                      |                  |        |
|            |                |                   |                   |                   | 25,00   | 31,00    | 44,00   |                       |           |        |                      |                  |        |
| 1"         | 25,4           | 0,00              | 0,00              | 0                 | 0,00    | 0,00     | 0,00    | 0,00                  | 0,00      | 0,00   | 100,00               | 100              | 100    |
| 3/4"       | 19,0           | 327,80            | 0,00              | 0                 | 81,95   | 0,00     | 0,00    | 81,95                 | 81,95     | 1,64   | 98,36                | 90               | 100    |
| 1/2"       | 12,5           | 3129,80           | 37,25             | 0                 | 782,45  | 11,55    | 0,00    | 794,00                | 875,95    | 17,52  | 82,48                | -                | -      |
| 3/8"       | 9,50           | 991,80            | 773,75            | 0                 | 247,95  | 239,86   | 0,00    | 487,81                | 1363,76   | 27,28  | 72,72                | 56               | 80     |
| Nº4        | 4,75           | 507,30            | 3698,25           | 34                | 126,83  | 1146,46  | 14,96   | 1288,24               | 2652,00   | 53,04  | 46,96                | 35               | 65     |
| Nº8        | 2,36           | 43,29             | 474,00            | 473               | 10,82   | 146,94   | 208,12  | 365,88                | 3017,89   | 60,36  | 39,64                | 23               | 49     |
| Nº16       | 1,18           | 0,00              | 5,75              | 723               | 0,00    | 1,78     | 318,12  | 319,90                | 3337,79   | 66,76  | 33,24                | -                | -      |
| Nº30       | 0,60           | 0,00              | 1,25              | 989               | 0,00    | 0,39     | 435,16  | 435,55                | 3773,34   | 75,47  | 24,53                | -                | -      |
| Nº50       | 0,30           | 0,00              | 9,75              | 1401,5            | 0,00    | 3,02     | 616,66  | 619,68                | 4393,02   | 87,86  | 12,14                | 5                | 19     |
| Nº100      | 0,15           | 0,00              | 0,00              | 894,5             | 0,00    | 0,00     | 393,58  | 393,58                | 4786,60   | 95,73  | 4,27                 | -                | -      |
| Nº200      | 0,075          | 0,00              | 0,00              | 219,50            | 0,00    | 0,00     | 96,58   | 96,58                 | 4883,18   | 97,66  | 2,34                 | 2                | 8      |
| Base       | -              | 0,00              | 0,00              | 265,50            | 0,00    | 0,00     | 116,82  | 116,82                | 5000,00   | 100,00 | 0,00                 | -                | -      |
| Peso total |                | 5000,0            | 5000,0            | 5000,0            | 1250,00 | 1550,00  | 2200,00 | 5000,0                |           |        |                      |                  |        |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.29** Curva granulométrica formada y líneas de control



### Curva Granulométrica Método Marshall

Fuente: Elaboración propia

Esta dosificación de agregados será utilizada para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional 85/100 y para mezcla asfáltica en frío con emulsión RR-2C.

### 3.5. Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio

#### 3.5.1. Dosificación de la mezcla en función a la cantidad de cemento asfáltico 85/100

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizará el análisis de 6 porcentajes de asfalto con incrementos de 0,5 %, para la mezcla con los agregados.

Donde el tipo de mezcla elaborada será en caliente con una temperatura de mezclado de 150 °C; se realizará la cantidad de 3 briquetas por cada porcentaje de estudio.

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

**Tabla 3.36** Cantidad de agregados y cemento asfáltico para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente

| <b>Porcentaje de Cemento asfáltico (%)</b> | <b>4,5%</b>   | <b>5,0%</b>   | <b>5,5%</b>   | <b>6,0%</b>   | <b>6,5%</b>   | <b>7,0%</b>   |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Porcentaje de Agregado (%)</b>          | <b>95,5%</b>  | <b>95,0%</b>  | <b>94,5%</b>  | <b>94,0%</b>  | <b>93,5%</b>  | <b>93,0%</b>  |
| Peso de Grava (gr)                         | 286,50        | 285,00        | 283,50        | 282,00        | 280,50        | 279,00        |
| Peso de Gravilla (gr)                      | 355,26        | 353,40        | 351,54        | 349,68        | 347,82        | 345,96        |
| Peso de Arena (gr)                         | 504,24        | 501,60        | 498,96        | 496,32        | 493,68        | 491,04        |
| Peso de cemento asfáltico (gr)             | 54,0          | 60,0          | 66,0          | 72,0          | 78,0          | 84,0          |
| <b>Peso total de la briketa (gr)</b>       | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> |

Fuente: Elaboración propia

Determinada las cantidades necesarias de agregado para cada porcentaje de cemento asfáltico se procede a realizar la mezcla en caliente como se indica a continuación.

#### 3.5.1.1. Procedimiento para la construcción de briquetas (mezcla asfáltica en caliente)

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C. Así mismo se pesan en bandejas separadas las diversas fracciones de áridos calculadas para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una

temperatura de 110 a 120 °C; de igual forma se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C.

Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

**Figura 3.30** Calentado de agregados y vertido de asfalto para su posterior mezclado



Fuente: Elaboración propia

Se pesan luego sobre un plato las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

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

**Figura 3.31** Mezclado de materiales y control de temperatura



Fuente: Elaboración propia

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco; el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".

**Figura 3.32** Compactado de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

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

**Figura 3.33** Extracción de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.1.2. Determinación de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall**

El equipo Marshall, está diseñado para aplicar cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares; está equipado con un calibrador provisto de un anillo para determinar la carga de ensayos, de un marco de carga para ensayo de estabilidad y un medidor de flujo para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo.

Primero se debe realizar la limpieza de las briquetas evitando que tenga aristas o material desprendido, luego con un vernier se debe proceder a obtener las medidas de las alturas o espesor de la briqueta midiendo en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección por altura.

**Figura 3.34** Determinación de las dimensiones de la briqueta



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.2.1. Determinación de la densidad

Para ello se determinará el peso seco de los especímenes ( $W_s$ ), posteriormente se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 10 minutos a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  determinando así el peso sumergido ( $W_h$ ); se saca del agua, se seca con un paño, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seca ( $W_{ss}$ ), y se determina su peso.

**Figura 3.35** Determinación del peso seco de la muestra



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.36** Sumergido de las muestras y determinación del peso saturado con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.37** Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

#### **3.5.1.2.2. Determinación de la estabilidad y fluencia**

Se realizará el ensayo de estabilidad y fluencia, llevando las muestras a un baño María 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.

**Figura 3.38** Baño María a 60 °C



Fuente: Elaboración propia

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21 °C y 38 °C (70 a 100 °F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

**Figura 3.39** Briquetas con distintos porcentajes de asfalto para ser ensayadas



Fuente: Elaboración propia

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto (2" / minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de Estabilidad Marshall.

**Figura 3.40** Ensayo de estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia

Mientras se realiza el ensayo de Estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (Flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

**Figura 3.41** Briquetas después de romper en Marshall



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.2.3. Resultados obtenidos del ensayo de estabilidad y fluencia para mezcla asfáltica en caliente

Los datos reportados después de realizar el ensayo Marshall son los siguientes:

**Tabla 3.37** Peso específico de los materiales

| <b>Pesos específicos</b>     |                                    |                                     |                           |
|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                              | <b>Material</b>                    | <b>P.e.<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Dosificación<br/>%</b> |
| <b>Agregados</b>             | Grava                              | 2,70                                | 25                        |
|                              | Gravilla                           | 2,72                                | 31                        |
|                              | Arena                              | 2,75                                | 44                        |
|                              | Filler                             | 0                                   | 0                         |
| <b>Cemento asfáltico</b>     | C. A. Betunel<br>85/100            | 1.04                                |                           |
| <b>Peso específico total</b> |                                    |                                     |                           |
|                              |                                    | <b>P.e.<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> |                           |
|                              | <b>Material retenido Tamiz ° 4</b> | 2,71                                | 53,04                     |
|                              | <b>Material pasa Tamiz N° 4</b>    | 2,75                                | 46,96                     |
|                              | <b>Total</b>                       | 2,73                                | 100,00                    |

Fuente: Elaboración propia

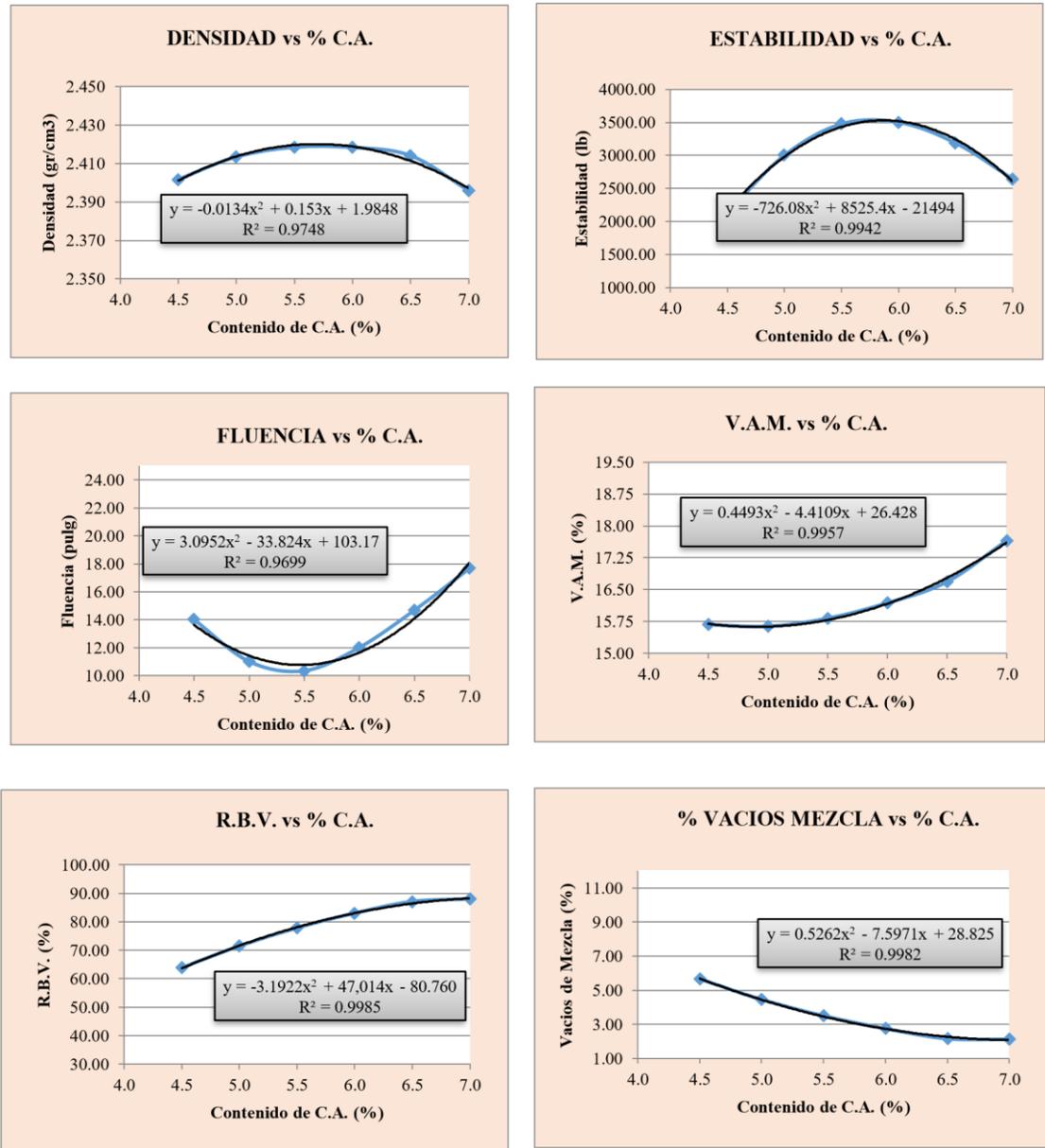
La temperatura de mezclado de materiales para la mezcla asfáltica fue de 160 °C, y la compactación se realizó con 75 golpes por cara.

**Tabla 3.38** Resultados obtenidos del ensayo Marshall

| Planilla método Marshall para el contenido óptimo de cemento asfáltico |              |                |                            |               |                |                   |                 |                   |                   |                         |                          |                                 |                                  |                      |        |   |                            |                      |                        |                   |           |           |
|--|--------------|----------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|--------|---|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| N° de probeta  | % de Asfalto |                | altura promedio de probeta | Peso Briqueta |                |                   | Volumen probeta | Densidad Briqueta |                   |                         | % de Vacíos              |                                 |                                  | Estabilidad Marshall |        |   |                            |                      | Fluencia               |                   |           |           |
|  | base mezcla  | base agregados |                            | seco          | sat. Sup. Seca | sumergida en agua |                 | densidad real     | Densidad promedio | densidad máxima teórica | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B.V. (relación bitumen vacíos) | lectura del dial     | carga  | factor de corrección de altura de probeta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | lectura dial del flujo | Fluencia promedio |           |           |
|  | %            | %              |                            | cm            | grs.           | grs.              |                 | grs.              | cm <sup>3</sup>   | grs/cm <sup>3</sup>     | grs/cm <sup>3</sup>      | grs/cm <sup>3</sup>             | %                                | %                    | %      | mm  | libras                     | -                    | libras                 | libras            | 0,01 pulg | 0,01 pulg |
| 1  | 4,50         | 4,71           | 6,10                       | 1144,3        | 1149,3         | 665               | 484,3           | 2,36              | 2,40              | 2,54                    | 5,27                     | 15,66                           | 66,36                            | 880                  | 2351,4 | 1,07                                      | 2518,40                    | 2143,4               | 8                      | 14,00             |           |           |
| 2  |              |                | 6,50                       | 1239,3        | 1241,3         | 720               | 521,3           | 2,38              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 692                  | 1845,2 | 0,96                                      | 1776,00                    |                      | 23                     |                   |           |           |
| 3  |              |                | 6,40                       | 1290,6        | 1293,6         | 770               | 523,6           | 2,46              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 810                  | 2162,9 | 0,99                                      | 2135,91                    |                      | 11                     |                   |           |           |
| 4  | 5,00         | 5,26           | 6,40                       | 1174,0        | 1179,4         | 687               | 492,4           | 2,38              | 2,41              | 2,51                    | 4,01                     | 15,61                           | 74,31                            | 1154                 | 3089,3 | 0,99                                      | 3050,65                    | 3001,1               | 11                     | 11,00             |           |           |
| 5  |              |                | 6,30                       | 1183,4        | 1187,9         | 692               | 495,9           | 2,39              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1082                 | 2895,4 | 1,01                                      | 2933,03                    |                      | 10                     |                   |           |           |
| 6  |              |                | 6,20                       | 1268,7        | 1271,7         | 758               | 513,7           | 2,47              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1085                 | 2903,5 | 1,04                                      | 3019,61                    |                      | 12                     |                   |           |           |
| 7  | 5,50         | 5,82           | 6,00                       | 1136,3        | 1138,7         | 672               | 466,7           | 2,43              | 2,42              | 2,49                    | 3,01                     | 15,80                           | 80,97                            | 1339                 | 3587,4 | 1,10                                      | 3956,94                    | 3475,3               | 10                     | 10,33             |           |           |
| 8  |              |                | 6,50                       | 1231,8        | 1233,5         | 719               | 514,5           | 2,39              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1204                 | 3223,9 | 0,96                                      | 3103,01                    |                      | 10                     |                   |           |           |
| 9  |              |                | 6,00                       | 1251,7        | 1254,8         | 739               | 515,8           | 2,43              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1140                 | 3051,6 | 1,10                                      | 3365,88                    |                      | 11                     |                   |           |           |
| 10   | 6,00         | 6,38           | 6,45                       | 1180,8        | 1183,5         | 689               | 494,5           | 2,39              | 2,42              | 2,47                    | 2,20                     | 16,15                           | 86,37                            | 1261                 | 3377,4 | 0,98                                      | 3292,96                    | 3500,9               | 12                     | 12,00             |           |           |
| 11   |              |                | 6,40                       | 1186,6        | 1190,3         | 704               | 486,3           | 2,44              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1296                 | 3471,6 | 0,99                                      | 3428,25                    |                      | 13                     |                   |           |           |
| 12   |              |                | 6,30                       | 1200,5        | 1202,6         | 708               | 494,6           | 2,43              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1393                 | 3732,8 | 1,01                                      | 3781,38                    |                      | 11                     |                   |           |           |
| 13   | 6,50         | 6,95           | 6,25                       | 1182,0        | 1183,3         | 690               | 493,3           | 2,40              | 2,41              | 2,45                    | 1,56                     | 16,65                           | 90,63                            | 1008                 | 2696,1 | 1,03                                      | 2768,92                    | 3185,3               | 18                     | 14,67             |           |           |
| 14   |              |                | 6,20                       | 1169,0        | 1170,2         | 689               | 481,2           | 2,43              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1280                 | 3428,6 | 1,04                                      | 3565,71                    |                      | 12                     |                   |           |           |
| 15   |              |                | 6,20                       | 1198,0        | 1200,7         | 705               | 495,7           | 2,42              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1157                 | 3097,3 | 1,04                                      | 3221,24                    |                      | 14                     |                   |           |           |
| 16   | 7,00         | 7,53           | 6,20                       | 1160,8        | 1162,1         | 677               | 485,1           | 2,39              | 2,40              | 2,43                    | 1,49                     | 17,61                           | 91,56                            | 936                  | 2502,2 | 1,04                                      | 2602,33                    | 2641,7               | 17                     | 17,67             |           |           |
| 17   |              |                | 6,30                       | 1185,3        | 1186,6         | 686               | 500,6           | 2,37              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1039                 | 2779,6 | 1,01                                      | 2815,73                    |                      | 17                     |                   |           |           |
| 18   |              |                | 6,20                       | 1206,0        | 1208,0         | 711               | 497,0           | 2,43              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 902                  | 2410,7 | 1,04                                      | 2507,11                    |                      | 19                     |                   |           |           |
| Especificaciones   |              |                | mínimo                     |               |                |                   |                 |                   |                   |                         |                          | 3                               | 13                               | 75                   |        |   |                            |                      |                        | 1800              |           | 8         |
|  |              |                | máximo                     |               |                |                   |                 |                   |                   |                         |                          | 5                               | -                                | 82                   |        |   |                            |                      |                        | -                 |           | 16        |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.42** Gráficas del método Marshall para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.3. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

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

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

**Tabla 3.39** Tabla de resultados para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

|   | <b>Ensayo</b>                         | <b>Valor de Diseño</b> | <b>% de C.A.</b> |
|---|---------------------------------------|------------------------|------------------|
| <b>Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b> | Estabilidad Marshall (Lb)             | 3531,63                | 5,87             |
|   | Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,42                   | 5,71             |
|   | Vacíos de la mezcla (%)               | 4,00                   | 5,17             |
|   | <b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>    | <b>Promedio</b>        | <b>5,58</b>      |

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos de densidad, estabilidad, fluencia, porcentaje 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 máximos que se utilizarán para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

Del análisis de las diferentes gráficas realizadas se determinó que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico es de 5,58 %, que será utilizado para la realización de las mezclas asfálticas convencionales.

### 3.5.2. Dosificación de la mezcla en función a la cantidad de emulsión asfáltica RR2C

Para la determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica, se realizará de igual forma que el análisis con cemento asfáltico, analizando 6 porcentajes de emulsión con incrementos de 0,5 %, para la mezcla con los agregados. Se realizará 3 briquetas para cada porcentaje de emulsión a analizar.

Para elaborar cada probeta se mezclarán las cantidades necesarias de cada fracción de agregado y asfalto para alcanzar un peso de 1200gr

**Tabla 3.40** Cantidad de materiales para la elaboración de mezclas asfálticas en frío

|   |                    |               |               |               |               |               |
|---|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Porcentaje de Briqueta</b>                       | 100 %              |               |               |               |               |               |
| <b>Residuo de Emulsión por destilación</b>          | 75,0 %             |               |               |               |               |               |
| <b>Porcentaje de Emulsión Residual en la mezcla</b> | X %                |               |               |               |               |               |
| <b>Porcentaje de Emulsión asfáltica</b>             | $Y = X * 100 / 75$ |               |               |               |               |               |
| <b>Porcentaje de Agregado</b>                       | 100 – Y %          |               |               |               |               |               |
| <b>Porcentaje de agua adicional</b>                 | 3 %                |               |               |               |               |               |
|   | <b>4,5%</b>        | <b>5,0%</b>   | <b>5,5%</b>   | <b>6,0%</b>   | <b>6,5%</b>   | <b>7,0%</b>   |
| <b>Porcentaje de Emulsión (%)</b>                   | <b>6,0%</b>        | <b>6,7%</b>   | <b>7,3%</b>   | <b>8,0%</b>   | <b>8,7%</b>   | <b>9,3%</b>   |
| <b>Porcentaje de Agregado (%)</b>                   | <b>94,0%</b>       | <b>93,3%</b>  | <b>92,7%</b>  | <b>92,0%</b>  | <b>91,3%</b>  | <b>90,7%</b>  |
| Peso de Grava (gr)                                  | 282,00             | 280,00        | 278,00        | 276,00        | 274,00        | 272,00        |
| Peso de Gravilla (gr)                               | 349,68             | 347,20        | 344,72        | 342,24        | 339,76        | 337,28        |
| Peso de Arena (gr)                                  | 496,32             | 492,80        | 489,28        | 485,76        | 482,24        | 478,72        |
| Peso de emulsión asfáltica (gr)                     | 72,00              | 80,00         | 88,00         | 96,00         | 104,00        | 112,00        |
| Peso del agua adicional (gr)                        | 36,00              | 36,00         | 36,00         | 36,00         | 36,00         | 36,00         |
| <b>Peso total de la briqueta (gr)</b>               | <b>1200,0</b>      | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> | <b>1200,0</b> |

Fuente: Elaboración propia

#### 3.5.2.1. Procedimiento para la construcción de briquetas (mezcla asfáltica en frío)

Para la elaboración de las briquetas con emulsión asfáltica RR-2C, se deberá colocar en bandejas las cantidades calculadas de áridos para cada briqueta y posteriormente se coloca la cantidad de emulsión, para luego amasarla bien hasta verificar el completo recubrimiento de los agregados por la emulsión logrando así una mezcla homogénea.

**Figura 3.43** Colocado de las cantidades necesarias de materiales para cada briqueta

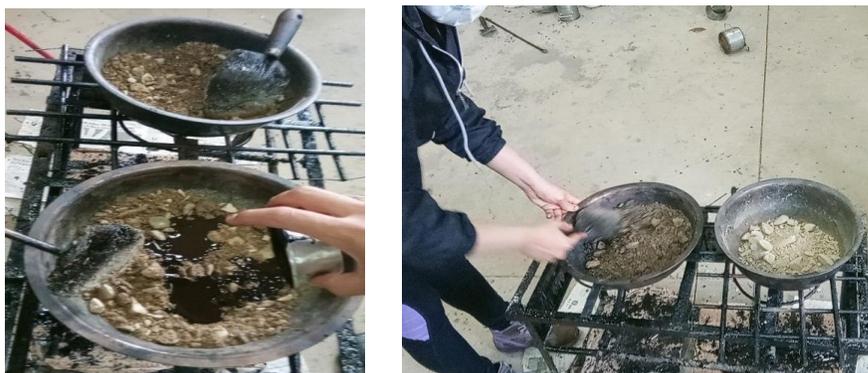


Fuente: Elaboración propia

Se preparan los moldes colocando en el fondo papel filtro, la mezcla se introduce en el molde con su collarín y se acomoda para repartirla sin que exista una disgregación de los áridos, se coloca otro papel filtro en la parte superior antes de compactar.

A continuación, se coloca el molde con la mezcla sobre el pedestal de compactación y se ajusta el dispositivo de este que sostiene el molde; con el pistón o martillo de compactación se aplicarán 75 golpes sobre la mezcla.

**Figura 3.44** Mezclado de materiales



Fuente: Elaboración propia

La altura de caída del martillo es de 18" y debe mantenerse el eje del pistón en posición normal a la base del molde.

Una vez aplicado el número de golpes de compactación establecido, se libera el molde de sujeción y se quita el collarín, se invierte el molde conteniendo el espécimen, se vuelve a colocar el collarín y el dispositivo que sostiene al molde y enseguida se aplica en la otra cara del espécimen el mismo número de golpes que en la otra cara.

**Figura 3.45** Preparación del molde con la mezcla para su compactación



Fuente: Elaboración propia

Compactados los especímenes se les remueve la base y todavía en el molde se los coloca a temperatura ambiente por 24 horas. Luego se extraen los especímenes del molde y se coloca en el horno a una temperatura constante de 41 °C por 72 horas.

**Figura 3.46** Extracción de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.47** Curado de las briquetas en horno por 72 horas



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.2.2. Determinación de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall**

Primero se debe realizar la limpieza de las briquetas evitando que tenga aristas o material desprendido, luego con un vernier se debe proceder a obtener las medidas de las alturas o espesor de la briqueta midiendo en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección por altura.

**Figura 3.48** Determinación de la altura de la briqueta



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.2.1. Determinación de la densidad

Se debe tomar tres pesos para la determinación de la densidad, el peso seco al aire de los especímenes ( $W_s$ ).

Luego se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 10 minutos a una temperatura de 25°C determinando así el peso sumergido ( $W_h$ ); para el peso saturado con superficie seca ( $W_{ss}$ ) se debe procurar eliminar el exceso de agua en la superficie de la briqueta.

**Figura 3.49** Determinación del peso seco y sumergido en baño María



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.2.2. Determinación de la estabilidad y fluencia

Después de que la densidad se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a 25 °C  $\pm$  1°C de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

**Figura 3.50** Briquetas en Baño María a 25 °C



Fuente: Elaboración propia

Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando la briqueta en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga.

Posteriormente, se aplica la carga de prueba a la briqueta a una deformación de 51 mm (2") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de la Estabilidad Marshall. Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura y registrara como el valor de Flujo Marshall.

**Figura 3.51** Ensayo de estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia

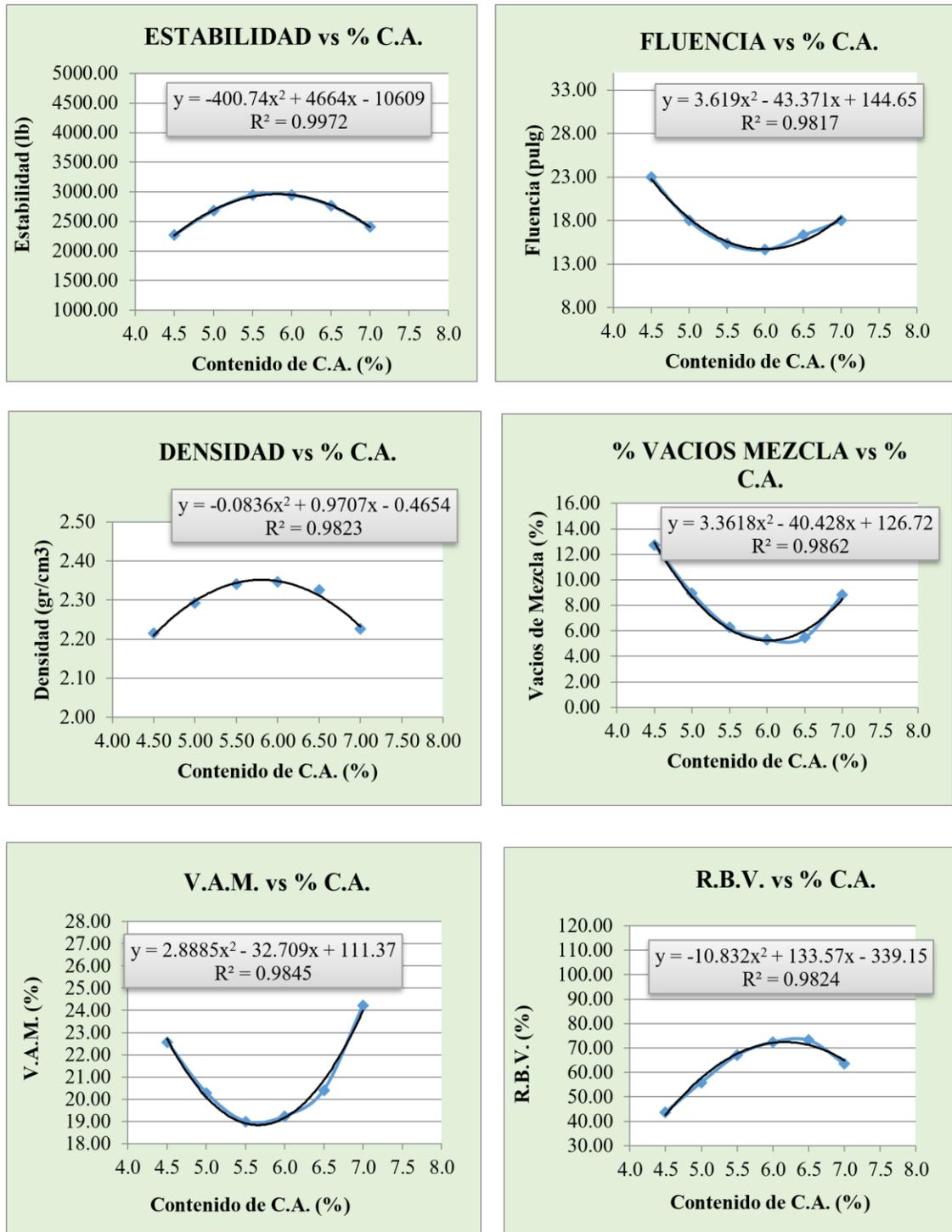
### 3.5.2.2.3. Resultados obtenidos del ensayo de estabilidad y fluencia para mezcla asfáltica en frío

**Tabla 3.41** Resultados obtenidos del ensayo Marshall

| Planilla de diseño Marshall para la obtención del contenido óptimo |                   |                                 |                 |               |                |                   |         |                   |                   |                         |                          |                                 |                                  |                      |         |   |                            |                      |                        |                   |      |      |
|--|-------------------|---------------------------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------|---|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------|------|
| N° de probeta  | altura de probeta | % Emulsión                      |                 | Peso Briqueta |                |                   | Volumen | Densidad Briqueta |                   |                         | % de Vacíos              |                                 |                                  | Estabilidad Marshall |         |   |                            |                      | Fluencia               |                   |      |      |
|  |                   | % Asfalto Residual en la mezcla | % Agua Incluida | seco          | sat. Sup. Seca | sumergida en agua | probeta | densidad real     | Densidad promedio | densidad máxima teórica | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B.V. (relación bitumen vacíos) | lectura del dial     | carga   | factor de corrección de altura de probeta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | lectura dial del flujo | Fluencia promedio |      |      |
|  |                   |                                 |                 | grs.          |                |                   |         |                   |                   |                         |                          |                                 |                                  |                      |         |   |                            |                      |                        |                   | grs. | grs. |
| 1  | 6,57              | 4,50                            | 3               | 1192,5        | 1195,7         | 675               | 520,7   | 2,29              | 2,21              | 2,54                    | 12,66                    | 22,52                           | 43,80                            | 866                  | 2313,74 | 0,95                                      | 2195,28                    | 2266,55              | 25                     | 23,00             |      |      |
| 2  | 6,12              |                                 |                 | 1223,4        | 1227,1         | 694               | 533,1   | 2,29              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 869                  | 2321,82 | 1,07                                      | 2472,74                    |                      | 23                     |                   |      |      |
| 3  | 6,34              |                                 |                 | 1151,2        | 1155,5         | 596               | 559,5   | 2,06              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 796                  | 2125,25 | 1,00                                      | 2131,62                    |                      | 21                     |                   |      |      |
| 4  | 6,25              | 5,00                            | 3               | 1181,3        | 1191,6         | 636               | 555,6   | 2,13              | 2,29              | 2,52                    | 8,89                     | 20,23                           | 56,07                            | 986                  | 2636,88 | 1,03                                      | 2708,08                    | 2677,65              | 18                     | 18,00             |      |      |
| 5  | 6,80              |                                 |                 | 1202,5        | 1208,8         | 731               | 477,8   | 2,52              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 975                  | 2607,26 | 0,90                                      | 2340,01                    |                      | 21                     |                   |      |      |
| 6  | 6,30              |                                 |                 | 1179,1        | 1182,3         | 654               | 528,3   | 2,23              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1101                 | 2946,55 | 1,01                                      | 2984,86                    |                      | 15                     |                   |      |      |
| 7  | 6,16              | 5,50                            | 3               | 1196,3        | 1202,4         | 663               | 539,4   | 2,22              | 2,34              | 2,50                    | 6,19                     | 18,94                           | 67,32                            | 1101                 | 2946,55 | 1,05                                      | 3102,72                    | 2945,40              | 17                     | 15,33             |      |      |
| 8  | 6,45              |                                 |                 | 1224,7        | 1233,8         | 671               | 562,8   | 2,18              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1098                 | 2938,47 | 0,98                                      | 2865,01                    |                      | 15                     |                   |      |      |
| 9  | 6,35              |                                 |                 | 1208,5        | 1211,6         | 752               | 459,6   | 2,63              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1072                 | 2868,46 | 1,00                                      | 2868,46                    |                      | 14                     |                   |      |      |
| 10   | 6,00              | 6,00                            | 3               | 1119,8        | 1124,7         | 661               | 463,7   | 2,41              | 2,35              | 2,48                    | 5,24                     | 19,18                           | 72,70                            | 1022                 | 2733,82 | 1,10                                      | 3015,40                    | 2942,74              | 14                     | 14,67             |      |      |
| 11   | 6,00              |                                 |                 | 1139,9        | 1176,6         | 672               | 504,6   | 2,26              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 1098                 | 2938,47 | 1,10                                      | 3241,14                    |                      | 15                     |                   |      |      |
| 12   | 6,50              |                                 |                 | 1157,7        | 1162,3         | 673               | 489,3   | 2,37              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 999                  | 2671,89 | 0,96                                      | 2571,69                    |                      | 15                     |                   |      |      |
| 13   | 6,20              | 6,50                            | 3               | 1148,0        | 1151,0         | 656               | 495,0   | 2,32              | 2,32              | 2,46                    | 5,40                     | 20,36                           | 73,49                            | 1011                 | 2704,20 | 1,04                                      | 2812,37                    | 2763,14              | 16                     | 16,33             |      |      |
| 14   | 6,20              |                                 |                 | 1146,6        | 1150,4         | 658               | 492,4   | 2,33              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 997                  | 2666,50 | 1,04                                      | 2773,16                    |                      | 18                     |                   |      |      |
| 15   | 6,30              |                                 |                 | 1151,3        | 1155,9         | 661               | 494,9   | 2,33              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 998                  | 2669,19 | 1,01                                      | 2703,89                    |                      | 15                     |                   |      |      |
| 16   | 6,45              | 7,00                            | 3               | 1194,5        | 1196,6         | 685               | 685,0   | 1,74              | 2,23              | 2,44                    | 8,75                     | 24,18                           | 63,79                            | 971                  | 2596,49 | 0,98                                      | 2531,58                    | 2410,06              | 17                     | 18,00             |      |      |
| 17   | 6,15              |                                 |                 | 1153,3        | 1155,0         | 663               | 492,0   | 2,34              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 894                  | 2389,14 | 1,06                                      | 2522,93                    |                      | 19                     |                   |      |      |
| 18   | 6,65              |                                 |                 | 1172,7        | 1175,1         | 653               | 453,2   | 2,59              |                   |                         |                          |                                 |                                  | 872                  | 2329,90 | 0,93                                      | 2175,66                    |                      | 18                     |                   |      |      |
| Especificaciones   |                   |                                 |                 | mínimo        |                |                   |         |                   |                   |                         |                          | 3                               | 13                               | 75                   |         |   |                            |                      |                        | 1800              |      | 8    |
|  |                   |                                 |                 | máximo        |                |                   |         |                   |                   |                         |                          | 5                               | -                                | 82                   |         |   |                            |                      |                        | -                 |      | 16   |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.52** Gráficas del método Marshall para la determinación del porcentaje óptimo del asfalto residual



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.3. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto residual

La determinación del porcentaje óptimo de asfalto residual se realiza de la misma forma que en la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla asfáltica en caliente; los resultados se muestran a continuación.

**Tabla 3.42** Tabla de resultados para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto residual

|  | <b>Ensayo</b>                          | <b>Valor de Diseño</b> | <b>% emulsión</b> |
|--|--|------------------------|-------------------|
| <b>Determinación del porcentaje óptimo de asfalto residual</b> | Estabilidad Marshall (Lb)              | 2961,45                | 5,82              |
|  | Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )  | 2,35                   | 5,81              |
|  | Vacíos de la mezcla (%)                | 4,24                   | 5,98              |
|  | <b>% Porcentaje óptimo de Emulsión</b> | <b>Promedio</b>        | <b>5,87</b>       |

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de las diferentes gráficas realizadas se determinó que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico residual es de 5,87 %, que será utilizado para la realización de las mezclas asfálticas elaboradas en frío.

## 3.6. Metodología de fabricación de las briquetas para el ensayo de tracción indirecta

### 3.6.1. Elaboración de mezclas en caliente con cemento asfáltico convencional

Para una mezcla asfáltica en caliente se deben combinar, el cemento asfáltico y los agregados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente, el desempeño de la misma.

La construcción de las briquetas para el ensayo de tracción indirecta se lo realizará en base a la cantidad óptima obtenida de cemento asfáltico mediante el diseño Marshall. Con esta cantidad se realizará la dosificación para determinar las proporciones de agregado grueso y fino.

Al igual que para el ensayo Marshall las cantidades de materiales serán para briquetas de peso 1200 gr.

**Tabla 3.43** Determinación de cantidades de material para cada briqueta

| Porcentaje óptimo de cemento asfáltico        |       |          |       | 5,58 %                |
|---|-------|----------|-------|-----------------------|
| Material                                      | Grava | Gravilla | Arena | al 94,42 %            |
| Porcentaje                                    | 25 %  | 31 %     | 44 %  |                       |
| Cantidad de material para un peso de 1200 gr. |       |          |       |                       |
| Material                                      |       |          | %     | Peso de material (gr) |
| Grava   |       |          | 23,61 | 283,26                |
| Gravilla                                      |       |          | 29,27 | 351,24                |
| Arena   |       |          | 41,54 | 498,54                |
| Cemento asfáltico                             |       |          | 5,58  | 66,96                 |
| <b>Peso total</b>                             |       |          |       | <b>1200</b>           |

Fuente: Elaboración propia

Las briquetas para el ensayo de tracción indirecta se elaborarán siguiendo el mismo procedimiento que para el ensayo Marshall.

**Figura 3.53** Cantidades de material para cada briqueta

Fuente: Elaboración propia

Se calentará y mezclará completamente el agregado y el cemento asfáltico hasta que todas las partículas estén revestidas del material bituminoso. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en planta, cuidando siempre de elevar lentamente la temperatura del asfalto para no alterar sus propiedades.

Las mezclas asfálticas calientes las colocamos en los moldes pre-calentados, para que la mezcla no pierda calor, el martillo Marshall también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla a compactar.

Se procederá con el compactado, se enfriará y extraerán de los moldes, para ser ensayadas posteriormente.

**Tabla 3.44** Ensayo Marshall a briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico 85/100

| N°              | Altura (cm) | Peso briqueta |                     |                | Volumen                    |                                | Vacíos<br>% vacíos | Estabilidad |                | Fluencia<br>dial |
|-----------------|-------------|---------------|---------------------|----------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------|----------------|------------------|
|                 |             | Seco (gr)     | Sat. Sup. Seca (gr) | Sumergido (gr) | Probeta (cm <sup>3</sup> ) | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) |                    | dial        | carga          |                  |
| 1               | 6,21        | 1161,3        | 1165,0              | 678            | 487,0                      | 2,38                           | 4,28               | 1210        | 3359,95        | 18               |
| 2               | 6,25        | 1176,3        | 1188,4              | 692            | 496,4                      | 2,37                           |                    | 1245        | 3424,34        | 13               |
| 3               | 6,15        | 1158,3        | 1161,4              | 673            | 488,4                      | 2,37                           |                    | 1331        | 3754,89        | 14               |
| <b>Promedio</b> |             |               |                     |                |                            | <b>2,38</b>                    |                    |             | <b>3513,06</b> | <b>15</b>        |

Fuente: Elaboración propia

**3.6.2. Elaboración de mezclas en frío con emulsión RR-2C**

Una vez realizados los ensayos a las mezclas asfálticas elaboradas con los diferentes porcentajes de emulsión, con las cuales se obtuvo un porcentaje óptimo.

Con este porcentaje óptimo se procederá a realizar las briquetas que servirán para realizar el ensayo de tracción indirecta a mezcla elaboradas en frío.

Para ello se realiza el cálculo de las diferentes cantidades de material pétreo con respecto al porcentaje óptimo de asfalto residual.

**Tabla 3.45** Determinación de cantidades de material para cada briqueta

| Porcentaje óptimo de asfalto residual         |       |          |                       | 5,87 %      |
|---|-------|----------|-----------------------|-------------|
| Porcentaje de emulsión                        |       |          |                       | 7,83 %      |
| Material                                      | Grava | Gravilla | Arena                 | al 92,17 %  |
| Porcentaje                                    | 25 %  | 31 %     | 44 %                  |             |
| Cantidad de material para un peso de 1200 gr. |       |          |                       |             |
| Material                                      | %     |          | Peso de material (gr) |             |
| <b>Grava</b>                                  | 23,04 |          | 276,52                |             |
| <b>Gravilla</b>                               | 28,57 |          | 342,88                |             |
| <b>Arena</b>                                  | 40,56 |          | 486,68                |             |
| <b>Emulsión asfáltica</b>                     | 7,83  |          | 93,92                 |             |
| <b>Agua adicional</b>                         |       |          | 36,00                 |             |
| <b>Peso total</b>                             |       |          |                       | <b>1200</b> |

Fuente: Elaboración propia

Con las cantidades determinadas para cada espécimen se procede a la construcción de las diferentes briquetas, siguiendo el mismo procedimiento que para el ensayo Marshall, para que posteriormente sean analizadas con el ensayo de tracción indirecta.

**Tabla 3.46** Ensayo Marshall a briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de Emulsión

| N°              | Altura (cm) | Peso briqueta |                     |                | Volumen<br>Probeta (cm <sup>3</sup> ) | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Vacíos<br>% vacíos | Estabilidad |                | Fluencia<br>dial |
|-----------------|-------------|---------------|---------------------|----------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------|----------------|------------------|
|                 |             | Seco (gr)     | Sat. Sup. Seca (gr) | Sumergido (gr) |                                       |                                |                    | dial        | carga          |                  |
| 1               | 6,18        | 1178,0        | 1182,0              | 662            | 520,0                                 | 2,27                           | 4,55               | 1087        | 3042,66        | 20               |
| 2               | 6,29        | 1174,0        | 1170,0              | 688            | 482,0                                 | 2,44                           |                    | 1063        | 2889,73        | 18               |
| 3               | 6,17        | 1163,6        | 1174,0              | 667            | 507,0                                 | 2,30                           |                    | 1023        | 2870,60        | 25               |
| <b>Promedio</b> |             |               |                     |                |                                       | <b>2,33</b>                    |                    |             | <b>2934,33</b> | <b>21</b>        |

Fuente: Elaboración propia

### 3.7. Ensayo a Tracción Indirecta

#### Generalidades

El ensayo a tracción indirecta fue desarrollado por Thomas Kennedy; es un ensayo que se destaca por su sencillez de ejecución y confiabilidad en sus resultados al mostrar poca dispersión. Este ensayo utiliza especímenes o briquetas similares a las utilizadas en el ensayo Marshall, siendo sus dimensiones las siguientes: diámetro de  $102 \pm 1$  mm y altura aproximada de 67 mm (depende de la cantidad de material utilizado).

El ensayo consiste en ensayar los especímenes a compresión diametral aplicando una carga estática a una velocidad constante de 50,8 mm/min, utilizando la prensa Lottman y el equipo Marshall, hasta causar la falla de la misma por fractura a lo largo del plano vertical. El valor obtenido es la resistencia máxima a rotura y es considerado como un indicador de la cohesión de la mezcla. Con el fin de obtener un parámetro de resistencia a tracción de la capa asfáltica y que resulte útil para comparar la calidad obtenida con la pretendida.

El procedimiento que se seguirá para la realización del ensayo de tracción indirecta estará de acuerdo a lo descrito en la norma NLT 346-90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”. Es importante mencionar que la prensa utilizada fue la del ensayo Marshall, cuyas características descritas en la norma NLT159/86, hace que sea la adecuada para emplearla en este ensayo.

El cálculo de la resistencia a tracción indirecta estará dado por la siguiente fórmula

$$S_t = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot t \cdot d}$$

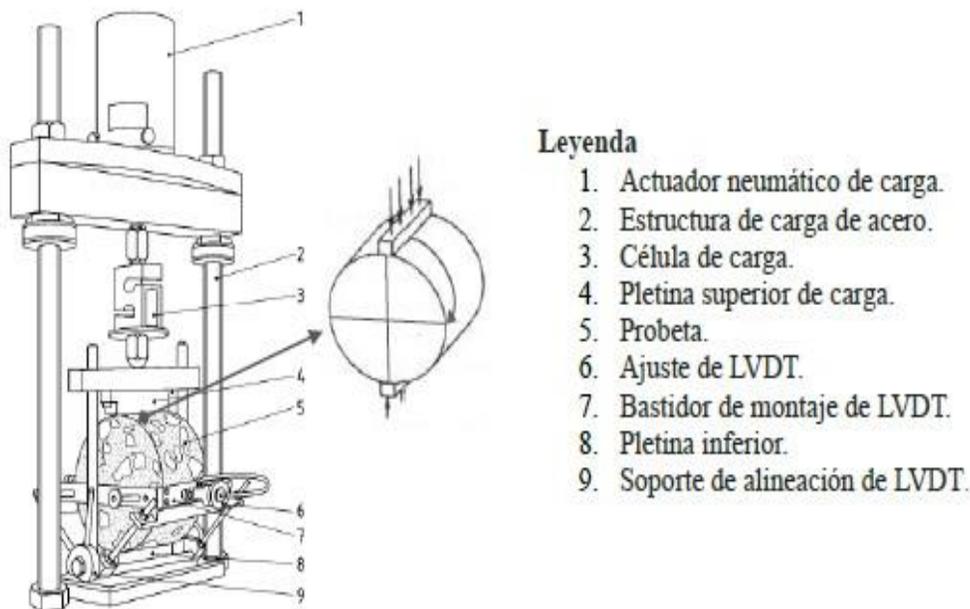
Donde:  $S_t$  = Resistencia a la rotura por tracción indirecta

$P$  = Carga máxima de rotura

$t$  = Espesor de la probeta

$d$  = Diámetro de la probeta

**Figura 3.54** Esquema del equipo del ensayo a tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia

### 3.7.1. Procedimiento del ensayo

**Probetas para ensayo:** El ensayo se puede realizar sobre probetas cilíndricas fabricadas en laboratorio o sobre testigos extraídos del pavimento. Aunque las dimensiones de las probetas no son característica privativa del ensayo, se deben utilizar preferentemente las de diámetro 101 mm y altura de unos 63 mm (probeta Marshall).

El proceso de compactación de la probeta (energía y temperatura) se efectuará de acuerdo con las características de la mezcla y del ligante asfáltico en estudio, y se puede realizar por medio de impacto (Marshall), amasado cizallamiento (máquina giratoria), compresión rápida (prensa) o cualquier otro conforme al fin perseguido en el ensayo. Para nuestro análisis se adoptó el impacto Marshall, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para elaborar briquetas que sirvieron para el diseño.

**Figura 3.55** Elaboración de las distintas mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.56** Briquetas terminadas elaboradas en caliente y en frío



Fuente: Elaboración propia

Para este ensayo primeramente con el calibrador se determina el diámetro  $\pm 0.1$  mm, de la probeta en seis planos, dos a dos perpendiculares: dos en el plano superior de la probeta, dos en el plano medio y dos en el plano inferior. El diámetro medio  $d$ , es la media aritmética de las seis medidas. La diferencia entre dos medidas individuales no será superior a 1 mm.

La altura de la probeta se mide también con precisión de  $\pm 0.1$  mm en cuatro puntos definidos por los extremos, dos planos diametrales perpendiculares con un radio de 10mm inferior al radio de la probeta. La altura media,  $h$ , es la media aritmética de las cuatro medidas. La diferencia entre dos medidas individuales no será superior al 5 % de la altura media, con un máximo de 5 mm.

**Figura 3.57** Medición de las dimensiones de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

**Acondicionamiento térmico de los especímenes.** - se las introduce a baño termostático regulado a  $25 \pm 1$  C. durante 6 h, y se sacan del mismo, una a una, inmediatamente antes de ensayarlas.

**Figura 3.58** Inmersión de las briquetas en baño María



Fuente: Elaboración propia

Se retira la probeta del baño termostático y se sitúa en el dispositivo de sujeción, o directamente entre los platos de la prensa, según sea el caso, con dos de sus generatrices opuestas en contacto con los mismos.

**Figura 3.59** Colocado de las briquetas en la prensa Lottman junto con los elementos de medida de deformación horizontal y vertical



Fuente: Elaboración propia

Si se dispone de elementos de medida de deformación vertical y horizontal se colocan en posición de medida y se ajustan a cero.

**Figura 3.60** Briqueta lista para la aplicación de carga



Fuente: Elaboración propia

Se aplica la carga a la probeta manteniendo la velocidad de deformación de  $0,85 \pm 0,02$  mm constante hasta que se rompa la probeta.

**Figura 3.61** Aplicación de carga a velocidad constante



Fuente: Elaboración propia

El tiempo transcurrido entre el momento en que se retira una probeta del recinto termostático y la rotura de la misma en la prensa no debe exceder de 30 segundos.

Se registran o anotan los valores de la carga de rotura y los de desplazamiento vertical y deformación horizontal, si este es el caso.

**Figura 3.62** Falla del espécimen



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se podrá realizar una gráfica de la resistencia a tracción en el que se indica las cargas máximas aplicadas y sus deformaciones producidas por dicho valor de carga, a partir de ello se determinarán las siguientes magnitudes:

- Carga máxima de rotura
- Resistencia a tracción indirecta  $St$ , calculada a partir de la carga máxima de rotura.

Además del resultado de carga máxima y resistencia a tracción se registrarán las deformaciones en el vertical y horizontal de cada una de las briquetas ensayadas. El procedimiento que se siguió para la elaboración de briquetas y del ensayo de tracción indirecta para ambos tipos de mezcla asfáltica en caliente y en frío, fueron las mismas.

### 3.7.2. Resultados del ensayo a tracción indirecta

Los resultados obtenidos con la realización del ensayo a Tracción Indirecta se muestran a continuación:

#### 3.7.2.1. Resultados obtenidos a tracción indirecta en mezclas asfáltica elaborada en caliente con Cemento asfáltico 85/100

**Tabla 3.47** Dimensiones de las briquetas elaboradas en caliente

| Dimensiones de las briquetas |              |      |      |      |              |                |      |      |        |
|------------------------------|--------------|------|------|------|--------------|----------------|------|------|--------|
| N° briketa                   | Alturas (cm) |      |      |      | Prom. altura | Diámetros (cm) |      | Prom | Peso   |
| 1                            | 6,10         | 6,10 | 6,10 | 6,10 | 6,1          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1152,9 |
| 2                            | 6,10         | 6,10 | 6,14 | 6,15 | 6,1          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1155,6 |
| 3                            | 6,18         | 6,18 | 6,19 | 6,19 | 6,2          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1179,3 |
| 4                            | 6,10         | 6,10 | 6,12 | 6,10 | 6,1          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1169,8 |
| 5                            | 6,20         | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,2          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1184,4 |
| 6                            | 6,30         | 6,30 | 6,30 | 6,30 | 6,3          | 10,0           | 10,0 | 10,0 | 1196,9 |
| 7                            | 6,20         | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1175,8 |
| 8                            | 6,10         | 6,10 | 6,10 | 6,10 | 6,1          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1165,9 |
| 9                            | 6,20         | 6,19 | 6,19 | 6,20 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1182,7 |
| 10                           | 6,17         | 6,17 | 6,20 | 6,20 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1167,7 |
| 11                           | 6,17         | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1166,9 |
| 12                           | 6,20         | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,2          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1184,4 |
| 13                           | 6,30         | 6,30 | 6,30 | 6,30 | 6,3          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1179,5 |
| 14                           | 6,20         | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1184,6 |
| 15                           | 6,20         | 6,10 | 6,10 | 6,20 | 6,2          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1172,6 |
| 16                           | 6,10         | 6,11 | 6,10 | 6,10 | 6,1          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1167,5 |
| 17                           | 6,12         | 6,12 | 6,12 | 6,11 | 6,1          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1178,7 |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.48** Resultados del ensayo a tracción indirecta en mezcla en caliente

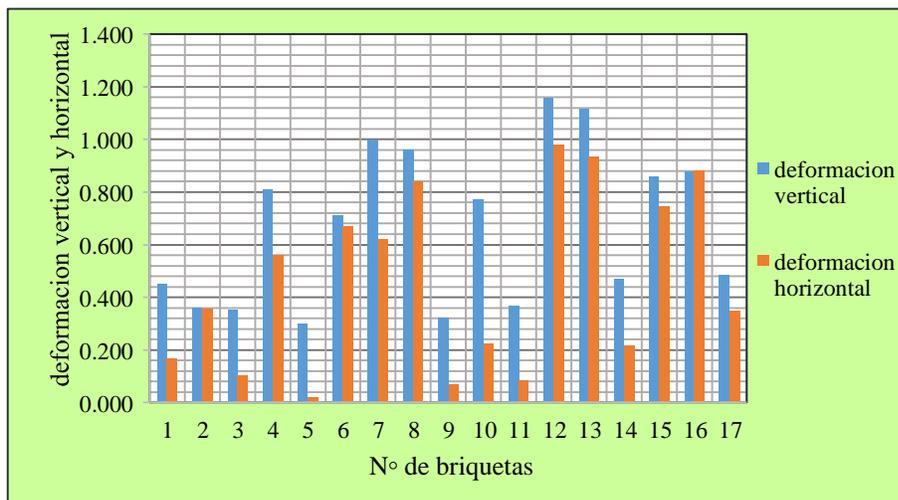
| N°<br>briqueta | Altura<br>(cm) | Diámetro<br>(cm) | Peso (gr) | Deformaciones (mm)       |                            | Carga aplicada |                |
|----------------|----------------|------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
|                |                |                  |           | Vertical<br>(lect. dial) | Horizontal<br>(lect. dial) | Dial           | Carga<br>(kgf) |
| 1              | 6,1            | 10,1             | 1152,9    | 0.450                    | 0.168                      | 834            | 1012,53        |
| 2              | 6,1            | 10,1             | 1155,6    | 0.360                    | 0.359                      | 830            | 1007,64        |
| 3              | 6,2            | 10,1             | 1179,3    | 0.354                    | 0.105                      | 848            | 1029,67        |
| 4              | 6,1            | 10,2             | 1169,8    | 0.810                    | 0.560                      | 795            | 964,80         |
| 5              | 6,2            | 10,1             | 1184,4    | 0.300                    | 0.021                      | 846            | 1027,22        |
| 6              | 6,3            | 10,0             | 1196,9    | 0.712                    | 0.670                      | 814            | 988,05         |
| 7              | 6,2            | 10,2             | 1175,8    | 0.998                    | 0.624                      | 810            | 983,16         |
| 8              | 6,1            | 10,1             | 1165,9    | 0.960                    | 0.840                      | 793            | 962,35         |
| 9              | 6,2            | 10,2             | 1182,7    | 0.325                    | 0.070                      | 863            | 1048,03        |
| 10             | 6,2            | 10,2             | 1167,7    | 0.774                    | 0.225                      | 824            | 1000,29        |
| 11             | 6,2            | 10,2             | 1166,9    | 0.368                    | 0.087                      | 851            | 1033,34        |
| 12             | 6,2            | 10,1             | 1184,4    | 1.160                    | 0.980                      | 798            | 968,47         |
| 13             | 6,3            | 10,2             | 1179,5    | 1.116                    | 0.934                      | 800            | 970,92         |
| 14             | 6,2            | 10,2             | 1184,6    | 0.469                    | 0.216                      | 850            | 1032,12        |
| 15             | 6,2            | 10,2             | 1172,6    | 0.858                    | 0.743                      | 797            | 967,25         |
| 16             | 6,1            | 10,2             | 1167,5    | 0.878                    | 0.881                      | 785            | 952,56         |
| 17             | 6,1            | 10,2             | 1178,7    | 0.483                    | 0.349                      | 830            | 1007,64        |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.63** Resistencia a tracción indirecta

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.64** Deformaciones verticales y horizontales observadas en las diferentes briquetas durante el ensayo a tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia

### 3.7.2.2. Resultados obtenidos a tracción indirecta en mezcla asfáltica elaborada en frío con Emulsión RR-2C

**Tabla 3.49** Dimensiones de las briquetas elaboradas en frío

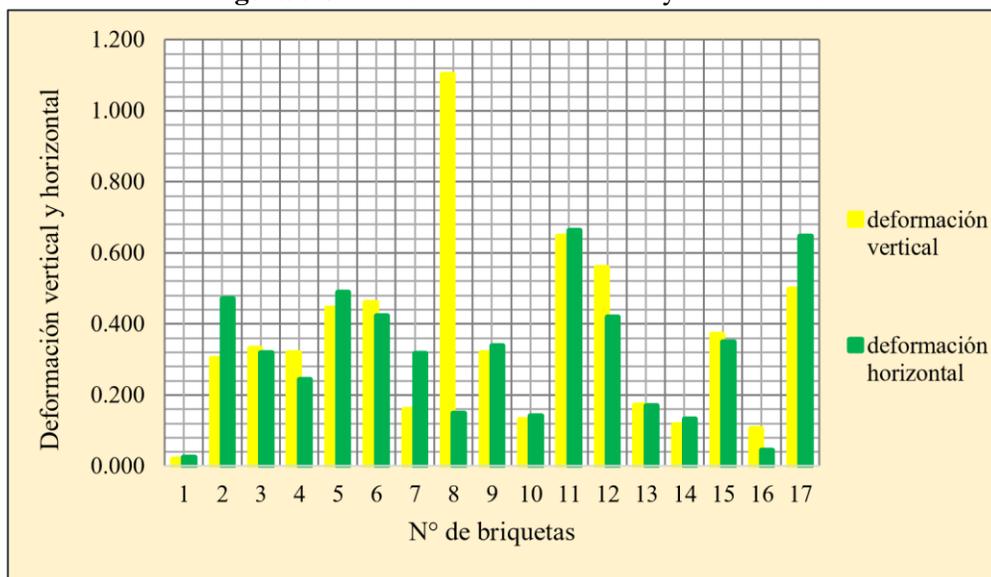
| Dimensiones de las briquetas |              |      |      |      |              |                |      |      |        |
|------------------------------|--------------|------|------|------|--------------|----------------|------|------|--------|
| N° briqueeta                 | Alturas (cm) |      |      |      | Prom. altura | Diámetros (cm) |      | Prom | Peso   |
| 1                            | 6,50         | 6,50 | 6,50 | 6,50 | 6,5          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1163,2 |
| 2                            | 6,30         | 6,28 | 6,30 | 6,30 | 6,3          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1124,3 |
| 3                            | 6,40         | 6,40 | 6,40 | 6,40 | 6,4          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1142,7 |
| 4                            | 6,70         | 6,70 | 6,70 | 6,70 | 6,7          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1170,3 |
| 5                            | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1161,4 |
| 6                            | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1149,3 |
| 7                            | 6,50         | 6,50 | 6,50 | 6,50 | 6,5          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1163,9 |
| 8                            | 6,70         | 6,70 | 6,70 | 6,70 | 6,7          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1161,0 |
| 9                            | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1155,8 |
| 10                           | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1166,4 |
| 11                           | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1166,6 |
| 12                           | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1166,5 |
| 13                           | 6,60         | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1149,0 |
| 14                           | 6,60         | 6,60 | 6,70 | 6,60 | 6,6          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1163,4 |
| 15                           | 6,60         | 6,50 | 6,50 | 6,50 | 6,5          | 10,1           | 10,2 | 10,2 | 1161,0 |
| 16                           | 6,50         | 6,51 | 6,50 | 6,52 | 6,5          | 10,2           | 10,2 | 10,2 | 1152,1 |
| 17                           | 6,62         | 6,60 | 6,60 | 6,61 | 6,6          | 10,1           | 10,1 | 10,1 | 1161,5 |

Fuente: Elaboración propia

**bla 3.50** Resultados del ensayo a tracción indirecta en mezcla en frío

| N°<br>briqueta | Altura<br>(cm) | Diámetro<br>(cm) | Peso (gr) | Deformaciones (mm)       |                            | Carga aplicada |                |
|----------------|----------------|------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
|                |                |                  |           | Vertical<br>(lect. dial) | Horizontal<br>(lect. dial) | Dial           | Carga<br>(kgf) |
| 1              | 6,5            | 10,1             | 1163,2    | 0.020                    | 0.025                      | 411            | 494.78         |
| 2              | 6,3            | 10,2             | 1124,3    | 0.303                    | 0.472                      | 315            | 377.28         |
| 3              | 6,4            | 10,2             | 1142,7    | 0.332                    | 0.320                      | 338            | 405.43         |
| 4              | 6,7            | 10,2             | 1170,3    | 0.320                    | 0.243                      | 377            | 453.17         |
| 5              | 6,6            | 10,2             | 1161,4    | 0.445                    | 0.489                      | 302            | 361.37         |
| 6              | 6,6            | 10,1             | 1149,3    | 0.460                    | 0.423                      | 321            | 384.62         |
| 7              | 6,5            | 10,2             | 1163,9    | 0.160                    | 0.317                      | 383            | 460.51         |
| 8              | 6,7            | 10,2             | 1161,0    | 1.103                    | 0.148                      | 135            | 156.96         |
| 9              | 6,6            | 10,2             | 1155,8    | 0.320                    | 0.339                      | 319            | 382.17         |
| 10             | 6,6            | 10,2             | 1166,4    | 0.131                    | 0.142                      | 410            | 493.56         |
| 11             | 6,6            | 10,2             | 1166,6    | 0.648                    | 0.663                      | 297            | 355.25         |
| 12             | 6,6            | 10,2             | 1166,5    | 0.560                    | 0.420                      | 315            | 377.28         |
| 13             | 6,6            | 10,2             | 1149,0    | 0.172                    | 0.170                      | 395            | 475.20         |
| 14             | 6,6            | 10,2             | 1163,4    | 0.117                    | 0.132                      | 146            | 490.67         |
| 15             | 6,5            | 10,2             | 1161,0    | 0.371                    | 0.350                      | 119            | 408.17         |
| 16             | 6,5            | 10,2             | 1152,1    | 0.105                    | 0.045                      | 148            | 496.79         |
| 17             | 6,6            | 10,1             | 1161,5    | 0.498                    | 0.647                      | 101            | 353.16         |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.65** Deformaciones verticales y horizontales

Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**  
**PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE**  
**RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de los resultados obtenidos mediante el ensayo a tracción indirecta

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades de resistencia de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente y en frío a través del ensayo a tracción indirecta. En este capítulo se realizará un análisis estadístico de dichos resultados como también se presentarán sus respectivas gráficas.

##### 4.1.1. Tracción indirecta en mezcla asfáltica elaborada en caliente

Los resultados que se presentan fueron realizados conforme indica la norma de ensayo NLT-360/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) en mezclas bituminosas”

##### Tensión de rotura

El fallo inicial se produce por rotura a tracción, por lo tanto, la resistencia a tracción indirecta en el momento de la rotura estará dada por la siguiente ecuación.

$$S_t = \frac{2 * P_{max}}{\pi * t * d}$$

Donde:

$S_t$  = Resistencia a la rotura por tracción indirecta

(kgf/cm<sup>2</sup>)  $P_{max}$  = Carga máxima o carga de rotura (kgf)  $t$  =

Espesor o altura de la probeta  $d$  = Diámetro de la probeta

##### Cálculo de la resistencia a la rotura por tracción indirecta

Para briqueta N° 1, cuyos datos son las siguientes:

Altura = 6,10 cm

Diámetro = 10,1 cm

Peso = 1152,9 gr

Carga máxima aplicada = 1012,53 kgf

$$S_t = \frac{2 * 1012,53 \text{ kgf}}{\pi * 6,10 \text{ cm} * 10,1 \text{ cm}}$$

$$S_t = 10,46 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Siguiendo este procedimiento se calculó las resistencias a la rotura por tracción indirecta para cada una de las briquetas.

**Tabla 4.1** Resultados del ensayo a tracción indirecta en mezcla en caliente

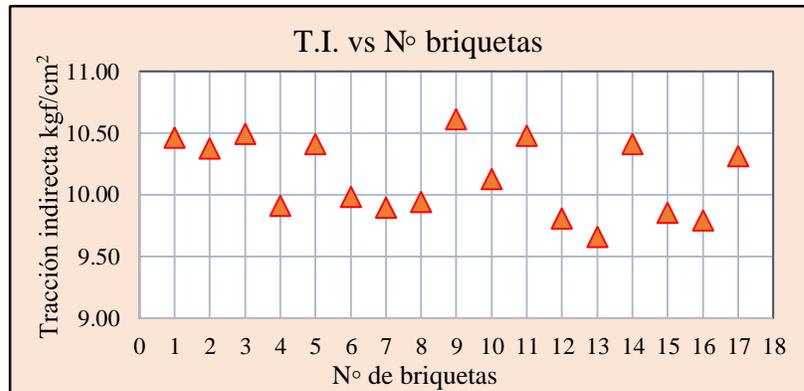
| N°<br>briqueta | Altura<br>(cm) | Diámetro<br>(cm) | Peso<br>(gr) | Deformations (mm)        |                            | Carga aplicada |                | Tracción<br>indirecta<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|----------------|------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------|---|
|                |                |                  |              | Vertical<br>(lect. dial) | Horizontal<br>(lect. dial) | Dial           | Carga<br>(kgf) |   |
| 1              | 6,1            | 10,1             | 1152,9       | 0.450                    | 0.168                      | 834            | 1012,53        | 10,46   |
| 2              | 6,1            | 10,1             | 1155,6       | 0.360                    | 0.359                      | 830            | 1007,64        | 10,37   |
| 3              | 6,2            | 10,1             | 1179,3       | 0.354                    | 0.105                      | 848            | 1029,67        | 10,49   |
| 4              | 6,1            | 10,2             | 1169,8       | 0.810                    | 0.560                      | 795            | 964,80         | 9,91  |
| 5              | 6,2            | 10,1             | 1184,4       | 0.300                    | 0.021                      | 846            | 1027,22        | 10,41   |
| 6              | 6,3            | 10,0             | 1196,9       | 0.712                    | 0.670                      | 814            | 988,05         | 9,98  |
| 7              | 6,2            | 10,2             | 1175,8       | 0.998                    | 0.624                      | 810            | 983,16         | 9,90  |
| 8              | 6,1            | 10,1             | 1165,9       | 0.960                    | 0.840                      | 793            | 962,35         | 9,94  |
| 9              | 6,2            | 10,2             | 1182,7       | 0.325                    | 0.070                      | 863            | 1048,03        | 10,61   |
| 10             | 6,2            | 10,2             | 1167,7       | 0.774                    | 0.225                      | 824            | 1000,29        | 10,13   |
| 11             | 6,2            | 10,2             | 1166,9       | 0.368                    | 0.087                      | 851            | 1033,34        | 10,48   |
| 12             | 6,2            | 10,1             | 1184,4       | 1.160                    | 0.980                      | 798            | 968,47         | 9,81  |
| 13             | 6,3            | 10,2             | 1179,5       | 1.116                    | 0.934                      | 800            | 970,92         | 9,66  |
| 14             | 6,2            | 10,2             | 1184,6       | 0.469                    | 0.216                      | 850            | 1032,12        | 10,41   |
| 15             | 6,2            | 10,2             | 1172,6       | 0.858                    | 0.743                      | 797            | 967,25         | 9,85  |
| 16             | 6,1            | 10,2             | 1167,5       | 0.878                    | 0.881                      | 785            | 952,56         | 9,79  |
| 17             | 6,1            | 10,2             | 1178,7       | 0.483                    | 0.349                      | 830            | 1007,64        | 10,31   |

Fuente: Elaboración propia

A través de estos resultados también se procede a realizar los presentes gráficos, a efecto de lograr una mejor visualización de variables del ensayo tales como la carga, deformación vertical y horizontal y tracción indirecta utilizada como principal parámetro para el

análisis de la resistencia de los dos tipos de mezclas asfálticas utilizadas en esta investigación.

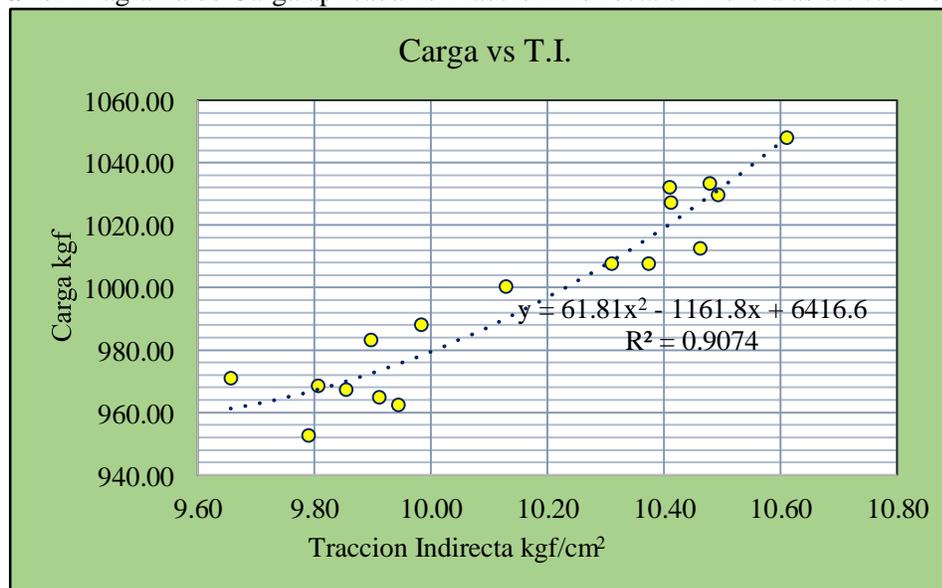
**Figura 4.1** Gráfica de la Resistencia a Tracción Indirecta en las diferentes briquetas



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar las resistencias a tracción indirecta obtenidas en cada una de las briquetas ensayadas, donde se nota una dispersión entre resultados oscilando entre 9 a 10 kgf/cm<sup>2</sup>. El valor máximo de R.T.I. se presenta en la briqueleta 9, con una resistencia de 10,61kgf/cm<sup>2</sup>; resistencias entre 10 a 10.5 kgf/cm<sup>2</sup> se presentaron en las briquetas 1, 2, 3, 5, 10, 11, 14, 17, y las resistencias entre 9 a 10 kgf/cm<sup>2</sup> se dieron en las briquetas 4, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16. Estas variaciones se deben a diversos factores, como fracciones de material para cada briqueleta, compactación, proceso de mezclado, entre otros.

**Figura 4.2** Diagrama de Carga aplicada vs Tracción Indirecta en mezcla asfáltica en caliente

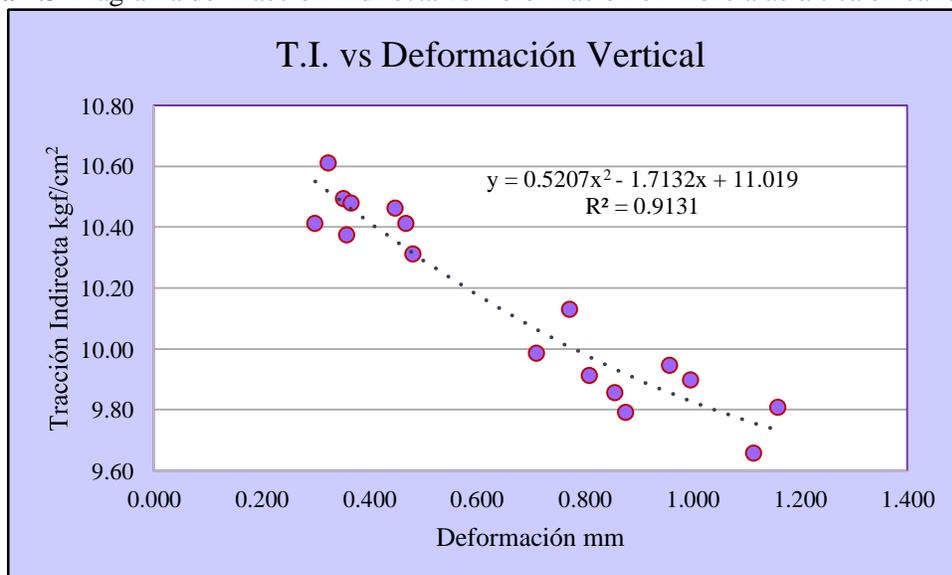


Fuente: Elaboración propia

La variación de la resistencia a tracción indirecta respecto a la carga aplicada nos da a conocer que, para mezclas asfálticas convencionales elaboradas en caliente, las resistencias máximas a tracción indirecta alcanzadas antes de la rotura, varían en un rango de 9,66 kgf/cm<sup>2</sup> y 10,61 kgf/cm<sup>2</sup>.

En esta grafica también se puede observar la relación entre la R.T.I. y la carga aplicada, existe un coeficiente de correlación con un valor de  $R^2 = 0,907$  el cual representa una correlación buena. Asimismo existe una dispersión relativamente mayor a la línea de tendencia, en la parte inferior de la misma.

**Figura 4.3** Diagrama de Tracción Indirecta vs Deformación en mezcla asfáltica en caliente

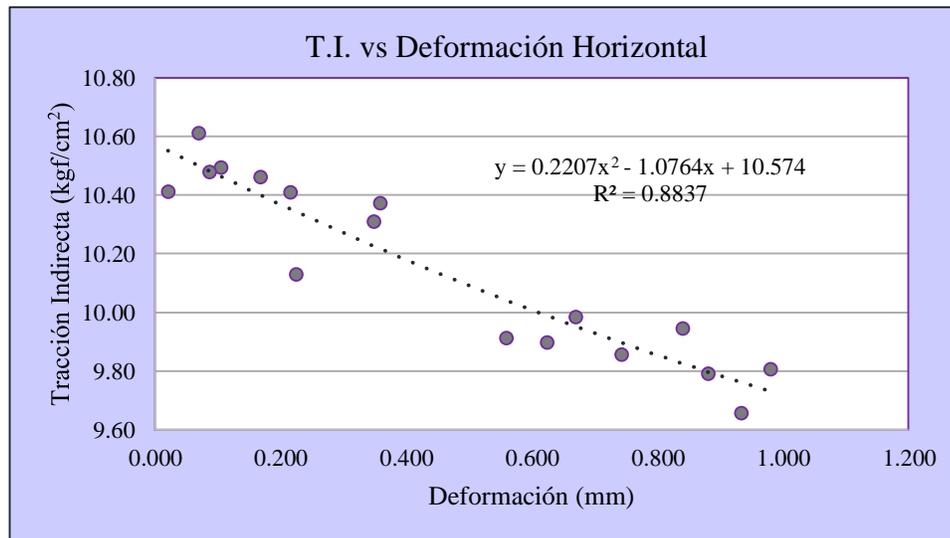


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa los puntos se encuentran cercanos a la línea de tendencia en su parte superior y un poco más dispersos en su parte inferior; de esta grafica se tiene un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,91$ .

También se observa que las altas resistencias se obtuvieron con deformaciones pequeñas, mientras que deformaciones mayores a 1mm se obtuvieron resistencias menores.

**Figura 4.4** Diagrama de Tracción Indirecta vs Deformación horizontal en mezcla asfáltica en caliente



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas 4.3 y 4.4 de las diferentes deformaciones alcanzadas respecto a la resistencia de tracción indirecta, indican las deformaciones máximas en las que se producen la rotura de las briquetas, las cuales se dan entre 0,3 mm y 1,16 mm (def. vertical)

**Tabla 4.2** valores de carga y tracción indirecta de cada espécimen

| N° Briqueta | Carga   | Tracción Indirecta |
|-------------|---------|--------------------|
| 1           | 1012.53 | 10.46              |
| 2           | 1007.64 | 10.37              |
| 3           | 1029.67 | 10.49              |
| 4           | 964.80  | 9.91               |
| 5           | 1027.22 | 10.41              |
| 6           | 988.05  | 9.98               |
| 7           | 983.16  | 9.90               |
| 8           | 962.35  | 9.94               |
| 9           | 1048.03 | 10.61              |
| 10          | 1000.29 | 10.13              |
| 11          | 1033.34 | 10.48              |
| 12          | 968.47  | 9.81               |
| 13          | 970.92  | 9.66               |
| 14          | 1032.12 | 10.41              |
| 15          | 967.25  | 9.85               |
| 16          | 952.56  | 9.79               |
| 17          | 1007.64 | 10.31              |

Fuente: Elaboración propia

De la tabla se observa las resistencias máximas alcanzadas para una carga aplicada, por cada espécimen, antes de la falla donde se tiene un resultado mínimo de resistencia de 9,66 kgf/cm<sup>2</sup> para una carga aplicada de 970,92 kgf, y una resistencia máxima de 10,61 kgf/cm<sup>2</sup> para una carga de 1048,03 kgf.

**Cálculo de la media, desviación estándar de los resultados de ensayo de tracción indirecta en mezcla elaborado en caliente Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$\bar{X} = 10,14$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum (Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,31$$

**Nivel de confianza**

Para valor máximo

$$Z = \frac{Xmax - \bar{X}}{Sx}$$

$$Z = \frac{10,61 - 10,14}{0,31} = 1,53$$

De la tabla de distribución normal se obtiene  $F_1 = 0,9370$

Para valor mínimo

$$Z = \frac{Xmin - \bar{X}}{Sx}$$

$$Z = \frac{9,66 - 10,14}{0,31} = -1,56$$

De la tabla de valores de “z” de distribución normal se obtiene  $F_2 = 0,0594$

Entonces  $NC = F_1 - F_2$

$$NC = 0,9370 - 0,0594 = 0,8776 * 100 = 87,76\%$$

**Cálculo del límite superior e inferior:**

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| Valor aceptado | $X = \bar{X} \pm E$ |
| Error probable | $E = Z * Sx$        |

Se obtiene Z con  $NC = 0,8776$

$$0,8776 + 0,055 = 0,9326$$

De la tabla de distribución normal se obtiene  $Z = 1,49$

$$E = 1,49 * 0,31 = 0,459$$

Entonces se tendrá  $X = 10,14 \pm 0,459 \rightarrow$  Valor aceptado

| Resistencia a Tracción indirecta | Media | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo | Error probable | Valor aceptado     |
|----------------------------------|-------|---------|---------------------|----------|--------|--------|----------------|--------------------|
| Kgf/cm <sup>2</sup>              | 10,14 | 10,13   | 0,31                | 0,089    | 9,66   | 10,61  | 0,459          | <b>10,14±0,459</b> |

De los resultados que se obtuvieron realizando el proceso estadístico para los valores de resistencias a tracción indirecta en mezcla elaborada en caliente, se pudo obtener un nivel de confianza de 87,76 %, la misma que se obtuvo siguiendo un proceso probabilístico mediante el método de distribución normal. Según se especifica en la estadística un valor mayor a 80% se considera que los valores que se obtuvieron tienen un nivel de confianza adecuado.

Por lo que el N.C. de 87,76 % es mayor a 80%, dando a conocer que los resultados de resistencia obtenidos son válidos.

De la misma forma se obtuvo una media de los valores de resistencia a tracción indirecta con un valor de 10,14 kgf/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 0,31; también se determinó

los límites superior e inferior siendo este de  $\pm 0,459$ . Por tanto, el valor aceptado de la resistencia a tracción indirecta será  $(10,14 \pm 0,459) \text{ kgf/cm}^2$ .

Se observa también los valores máximos y mínimos que se registraron al realizar el ensayo; el máximo valor se dio en la briqueta n° 9 con una R.T.I de  $10,61 \text{ kgf/cm}^2$ , para una carga aplicada de  $1048,03 \text{ kgf}$  y el mínimo se dio en la briqueta n° 13 cuyo valor fue de  $9,66 \text{ kgf/cm}^2$  para una carga aplicada de  $952,56 \text{ kgf}$ .

#### **4.1.2. Tracción indirecta en mezcla elaborada en frío Tensión de rotura**

##### Cálculo de la resistencia a la rotura por tracción indirecta

Para briqueta N° 1, cuyos datos son las siguientes:

Altura = 6,5 cm

Diámetro = 10,1 cm

Peso = 1163,2 gr

Carga máxima aplicada = 494,78 kgf

$$S_t = \frac{2 * P_{max}}{\pi * t * d}$$

$$S_t = \frac{2 * 494,78 \text{ kgf}}{\pi * 6,5 \text{ cm} * 10,1 \text{ cm}}$$

$$S_t = 4,80 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

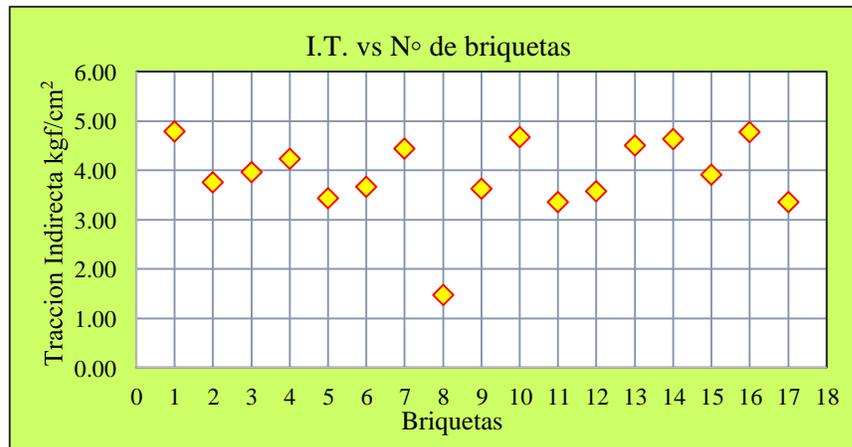
Siguiendo este procedimiento se calculó las resistencias a la rotura por tracción indirecta para cada una de las briquetas.

**Tabla 4.3** Resultados del ensayo a tracción indirecta en mezcla en frío

| N°<br>briqueta | Altura<br>(cm) | Diámetro<br>(cm) | Peso<br>(gr) | Deformaciones (mm)       |                            | Carga aplicada |                | Tracción<br>indirecta<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|----------------|------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------|---|
|                |                |                  |              | Vertical<br>(lect. dial) | Horizontal<br>(lect. dial) | Dial           | Carga<br>(kgf) |   |
| 1              | 6,5            | 10,1             | 1163,2       | 0.020                    | 0.025                      | 411            | 494.78         | 4.80  |
| 2              | 6,3            | 10,2             | 1124,3       | 0.303                    | 0.472                      | 315            | 377.28         | 3.76  |
| 3              | 6,4            | 10,2             | 1142,7       | 0.332                    | 0.320                      | 338            | 405.43         | 3.97  |
| 4              | 6,7            | 10,2             | 1170,3       | 0.320                    | 0.243                      | 377            | 453.17         | 4.23  |
| 5              | 6,6            | 10,2             | 1161,4       | 0.445                    | 0.489                      | 302            | 361.37         | 3.43  |
| 6              | 6,6            | 10,1             | 1149,3       | 0.460                    | 0.423                      | 321            | 384.62         | 3.66  |
| 7              | 6,5            | 10,2             | 1163,9       | 0.160                    | 0.317                      | 383            | 460.51         | 4.44  |
| 8              | 6,7            | 10,2             | 1161,0       | 1.103                    | 0.148                      | 135            | 156.96         | 1.47  |
| 9              | 6,6            | 10,2             | 1155,8       | 0.320                    | 0.339                      | 319            | 382.17         | 3.63  |
| 10             | 6,6            | 10,2             | 1166,4       | 0.131                    | 0.142                      | 410            | 493.56         | 4.68  |
| 11             | 6,6            | 10,2             | 1166,6       | 0.648                    | 0.663                      | 297            | 355.25         | 3.36  |
| 12             | 6,6            | 10,2             | 1166,5       | 0.560                    | 0.420                      | 315            | 377.28         | 3.58  |
| 13             | 6,6            | 10,2             | 1149,0       | 0.172                    | 0.170                      | 395            | 475.20         | 4.51  |
| 14             | 6,6            | 10,2             | 1163,4       | 0.117                    | 0.132                      | 146            | 490.67         | 4.64  |
| 15             | 6,5            | 10,2             | 1161,0       | 0.371                    | 0.350                      | 119            | 408.17         | 3.92  |
| 16             | 6,5            | 10,2             | 1152,1       | 0.105                    | 0.045                      | 148            | 496.79         | 4.78  |
| 17             | 6,6            | 10,1             | 1161,5       | 0.498                    | 0.647                      | 101            | 353.16         | 3.36  |

Fuente: Elaboración propia

A través de estos resultados también se procede a realizar los presentes gráficos para una mejor apreciación de los resultados.

**Figura 4.5** Gráfica de la Resistencia a Tracción Indirecta en las diferentes briquetas

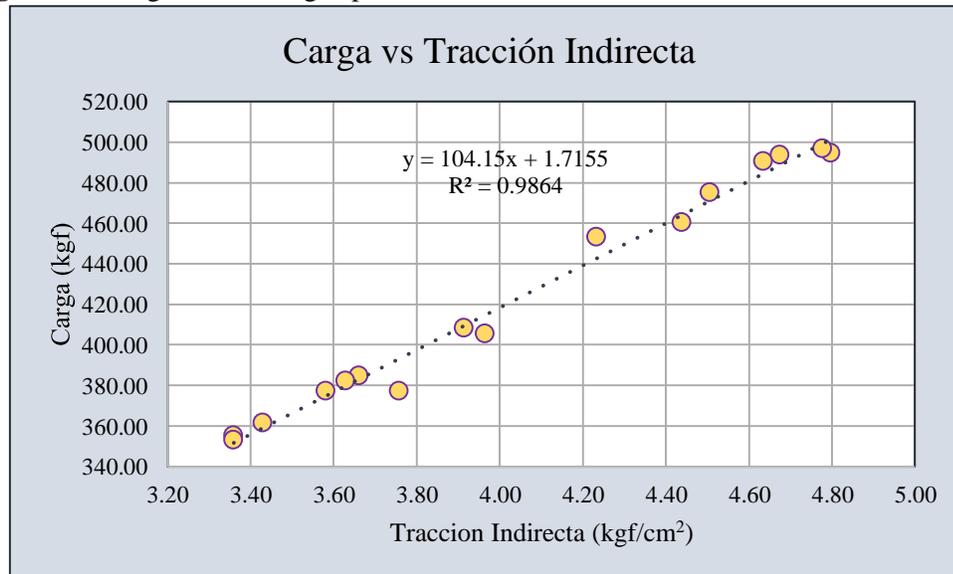
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.5 se muestra el comportamiento de la resistencia en cada una de las briquetas ensayadas, en el cual, como se muestra en la gráfica, la dispersión de los valores

no es muy amplio los cuales oscilan entre 3 a 5kgf/cm<sup>2</sup>, con excepción de la briqueta 8 que tiene un valor muy bajo el cual es notorio en la gráfica, esto se pudo deber a varios factores, los cuales podrían darse durante la compactación, o la preparación de la mezcla, por tanto, este valor será omitido para el posterior análisis estadístico.

Las resistencias bajas entre 3 a 4 kgf/cm<sup>2</sup> se presentaron en las briquetas 2, 3, 5, 6, 9, 11, 12, 15 y 17, mientras que resistencias mayores a 4 kgf/cm<sup>2</sup> se presentaron en las briquetas 1, 4, 7, 10, 13, 14. La mayor resistencia fue de 4,80 kgf/cm<sup>2</sup> que se dio en la briqueta 1.

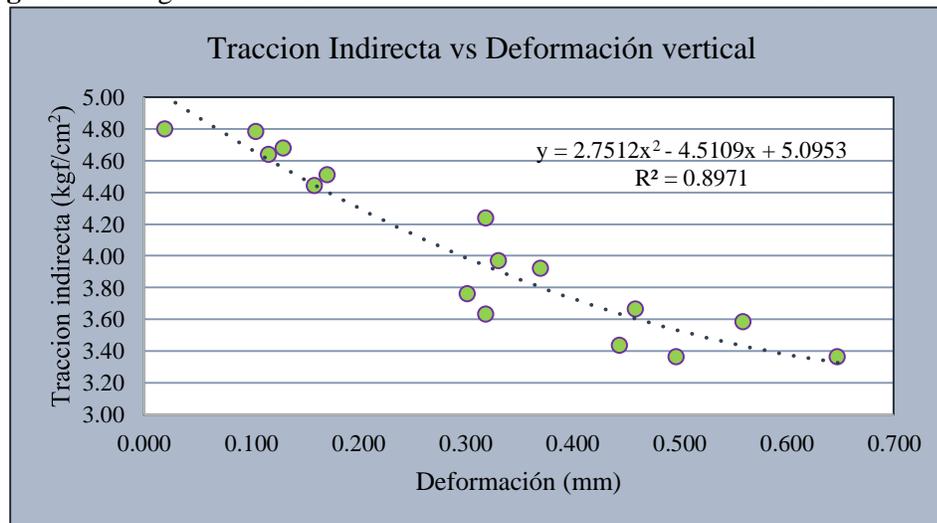
**Figura 4.6** Diagrama de Carga aplicada vs Tracción Indirecta en mezcla asfáltica en frío



Fuente: Elaboración propia

El diagrama de tracción indirecta con respecto a la carga aplicada se realizó sin el dato observado anteriormente. En el cual se puede observar que los puntos generados de la relación entre la carga y tracción indirecta se encuentran muy cercanos a la línea de tendencia consiguiendo un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,986$  que representa una buena correlación.

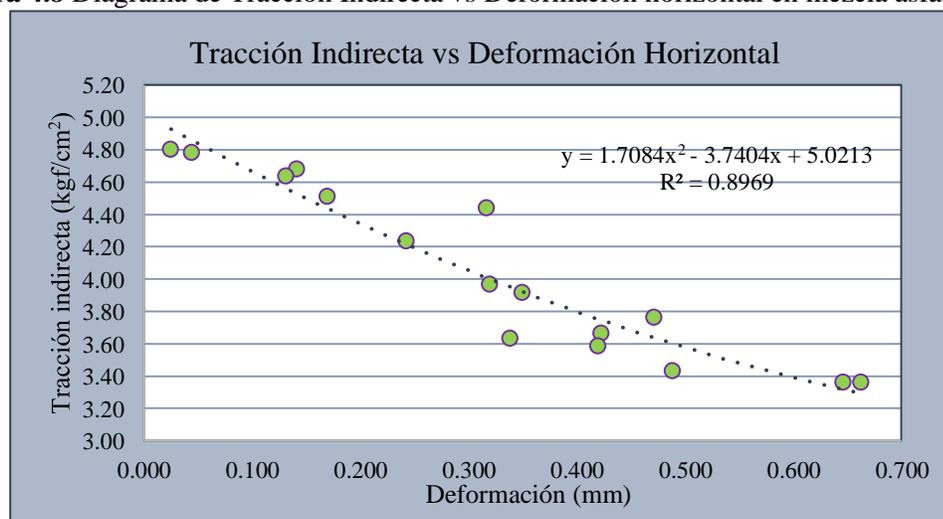
En la misma se aprecia las resistencias máximas alcanzadas en cada una de las briquetas ensayadas, estas resistencias se encuentran en un rango de 3,36 kgf/cm<sup>2</sup> y 4,80 kgf/cm<sup>2</sup>.

**Figura 4.7** Diagrama de Tracción Indirecta vs Deformación en mezcla asfáltica en frío

Fuente: Elaboración propia

Del diagrama se muestra que los puntos generados de la relación de tracción indirecta con las deformaciones, se encuentran cercanos a la línea de tendencia en resistencia por encima de 4.40 kgf/cm<sup>2</sup> mientras que por debajo de la misma los puntos se encuentran relativamente dispersos a la línea de tendencia.

De esta gráfica se observa que deformaciones menores a 0,2mm obtuvieron resistencias mayores a 4.4 kgf/cm<sup>2</sup>, mientras que para deformaciones mayores a 0,3mm las resistencias estuvieron entre 3,2 a 4,0 kgf/cm<sup>2</sup>.

**Figura 4.8** Diagrama de Tracción Indirecta vs Deformación horizontal en mezcla asfáltica fría

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas 4.7 y 4.8 de deformación con relación a la resistencia a tracción indirecta, nos indican las deformaciones máximas en las cuales se produce la falla de los especímenes estando las mismas en un rango de 0,020 mm y 0,648 mm (def. vertical).

**Tabla 4.4** Valores de carga y tracción indirecta de cada espécimen

| N° Briqueta | Carga  | Tracción Indirecta |
|-------------|--------|--------------------|
| 1           | 494.78 | 4.80               |
| 2           | 377.28 | 3.76               |
| 3           | 405.43 | 3.97               |
| 4           | 453.17 | 4.23               |
| 5           | 361.37 | 3.43               |
| 6           | 384.62 | 3.66               |
| 7           | 460.51 | 4.44               |
| 8           | 382.17 | 3.63               |
| 9           | 493.56 | 4.68               |
| 10          | 355.25 | 3.36               |
| 11          | 377.28 | 3.58               |
| 12          | 475.20 | 4.51               |
| 13          | 490.67 | 4.64               |
| 14          | 408.17 | 3.92               |
| 15          | 496.79 | 4.78               |
| 16          | 353.16 | 3.36               |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla de valores de carga y resistencia a tracción indirecta se aprecia los valores mínimos y máximos de resistencia a T.I. siendo estos de 3,36 kgf/cm<sup>2</sup> para una carga aplicada de 353,16 kgf (valor mínimo) y 4,80 kgf/cm<sup>2</sup> para una carga de 494,78 kgf (valor máximo).

**Cálculo de la media, desviación estándar de los resultados de ensayo de tracción indirecta en mezcla elaborado en frío.**

**Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$X = 4,01$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,53$$

**Nivel de confianza**

Para valor máximo

$$Z = \frac{Xmax - \bar{X}}{Sx}$$

$$Z = \frac{4,80 - 4,01}{0,53} = 1,48$$

De la tabla de distribución normal se obtiene  $F_1 = 0,9306$

Para valor mínimo

$$Z = \frac{Xmin - \bar{X}}{Sx}$$

$$Z = \frac{3,36 - 4,01}{0,53} = -1,23$$

De la tabla de valores de “z” de distribución normal se obtiene  $F_2 = 0,1093$

Entonces

$$NC = F_1 - F_2$$

$$NC = 0,9306 - 0,1093 = 0,8213 * 100 = 82,13\%$$

**Cálculo del límite superior e inferior:**

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| Valor aceptado | $X = \bar{X} \pm E$ |
| Error probable | $E = Z * Sx$        |

Se obtiene Z con  $NC = 0,8213$

$$0,8213 + 0,055 = 0,8763$$

De la tabla de distribución normal se obtiene  $Z = 1,156$

$$E = 1,156 * 0,53 = 0,614$$

Entonces se tendrá  $X = 4,01 \pm 0,614$   valor aceptado

| Resistencia a Tracción indirecta | Media | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo | Error probable | Valor aceptado    |
|----------------------------------|-------|---------|---------------------|----------|--------|--------|----------------|-------------------|
| Kgf/cm <sup>2</sup>              | 4,01  | 3,94    | 0,53                | 0,26     | 3,36   | 4,80   | 0,614          | <b>4,04±0,614</b> |

De los resultados obtenidos con el proceso estadístico, se puede observar que el nivel de confianza para la resistencia a tracción indirecta, para la mezcla elaborada en frío, fue de un 82,13%, esto a través de probabilidades utilizando el método de distribución normal. De igual forma se determinó los límites superior e inferior el cual es de  $\pm 0,614$ .

El valor medio de la resistencia a tracción indirecta es de 4,01 kgf/cm<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 0,53; siguiendo la fórmula de valor de aceptación el valor aceptado de R.T.I. para mezcla en frío es de  $(4,01 \pm 0,614)$  kgf/cm<sup>2</sup>.

Para el nivel de confianza obtenido, según especifica la estadística un valor mayor a 80% se considera que los valores obtenidos tienen un nivel de confianza válidos, por lo que el valor obtenido de 82,13% de N.C. nos indica que los resultados de R.T.I. son válidos.

También se pudo observar que se dieron valores máximos y mínimos de resistencia a tracción indirecta, los cuales se dieron en la 'briqueta 1' con un valor de 4,80 kgf/cm<sup>2</sup> para una carga de 494,78 kgf siendo el valor máximo y el mínimo se dio en las briquetas 10 y 16 con un valor de 3,36 kgf/cm<sup>2</sup>, en ambos casos, para un valor de carga de 355,25kgf y 353,16 kgf respectivamente.

#### 4.2. Distribución teórica de tensiones

La distribución de tensiones dentro de una probeta cilíndrica está basada en el análisis de un material de comportamiento elástico y lineal.

Cuando la probeta es sometida a compresión diametral desarrolla un estado de tensiones bidimensionales en su interior. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices opuestas describe planos de tensiones, uno horizontal y otro vertical.

#### 4.2.1. Distribución de tensiones sobre el plano vertical

La determinación de la distribución teórica de tensiones en el plano vertical para cada briqueta, se calculará mediante las siguientes ecuaciones matemáticas. **Ecuación 4.1**

Tensión horizontal

$$\sigma_x = \frac{2 * p}{\pi * t * d}$$

#### Ecuación 4.2

Tensión vertical

$$\sigma_y = -\frac{2 * p}{\pi * t} * \left[ \frac{2}{d - 2 * y} + \frac{2}{d + 2 * y} - \frac{1}{d} \right]$$

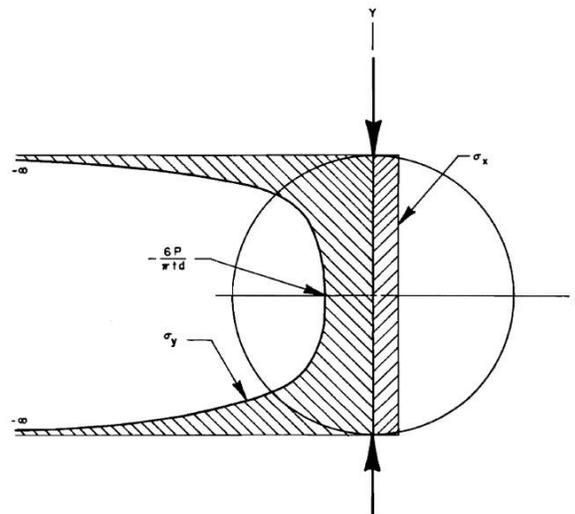
Donde: P = Carga máxima en N

t = Altura de la briqueta mm                      d = Diámetro

de la briqueta mm                      x, y = Coordenadas respecto al

centro de la briqueta

**Figura 4.9** Distribución teórica de tensiones en el plano vertical



Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo o tensión horizontal  $\sigma_x$  a lo largo del diámetro vertical es un esfuerzo de tensión constante de magnitud “ $2P/\pi t d$ ” cuando el esfuerzo vertical  $\sigma_y$  es compresión y tiene variación mínima de “ $-6P/\pi t d$ ” al centro de la circunferencia y un máximo infinito en la circunferencia debajo de la carga.

#### 4.2.1.1. Mezcla asfáltica elaborada en caliente

**Tabla 4.5** Distribución de tensiones en el diámetro vertical (mezcla en caliente)

| N de<br>briqueta | Carga Total<br>Aplicada | Altura de la<br>Probeta | Diámetro de<br>la Probeta | Coordenada<br>respecto a<br>centro de la<br>Probeta |   | Deformación | $\sigma_X$        | $\sigma_Y$        |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---|---|-------------|-------------------|-------------------|
|                  | N                       | mm                      | mm                        | x   | y | mm          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| 1                | 9932.95                 | 61.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.450       | 1.03              | -3.079            |
| 2                | 9884.92                 | 61.23                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.360       | 1.02              | -3.053            |
| 3                | 10101.06                | 61.85                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.354       | 1.03              | -3.088            |
| 4                | 9464.66                 | 61.05                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.810       | 0.97              | -2.917            |
| 5                | 10077.04                | 62.00                   | 101.30                    | 0   | 0 | 0.300       | 1.02              | -3.064            |
| 6                | 9692.81                 | 63.00                   | 100.00                    | 0   | 0 | 0.712       | 0.98              | -2.938            |
| 7                | 9644.78                 | 62.00                   | 102.00                    | 0   | 0 | 0.998       | 0.97              | -2.913            |
| 8                | 9440.65                 | 61.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.960       | 0.98              | -2.927            |
| 9                | 10281.17                | 61.95                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.325       | 1.04              | -3.123            |
| 10               | 9812.88                 | 61.85                   | 101.65                    | 0   | 0 | 0.774       | 0.99              | -2.981            |
| 11               | 10137.08                | 61.85                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.368       | 1.03              | -3.084            |
| 12               | 9500.69                 | 62.00                   | 101.40                    | 0   | 0 | 1.160       | 0.96              | -2.886            |
| 13               | 9524.70                 | 63.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 1.116       | 0.95              | -2.842            |
| 14               | 10125.07                | 62.00                   | 101.80                    | 0   | 0 | 0.469       | 1.02              | -3.064            |
| 15               | 9488.68                 | 61.50                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.858       | 0.97              | -2.900            |
| 16               | 9344.59                 | 61.03                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.878       | 0.96              | -2.881            |
| 17               | 9884.92                 | 61.18                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.483       | 1.01              | -3.034            |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se observa los resultados de los distintos resultados de esfuerzos que presentan las briquetas en el plano diametral vertical. La demostración de esta distribución de tensiones, se realizara en la briqueta n° 1

#### Para briqueta N° 1

Carga max. = 9932,95 N

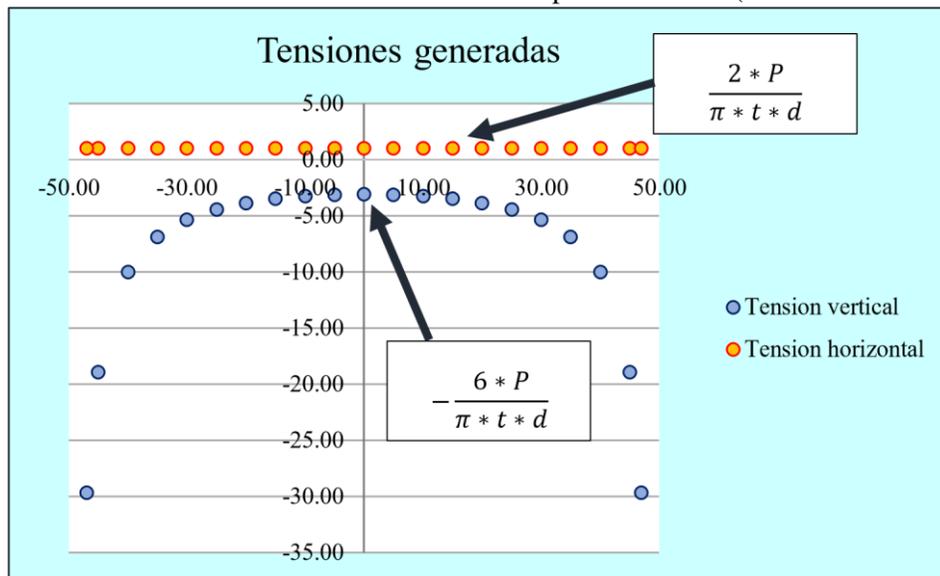
Altura briqueta = 61,00 mm

Diámetro = 101,00 mm

En la tabla siguiente x, y será la variación de las coordenadas con respecto al centro de la briqueta, del cual se realizará una gráfica con esos valores para una apreciación mejor de los esfuerzos existentes en la briqueta.

| x   | y   | $\sigma_x$ | $\sigma_y$ |
|-----|-----|------------|------------|
| 0   | 0   | 1.03       | -3.08      |
| 5   | 5   | 1.03       | -3.12      |
| 10  | 10  | 1.03       | -3.25      |
| 15  | 15  | 1.03       | -3.48      |
| 20  | 20  | 1.03       | -3.84      |
| 25  | 25  | 1.03       | -4.41      |
| 30  | 30  | 1.03       | -5.32      |
| 35  | 35  | 1.03       | -6.87      |
| 40  | 40  | 1.03       | -9.99      |
| 45  | 45  | 1.03       | -18.91     |
| 47  | 47  | 1.03       | -29.66     |
| -5  | -5  | 1.03       | -3.12      |
| -10 | -10 | 1.03       | -3.25      |
| -15 | -15 | 1.03       | -3.48      |
| -20 | -20 | 1.03       | -3.84      |
| -25 | -25 | 1.03       | -4.41      |
| -30 | -30 | 1.03       | -5.32      |
| -35 | -35 | 1.03       | -6.87      |
| -40 | -40 | 1.03       | -9.99      |
| -45 | -45 | 1.03       | -18.91     |
| -47 | -47 | 1.03       | -29.66     |

**Figura 4.10** Distribución teórica de tensiones en el plano vertical (mezcla en caliente)



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar la distribución teórica de las tensiones generadas en la estructura interna del espécimen en su plano vertical; para obtener los valores de las tensiones se hizo variar la distancia del diámetro con respecto al eje central, de ahí se observa que la tensión o esfuerzo horizontal permanece constante a lo largo del diámetro central de la briqueta, con un valor de  $1,03 \text{ N/mm}^2$ , mientras que la tensión vertical describe una parábola en la cual la tensión mínima se produce en el centro de la circunferencia (cuando el valor de  $x,y$  es igual a cero) con un valor de  $-3,08 \text{ N/mm}^2$ .

**Para deformación vertical (mezcla en caliente) Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$X = 0,605 \text{ mm}$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{(\sum Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,297$$

**Varianza**

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

$$S = 0,083$$

|  | Media  | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo |
|--|--------|---------|---------------------|----------|--------|--------|
| <b>Deformación (mm)</b>                      | 0,605  | 0,712   | 0,297               | 0,083    | 0,300  | 1,160  |
| <b>Tensión vertical (N/mm<sup>2</sup>)</b>   | -2,990 | -2,981  | 0,091               | 0,008    | -2,842 | -3,123 |
| <b>Tensión horizontal (N/mm<sup>2</sup>)</b> | 0,995  | 0,994   | 0,030               | 0,001    | 0,947  | 1,041  |

#### 4.2.1.2. Mezcla asfáltica elaborada en frío.

**Tabla 4.6** Distribución de tensiones en el diámetro vertical (mezcla en frío)

| N de<br>briqueta | Carga Total<br>Aplicada | Altura de la<br>Probeta | Diámetro de<br>la Probeta | Coordenada<br>respecto a<br>centro de la<br>Probeta |   | lectura del<br>dial | $\sigma_X$        | $\sigma_Y$        |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---|---|---------------------|-------------------|-------------------|
|                  | N                       | mm                      | mm                        | x   | y | mm                  | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| 1                | 4853.81                 | 65.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.020               | 0.47              | -1.413            |
| 2                | 3701.09                 | 62.95                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.303               | 0.37              | -1.107            |
| 3                | 3977.26                 | 64.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.332               | 0.39              | -1.168            |
| 4                | 4445.55                 | 67.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.320               | 0.42              | -1.247            |
| 5                | 3545.00                 | 66.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.445               | 0.34              | -1.010            |
| 6                | 3773.14                 | 66.00                   | 101.30                    | 0   | 0 | 0.460               | 0.36              | -1.078            |
| 7                | 4517.60                 | 65.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.160               | 0.44              | -1.307            |
| 8                | 3749.12                 | 66.00                   | 101.55                    | 0   | 0 | 0.320               | 0.36              | -1.069            |
| 9                | 4841.80                 | 66.00                   | 101.80                    | 0   | 0 | 0.131               | 0.46              | -1.377            |
| 10               | 3484.96                 | 66.00                   | 102.00                    | 0   | 0 | 0.648               | 0.33              | -0.989            |
| 11               | 3701.09                 | 66.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.560               | 0.35              | -1.055            |
| 12               | 4661.69                 | 66.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.172               | 0.44              | -1.327            |
| 13               | 4813.52                 | 66.25                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.117               | 0.45              | -1.365            |
| 14               | 4004.10                 | 65.25                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.371               | 0.38              | -1.153            |
| 15               | 4873.47                 | 65.08                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.105               | 0.47              | -1.407            |
| 16               | 3464.49                 | 66.08                   | 101.25                    | 0   | 0 | 0.498               | 0.33              | -0.990            |

Fuente: Elaboración propia

De igual forma que para la mezcla en caliente, para demostrar la distribución teórica de tensiones en el plano vertical de los especímenes elaborados en frío, se determinará para la briqueta n°1.

##### Briqueta N° 1

Carga max. = 4853,81 N

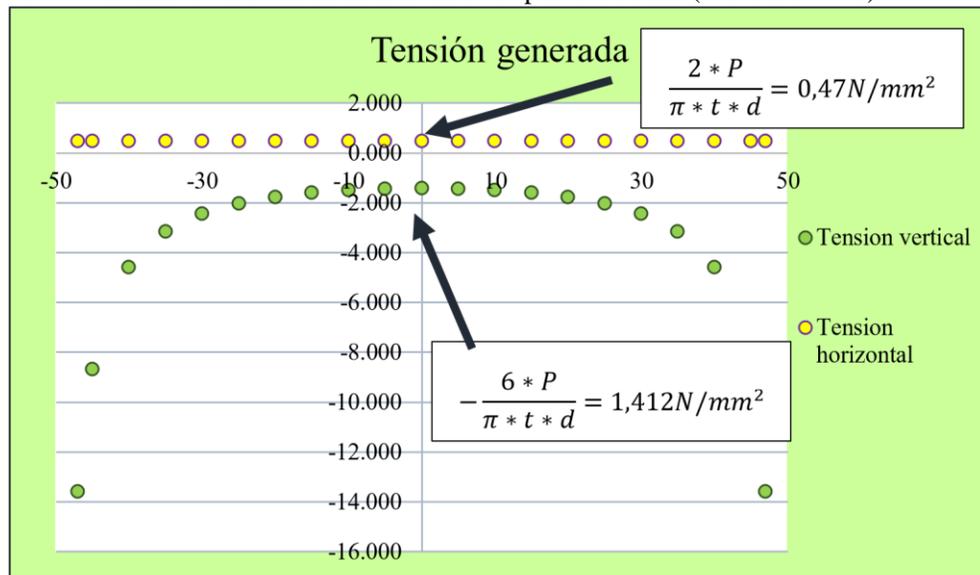
Altura briqueta = 65,00 mm

Diámetro = 101,00 mm

En la tabla siguiente x, y será la variación de las coordenadas con respecto al centro de la briqueta, del cual se realizará una gráfica con esos valores para una apreciación mejor de los esfuerzos existentes en la briqueta.

| x   | y   | $\sigma_x$ | $\sigma_y$ |
|-----|-----|------------|------------|
| 0   | 0   | 0.47       | -1.412     |
| 5   | 5   | 0.47       | -1.431     |
| 10  | 10  | 0.47       | -1.489     |
| 15  | 15  | 0.47       | -1.594     |
| 20  | 20  | 0.47       | -1.762     |
| 25  | 25  | 0.47       | -2.023     |
| 30  | 30  | 0.47       | -2.439     |
| 35  | 35  | 0.47       | -3.152     |
| 40  | 40  | 0.47       | -4.582     |
| 45  | 45  | 0.47       | -8.671     |
| 47  | 47  | 0.47       | -13.599    |
| -5  | -5  | 0.47       | -1.431     |
| -10 | -10 | 0.47       | -1.489     |
| -15 | -15 | 0.47       | -1.594     |
| -20 | -20 | 0.47       | -1.762     |
| -25 | -25 | 0.47       | -2.023     |
| -30 | -30 | 0.47       | -2.439     |
| -35 | -35 | 0.47       | -3.152     |
| -40 | -40 | 0.47       | -4.582     |
| -45 | -45 | 0.47       | -8.671     |
| -47 | -47 | 0.47       | -13.599    |

Figura 4.11 Distribución teórica de tensiones en el plano vertical (mezcla en frío)



Fuente: Elaboración propia

**Para deformación vertical (mezcla en frío) Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$X = 0,240 \text{ mm}$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,320$$

**Varianza**

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

$$S = 0,031$$

|  | Media  | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo |
|--|--------|---------|---------------------|----------|--------|--------|
| <b>Deformación (mm)</b>                      | 0,240  | 0,320   | 0,182               | 0,031    | 0,020  | 0,648  |
| <b>Tensión vertical (N/mm<sup>2</sup>)</b>   | -1,190 | -1,160  | 0,156               | 0,023    | -0,989 | -1,413 |
| <b>Tensión horizontal (N/mm<sup>2</sup>)</b> | 0,394  | 0,387   | 0,052               | 0,003    | 0,330  | 0,47   |

#### 4.2.2. Distribución de tensiones sobre el plano horizontal

La determinación de la distribución teórica de tensiones en el plano horizontal para cada briqueta, se lo calculará mediante las siguientes ecuaciones matemáticas.

**Ecuación 4.3**

$$\sigma_x = \frac{2 * p}{\pi * t * d} * \left[ \frac{d^2 - 4 * x^2}{d^2 + 4 * x^2} \right]^2$$

**Ecuación 4.4**

$$\sigma_y = -\frac{2 * p}{\pi * t * d} * \left[ \frac{4 * d^2}{(d^2 + 4 * x^2)} - 1 \right]$$

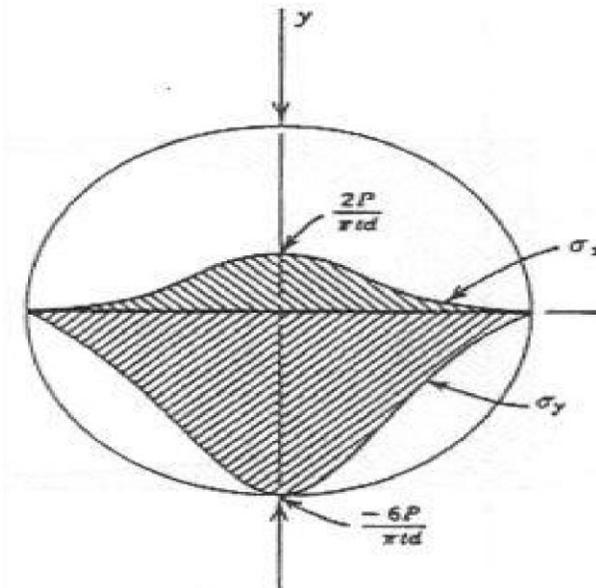
Donde: P = Carga máxima en N

t = Altura de la briqueta mm      d = Diámetro

de la briqueta mm      x, y = Coordenadas respecto al

centro de la briqueta

**Figura 4.12** Distribución teórica de tensiones en el plano horizontal



Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo o tensión vertical  $\sigma_y$  a lo largo del diámetro horizontal es de compresión y tiene variación de magnitud máxima de “ $-6P/\pi t d$ ” hasta cero en el centro de la circunferencia, el esfuerzo horizontal  $\sigma_x$  a lo largo del diámetro horizontal es de tensión y

tiene una variación de magnitud máxima de “ $2P/\pi t d$ ” hasta cero en el centro de la circunferencia.

#### 4.2.2.1. Mezcla asfáltica elaborada en caliente

**Tabla 4.7** Distribución de tensiones en el diámetro horizontal (m.a. en caliente)

| N de<br>briqueta | Carga Total<br>Aplicada | Altura de la<br>Probeta | Diámetro de<br>la Probeta | Coordenada<br>respecto a<br>centro de la<br>Probeta |   | lectura del<br>dial | $\sigma_X$        | $\sigma_Y$        |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---|---|---------------------|-------------------|-------------------|
|                  | N                       | mm                      | mm                        | x   | y | mm                  | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| 1                | 9932.95                 | 61.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.168               | 1.027             | -3.081            |
| 2                | 9884.92                 | 61.23                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.359               | 1.018             | -3.055            |
| 3                | 10101.06                | 61.85                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.105               | 1.030             | -3.090            |
| 4                | 9464.66                 | 61.05                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.560               | 0.973             | -2.919            |
| 5                | 10077.04                | 62.00                   | 101.30                    | 0   | 0 | 0.021               | 1.022             | -3.066            |
| 6                | 9692.81                 | 63.00                   | 100.00                    | 0   | 0 | 0.670               | 0.980             | -2.940            |
| 7                | 9644.78                 | 62.00                   | 102.00                    | 0   | 0 | 0.624               | 0.971             | -2.914            |
| 8                | 9440.65                 | 61.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.840               | 0.976             | -2.928            |
| 9                | 10281.17                | 61.95                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.070               | 1.041             | -3.124            |
| 10               | 9812.88                 | 61.85                   | 101.65                    | 0   | 0 | 0.225               | 0.994             | -2.982            |
| 11               | 10137.08                | 61.85                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.087               | 1.029             | -3.086            |
| 12               | 9500.69                 | 62.00                   | 101.40                    | 0   | 0 | 0.980               | 0.963             | -2.888            |
| 13               | 9524.70                 | 63.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.934               | 0.948             | -2.843            |
| 14               | 10125.07                | 62.00                   | 101.80                    | 0   | 0 | 0.216               | 1.022             | -3.065            |
| 15               | 9488.68                 | 61.50                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.743               | 0.967             | -2.902            |
| 16               | 9344.59                 | 61.03                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.881               | 0.961             | -2.883            |
| 17               | 9884.92                 | 61.18                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.349               | 1.012             | -3.036            |

Fuente: Elaboración propia

#### Para briqueta N° 1

Carga max. = 9932,95 N

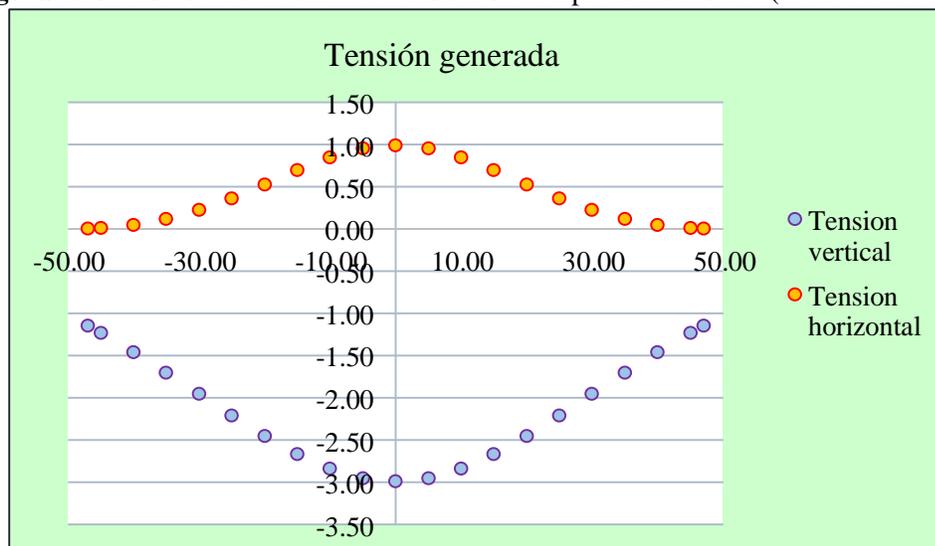
Altura briqueta = 61,00 mm

Diámetro = 101,00 mm

En la tabla siguiente x, y será la variación de las coordenadas con respecto al centro de la briqueta, del cual se realizará una gráfica con esos valores para una apreciación mejor de los esfuerzos existentes en la briqueta.

| x   | y   | $\sigma_x$ | $\sigma_y$ |
|-----|-----|------------|------------|
| 0   | 0   | 1.03       | -3.08      |
| 5   | 5   | 0.96       | -2.95      |
| 10  | 10  | 0.85       | -2.84      |
| 15  | 15  | 0.70       | -2.66      |
| 20  | 20  | 0.53       | -2.45      |
| 25  | 25  | 0.37       | -2.21      |
| 30  | 30  | 0.23       | -1.95      |
| 35  | 35  | 0.12       | -1.70      |
| 40  | 40  | 0.05       | -1.46      |
| 45  | 45  | 0.01       | -1.23      |
| 47  | 47  | 0.01       | -1.14      |
| -5  | -5  | 0.96       | -2.99      |
| -10 | -10 | 0.85       | -2.95      |
| -15 | -15 | 0.70       | -2.84      |
| -20 | -20 | 0.53       | -2.66      |
| -25 | -25 | 0.37       | -2.45      |
| -30 | -30 | 0.23       | -2.21      |
| -35 | -35 | 0.12       | -1.95      |
| -40 | -40 | 0.05       | -1.70      |
| -45 | -45 | 0.01       | -1.46      |
| -47 | -47 | 0.01       | -1.23      |

**Figura 4.13** Distribución teórica de tensiones en el plano horizontal (mezcla en caliente)



Fuente: Elaboración propia

De la figura se observa que la distribución teórica de tensiones en el plano horizontal de las briquetas; tanto la tensión vertical como la horizontal no son constantes, sino que estas varían conforme vayan cambiando las coordenadas  $x, y$  a lo largo del eje diametral, con respecto al centro. Como se puede apreciar la tensión vertical tiene su máximo valor.

cuando el valor de  $x, y$  son cero, dando un valor de  $-3,08 \text{ N/mm}^2$ , mientras que la tensión horizontal presenta un valor máximo de  $1,03 \text{ N/mm}^2$ .

**Para deformación horizontal (mezcla en caliente) Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$X = 0,304 \text{ mm}$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,336$$

**Varianza**

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

$$S = 0,106$$

|  | Media  | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo |
|--|--------|---------|---------------------|----------|--------|--------|
| <b>Deformación (mm)</b>                      | 0,304  | 0,359   | 0,336               | 0,106    | 0,021  | 0,980  |
| <b>Tensión vertical (N/mm<sup>2</sup>)</b>   | -2,990 | -2,982  | 0,091               | 0,008    | -2,843 | -3,124 |
| <b>Tensión horizontal (N/mm<sup>2</sup>)</b> | 0,996  | 0,994   | 0,030               | 0,001    | 0,948  | 1,041  |

#### 4.2.2.2. Mezcla asfáltica elaborada en frío

**Tabla 4.8** Distribución de tensiones en el diámetro horizontal (m.a en frío)

| N de<br>briqueta | Carga Total<br>Aplicada | Altura de la<br>Probeta | Diámetro de<br>la Probeta | Coordenada<br>respecto a<br>centro de la<br>Probeta |   | lectura del<br>dial | $\sigma_X$        | $\sigma_Y$        |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---|---|---------------------|-------------------|-------------------|
|                  | N                       | mm                      | mm                        | x   | y | mm                  | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| 1                | 4853.81                 | 65.00                   | 101.00                    | 0   | 0 | 0.025               | 0.471             | -1.412            |
| 2                | 3701.09                 | 62.95                   | 101.50                    | 0   | 0 | 0.472               | 0.369             | -1.106            |
| 3                | 3977.26                 | 64.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.320               | 0.389             | -1.167            |
| 4                | 4445.55                 | 67.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.243               | 0.416             | -1.246            |
| 5                | 3545.00                 | 66.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.489               | 0.337             | -1.010            |
| 6                | 3773.14                 | 66.00                   | 101.30                    | 0   | 0 | 0.423               | 0.359             | -1.078            |
| 7                | 4517.60                 | 65.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.317               | 0.436             | -1.306            |
| 8                | 3749.12                 | 66.00                   | 101.55                    | 0   | 0 | 0.339               | 0.356             | -1.068            |
| 9                | 4841.80                 | 66.00                   | 101.80                    | 0   | 0 | 0.142               | 0.459             | -1.376            |
| 10               | 3484.96                 | 66.00                   | 102.00                    | 0   | 0 | 0.663               | 0.330             | -0.989            |
| 11               | 3701.09                 | 66.00                   | 101.60                    | 0   | 0 | 0.420               | 0.352             | -1.054            |
| 12               | 4661.69                 | 66.00                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.170               | 0.442             | -1.326            |
| 13               | 4813.52                 | 66.25                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.132               | 0.455             | -1.364            |
| 14               | 4004.10                 | 65.25                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.350               | 0.384             | -1.152            |
| 15               | 4873.47                 | 65.08                   | 101.70                    | 0   | 0 | 0.045               | 0.469             | -1.406            |
| 16               | 3464.49                 | 66.08                   | 101.25                    | 0   | 0 | 0.647               | 0.330             | -0.989            |

Fuente: Elaboración propia

Para briqueta N° 1

Carga max. = 4853,81 N

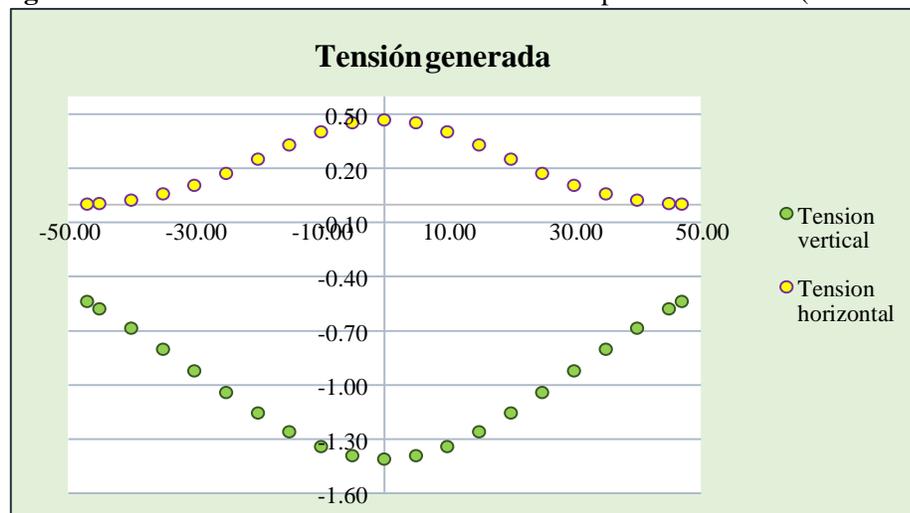
Altura briqueta = 65,00 mm

Diámetro = 101,00 mm

En la tabla siguiente x, y será la variación de las coordenadas con respecto al centro de la briqueta, del cual se realizará una gráfica con esos valores para una apreciación mejor de los esfuerzos existentes en la briqueta.

| x   | y   | $\sigma_x$ | $\sigma_y$ |
|-----|-----|------------|------------|
| 0   | 0   | 0.471      | -1.412     |
| 5   | 5   | 0.453      | -1.394     |
| 10  | 10  | 0.402      | -1.341     |
| 15  | 15  | 0.330      | -1.259     |
| 20  | 20  | 0.250      | -1.157     |
| 25  | 25  | 0.173      | -1.041     |
| 30  | 30  | 0.108      | -0.921     |
| 35  | 35  | 0.058      | -0.801     |
| 40  | 40  | 0.025      | -0.686     |
| 45  | 45  | 0.006      | -0.579     |
| 47  | 47  | 0.002      | -0.538     |
| -5  | -5  | 0.453      | -1.394     |
| -10 | -10 | 0.402      | -1.341     |
| -15 | -15 | 0.330      | -1.259     |
| -20 | -20 | 0.250      | -1.157     |
| -25 | -25 | 0.173      | -1.041     |
| -30 | -30 | 0.108      | -0.921     |
| -35 | -35 | 0.058      | -0.801     |
| -40 | -40 | 0.025      | -0.686     |
| -45 | -45 | 0.006      | -0.579     |
| -47 | -47 | 0.002      | -0.538     |

**Figura 4.14** Distribución teórica de tensiones en el plano horizontal (mezcla en frío)



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura las tensiones teóricas en el plano horizontal para la mezcla en frío presenta su valor máximo cuando las coordenadas respecto al centro son  $x, y$  igual a cero, siendo estas de 0,471 N/mm<sup>2</sup> (tensión horizontal) y -1,412 N/mm<sup>2</sup> (tensión vertical).

**Para deformación horizontal (mezcla en frío) Media:**

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$X = 0,246 \text{ mm}$$

**Desviación estándar:**

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$Sx = 0,202$$

**Varianza**

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

$$S = 0,035$$

|  | Media | Mediana | Desviación estándar | Varianza | Mínimo | Máximo |
|--|-------|---------|---------------------|----------|--------|--------|
| <b>Deformación (mm)</b>                      | 0,246 | 0,330   | 0,193               | 0,035    | 0,025  | 0,663  |
| <b>Tensión vertical (N/mm<sup>2</sup>)</b>   | -1,19 | -1,160  | 0,156               | 0,023    | -0,989 | -1,412 |
| <b>Tensión horizontal (N/mm<sup>2</sup>)</b> | 0,394 | 0,387   | 0,052               | 0,003    | 0,330  | 0,471  |

### 4.3. Resultados comparativos entre mezclas asfálticas

En este punto se realizará la comparación de los resultados obtenidos de los dos tipos de mezclas, en cuanto a la resistencia a tracción, deformación, valores mínimos y máximos, nivel de confianza.

**Tabla 4.9** Carga aplicada y resistencia a Tracción Indirecta

| N°<br>Briqueteta | Mezcla en caliente |                     | Mezcla en frío |                     |
|------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------|
|                  | Carga              | Tracción Indirecta  | Carga          | Tracción Indirecta  |
|                  | kgf                | kgf/cm <sup>2</sup> | kgf            | kgf/cm <sup>2</sup> |
| 1                | 1012.53            | 10.46               | 494.78         | 4.80                |
| 2                | 1007.64            | 10.37               | 377.28         | 3.76                |
| 3                | 1029.67            | 10.49               | 405.43         | 3.97                |
| 4                | 964.80             | 9.91                | 453.17         | 4.23                |
| 5                | 1027.22            | 10.41               | 361.37         | 3.43                |
| 6                | 988.05             | 9.98                | 384.62         | 3.66                |
| 7                | 983.16             | 9.90                | 460.51         | 4.44                |
| 8                | 962.35             | 9.94                | 382.17         | 3.63                |
| 9                | 1048.03            | 10.61               | 493.56         | 4.68                |
| 10               | 1000.29            | 10.13               | 355.25         | 3.36                |
| 11               | 1033.34            | 10.48               | 377.28         | 3.58                |
| 12               | 968.47             | 9.81                | 475.20         | 4.51                |
| 13               | 970.92             | 9.66                | 490.67         | 4.64                |
| 14               | 1032.12            | 10.41               | 408.17         | 3.92                |
| 15               | 967.25             | 9.85                | 496.79         | 4.78                |
| 16               | 952.56             | 9.79                | 353.16         | 3.36                |
| 17               | 1007.64            | 10.31               |                |                     |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra los resultados de carga aplicada y la resistencia a tracción indirecta en cada una de las briquetas ensayadas, tanto en mezcla en caliente y en mezcla en frío.

En esos resultados mostrados se observa una relativa dispersión entre los resultados en ambas mezclas, esto debido a ciertos factores como ser temperatura, el colocado de la mezcla dentro del molde (segregación), compactado, etc. haciendo notar la sensibilidad del ensayo a la influencia de esos factores.

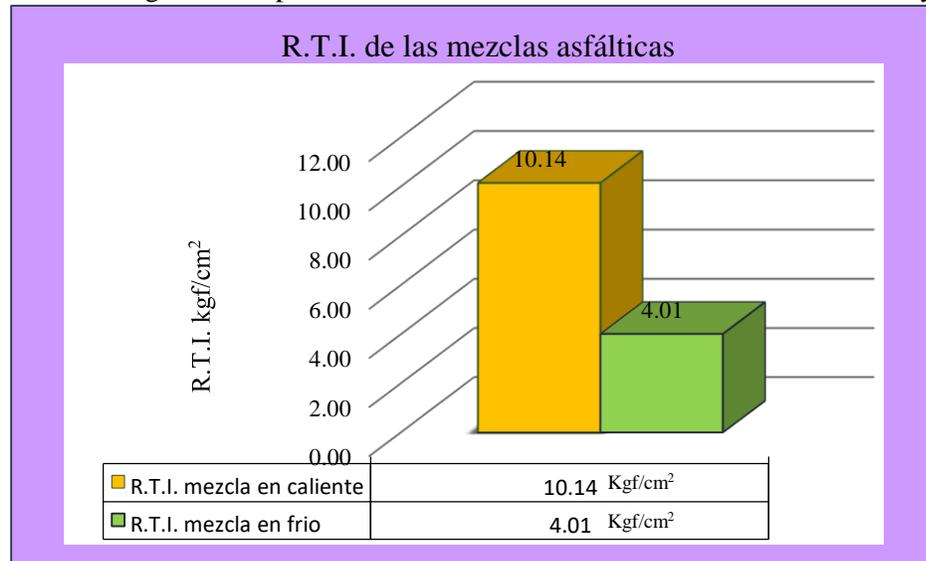
**Tabla 4.10** Cuadro comparativo de resultados obtenidos de los dos tipos de mezclas

|   | <b>Unidad</b>       | <b>Mezcla en caliente</b> | <b>Mezcla en frío</b> |
|---|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| Carga aplicada  | kgf                 | 996.99                    | 416.69                |
| Tracción indirecta                                      | kgf/cm <sup>2</sup> | 10.14                     | 4.01                  |
| Resistencia a T.I. mínimo                               | kgf/cm <sup>2</sup> | 9.66                      | 3.36                  |
| Resistencia a T.I. máximo                               | kgf/cm <sup>2</sup> | 10.61                     | 4.8                   |
| Nivel de confianza                                      | %                   | 87.76                     | 82.13                 |
| Error probable  | -                   | 0.459                     | 0.614                 |
| Valor aceptado  | kgf/cm <sup>2</sup> | 10.14 ± 0.459             | 4.01 ± 0.614          |
| <b>Distribución de tensiones en el plano vertical</b>   |                     |                           |                       |
| Deformación vertical                                    | mm                  | 0.605                     | 0.24                  |
| Tensión vertical  | N/mm <sup>2</sup>   | -2.99                     | -1.19                 |
| Tensión horizontal                                      | N/mm <sup>2</sup>   | 0.995                     | 0.394                 |
| <b>Distribución de tensiones en el plano horizontal</b> |                     |                           |                       |
| Deformación horizontal                                  | mm                  | 0.304                     | 0.246                 |
| Tensión vertical  | N/mm <sup>2</sup>   | -2.99                     | -1.19                 |
| Tensión horizontal                                      | N/mm <sup>2</sup>   | 0.996                     | 0.394                 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla mostrada se da a conocer un resumen de todos los resultados que se obtuvieron realizando el ensayo a tracción indirecta (método brasileño) y su posterior análisis mediante un proceso estadístico.

Observando la tabla comparativa se puede notar la diferencia en cuanto a la resistencia obtenida en las mezclas, el valor de resistencia de la mezcla en caliente es mayor a la mezcla en frío, esto debido a que el cemento asfáltico con el cual se elabora la mezcla en caliente es un material más viscoso, y eso representa una mayor adhesividad entre asfalto y agregado.

**Figura 4.15** Diagrama comparativo de R.T.I. entre mezclas elaboradas en caliente y en frío

Fuente: Elaboración propia

Haciendo una comparación de resultados de las resistencias a tracción indirecta entre la mezcla elaborada en caliente con cemento asfáltico y la mezcla elaborada en frío con emulsión RR-2C, se observa que la mezcla en caliente obtuvo mayores valores de R.T.I. alcanzando un valor medio de  $10,14 \pm 0,459 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que en la mezcla en frío se tiene valor medio de R.T.I.  $4,01 \pm 0,614 \text{ kgf/cm}^2$ . siendo este un 60,4 % menor que la R.T.I de la mezcla en caliente.

Así mismo el nivel de confianza que se determinó para ambas mezclas fueron de 87,76 % para la mezcla en caliente y de 82,13 % para la mezcla en frío.

“El nivel de confianza es uno de los parámetros importantes introducidos por la Normativa AASHTO al diseño de pavimentos, porque establece un criterio que está relacionado con el desempeño del pavimento frente a las solicitaciones exteriores. La confiabilidad se define como la probabilidad de que el pavimento diseñado se comporte de una manera satisfactoria durante su vida útil, bajo solicitaciones de carga e intemperismo, o la probabilidad de que los problemas de deformación y fallas estén por debajo de los niveles permisibles. Para elegir el valor de este parámetro se considera la importancia del camino, la confiabilidad de la resistencia de cada una de las capas y el tránsito del diseño pronosticado.”

En la siguiente tabla se muestran una serie de valores de nivel de confianza según el tipo de diseño.

**Tabla 4.11** valores de nivel de confianza de acuerdo al tipo de camino

| Tipo de camino             | Zonas urbanas | Zonas rurales |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Autopistas                 | 85 – 99,9 %   | 80 – 99,9 %   |
| Carreteras de primer orden | 80 – 99 %     | 75 – 95 %     |
| Carreteras secundarias     | 80 – 95 %     | 75 – 95 %     |
| Caminos vecinales          | 50 – 80 %     | 50 – 80 %     |

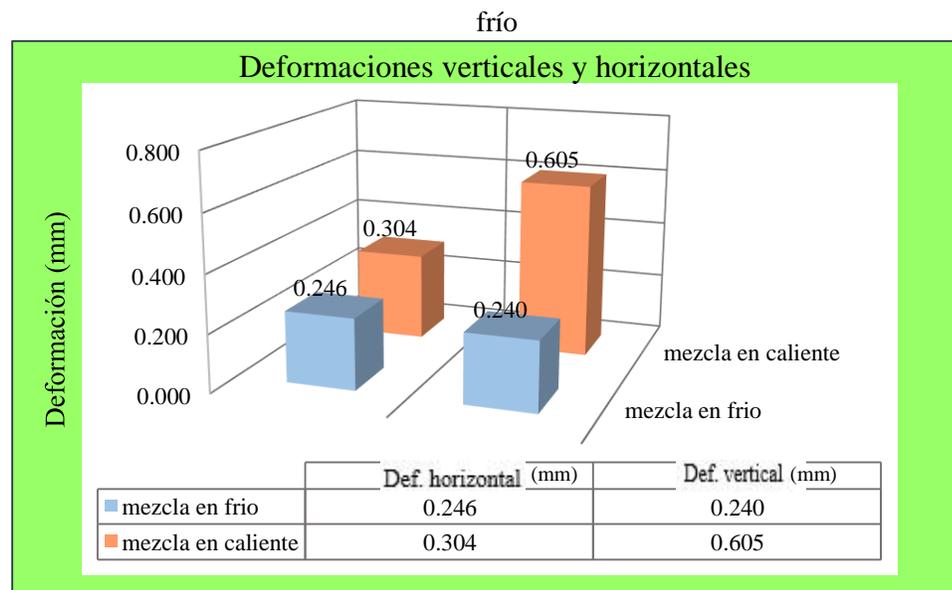
Fuente: Norma AASHTO, “guíde for design of pavement structures 1993”

Analizando estos resultados y con lo que especifica la estadística, los resultados obtenidos tienen un nivel de confianza adecuado el cual está dentro de lo que especifica la norma AASHTO para Carreteras de primer orden, por lo cual son resultados válidos.

Según especifica la estadística, el nivel de confianza mayor a 80% se considera que los valores obtenidos son válidos.

De esta manera se justifica a través del nivel de confianza obtenido y de los parámetros utilizados que los resultados obtenidos están dentro del rango de criterios especificados.

**Figura 4.16** Diagrama comparativo de deformaciones entre mezclas elaboradas en caliente y en



Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se puede observar las deformaciones máximas (verticales y horizontales) que se generaron antes de la falla de las briquetas al aplicar la carga de rotura.

Para la mezcla en frío se tiene una deformación media de 0,246 mm (deformación horizontal) y una media de 0,240 mm (deformación vertical), siendo la deformación vertical 2,44 % menor a la deformación horizontal.

Para la mezcla en caliente se obtuvo deformaciones medias de 0,605 mm (deformación vertical) y de 0,304 mm (deformación horizontal), siendo la deformación vertical mayor a la horizontal en un 49,75%.

Si se compara las deformaciones entre las dos mezclas, las elaboradas en caliente presentan mayores deformaciones que las mezclas en frío, sin embargo, en las mezclas con cemento asfáltico 85/100 las resistencias a tracción indirecta son mayores a las de las mezclas con emulsión.

#### 4.4. Validación de la hipótesis

Para la validación de la hipótesis planteada en esta investigación a partir de los resultados obtenidos de la resistencia a tracción indirecta en ambos tipos de mezclas asfálticas (frío y caliente), se analizará tomando en cuenta el nivel de confiabilidad de los resultados de cada tipo de mezcla.

##### Nivel de confiabilidad de los resultados

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| <b>R.T.I.M.C</b> | <b>R.T.I.M.F</b> |
| <b>87,76</b>     | <b>82,13 %</b>   |

$\mu = 80 \%$  (porcentaje de nivel de confianza que determina la estadística para que un resultado esté en el rango de aceptación)

Planteamiento de la prueba de hipótesis

$$\begin{cases} H_0 : \bar{x} < \mu \\ H_a : \bar{x} \geq \mu \end{cases}$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Determinación de la función pivotal Media:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

$$\bar{X} = 84,90$$

Desviación estándar:

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum (Xi - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

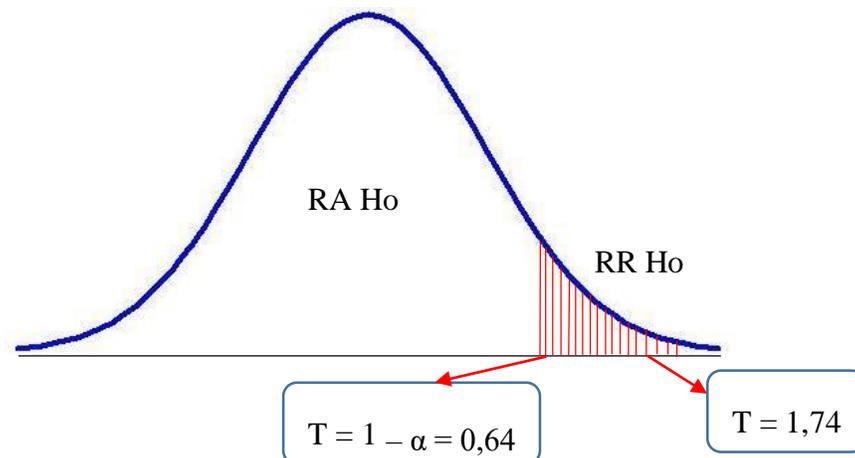
$$Sx = 3,98$$

Calculo de la función pivotal

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{Sx}{\sqrt{n}}}$$

$$T = \frac{84,90 - 80}{\frac{3,98}{\sqrt{2}}} = 1,74$$

Ubicar el valor obtenido en el cálculo de la función pivotal, en la región de aceptación y rechazo de la hipótesis nula  $H_0$ .



Conclusiones: El valor cae en la zona de rechazo, por tanto, se rechaza  $H_0$  la hipótesis nula, significa que el valor estudiado ha influido significativamente en los resultados y se acepta la hipótesis alternativa  $H_a: \mu > 80\%$

Al realizar la prueba de la hipótesis planteada para esta investigación “El ensayo a tracción indirecta en especímenes de mezclas asfálticas elaboradas en frío y en caliente, proporciona resistencias altamente confiables” se concluye que es válida la hipótesis.

Del análisis de los resultados de resistencia a tracción en los distintos especímenes elaborados en caliente y frío se obtuvieron valores que se encuentran en el rango de 9,66 a 10,61 kgf/cm<sup>2</sup> para mezclas en caliente y de 3,3 a 4,8 kgf/cm<sup>2</sup>, las mismas que presentan un nivel de confiabilidad de 87,76 % (mezcla caliente) y 82,13 % (mezcla fría), según determina la estadística los valores con nivel de confianza mayor a 80 % son válidos. A lo cual los resultados de confiabilidad obtenidos en esta investigación cumplen con lo mencionado anteriormente, por lo tanto, se considera la validez de la hipótesis planteada.

#### **4.5. Análisis de costos**

El costo necesario para la conformación de la mezcla asfáltica elaborada en caliente con cemento asfáltico 85 -100, y mezcla asfáltica elaborada en frío con emulsión RR-2C, se muestra a continuación.

El análisis de costo para ambas mezclas asfálticas se lo realizara para una superficie o área de 1 m<sup>2</sup>, y un espesor de 8 cm (volumen = 0,08 m<sup>3</sup>)

Los porcentajes de agregados utilizados que cumplan con los requerimientos de la normativa ASTM son las siguientes:

Agregado grueso (Grava de 3/4") = 25%      Peso unitario suelto = 1,41 gr/cm<sup>3</sup>

Agregado grueso (Gravilla 3/8") = 31%      Peso unitario suelto = 1,39 gr/cm<sup>3</sup>

Agregado fino (Arena) = 44%      Peso unitario suelto = 1,53 gr/cm<sup>3</sup>

Peso específico del cemento asfáltico (85-100) = 1.04 gr/cm<sup>3</sup>

Peso específico de la emulsión asfáltica (RR-2C) = 1.01 gr/cm<sup>3</sup>

### Cantidades de material necesarias para 1 m<sup>2</sup> y un espesor de 8 cm

Con los datos mostrados se determina las cantidades necesarias de material para la superficie mencionada, las cuales son las siguientes

| <b>Mezcla asfáltica en caliente</b> |                |        |
|-------------------------------------|----------------|--------|
| Cemento Asfáltico 85-100            | kg             | 10,784 |
| Grava 3/4                           | m <sup>3</sup> | 0,03   |
| Gravilla 3/8                        | m <sup>3</sup> | 0,04   |
| Arena                               | m <sup>3</sup> | 0,05   |

| <b>Mezcla asfáltica en frío</b> |                |       |
|---------------------------------|----------------|-------|
| Emulsión asfáltica RR-2C        | kg             | 15.13 |
| Grava 3/4                       | m <sup>3</sup> | 0.03  |
| Gravilla 3/8                    | m <sup>3</sup> | 0.04  |
| Arena                           | m <sup>3</sup> | 0.05  |

### Costo unitario para 1m<sup>2</sup> de una mezcla asfáltica en caliente

| Planilla de precios unitarios  |   |                |          |                    |                  |
|--|---|----------------|----------|--------------------|------------------|
| Proyecto:  | Análisis de la resistencia en diferentes tipos de mezclas asfálticas mediante el ensayo de Tracción indirecta |                |          |                    |                  |
| Actividad:   | Mezcla asfáltica en caliente  |                |          |                    |                  |
| Unidad:  | m <sup>2</sup>  |                |          |                    |                  |
| Moneda:  | Bs  |                |          |                    |                  |
| <b>1. Materiales</b>   |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Cemento asfáltico 85-100  | kg             | 10.78    | 6.57               | 70.89            |
| 2  | Grava 3/4   | m <sup>3</sup> | 0.03     | 130.00             | 4.16             |
| 3  | Gravilla 3/8  | m <sup>3</sup> | 0.04     | 150.00             | 6.15             |
| 4  | Arena   | m <sup>3</sup> | 0.05     | 125.00             | 6.50             |
| 5  |   |                |          |                    |                  |
| Total materiales   |   |                |          |                    | 87.70            |
| <b>2. Mano de obra</b>   |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Operador de equipo pesado   | Hrs            | 2.00     | 18.00              | 36               |
| 2  | Operador de planta  | Hrs            | 3.00     | 10.23              | 30.69            |
| 3  | Obrero  | Hrs            | 2.00     | 8.33               | 16.66            |
| 4  | Chofer  | Hrs            | 1.00     | 10.23              | 10.23            |
| 5  |   |                |          |                    |                  |
| Subtotal mano de obra  |   |                |          |                    | 93.58            |
| Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) ( 55% - 71.18%)    |   |                |          | 55                 | 51.47            |
| Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra) |   |                |          | 14.94              | 21.67            |
| Total mano de obra   |   |                |          |                    | 166.72           |
| <b>3. Equipo, maquinaria y herramientas</b>                              |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Micropavimentadora  | Hrs            | 0.02     | 669.06             | 13.38            |
| 2  | Barredora mecánica  | Hrs            | 0.02     | 162.47             | 3.25             |
| 3  | Compactador de rodillo neumático  | Hrs            | 0.08     | 332.81             | 26.62            |
| 4  | Compactador de rodillo liso   | Hrs            | 0.04     | 303.85             | 12.15            |
| 5  | Cargador frontal de ruedas =950m3   | Hrs            | 0.02     | 338.31             | 6.77             |
| 6  | Volquete de 12m3  | Hrs            | 0.00     | 227.87             | 0.23             |
|  |   |                |          |                    |                  |
| Herramientas =(% del total de mano de obra)                              |   |                |          | 5                  | 8.34             |
| Total equipo, maquinaria y herramientas                                  |   |                |          |                    | 70.74            |
| <b>4. Gastos generales y administrativos</b>                             |   |                |          |                    |                  |
| Gastos generales = % de 1+2+3  |   |                |          | 10                 |                  |
| Total gastos generales y administrativos                                 |   |                |          |                    | 32.52            |
| <b>5. Utilidad</b>   |   |                |          |                    |                  |
| Utilidad= % de 1+2+3+4   |   |                |          | 10                 |                  |
| Costo total utilidad   |   |                |          |                    | 35.77            |
| <b>6. Impuestos</b>  |   |                |          |                    |                  |
| Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5   |   |                |          | 3.09               |                  |
| Costo total impuestos  |   |                |          |                    | 12.16            |
| Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)                                      |   |                |          |                    | 405.60           |
| <b>Total precio unitario adoptado</b>                                    |   |                |          |                    | <b>406,00 Bs</b> |

## Costo unitario para 1m<sup>2</sup> de una mezcla asfáltica en frío

| Planilla de precios unitarios  |   |                |          |                    |                  |
|--|---|----------------|----------|--------------------|------------------|
| Proyecto:  | Análisis de la resistencia en diferentes tipos de mezclas asfálticas mediante el ensayo de Tracción indirecta |                |          |                    |                  |
| Actividad:   | Mezcla asfáltica en frío  |                |          |                    |                  |
| Unidad:  | m <sup>2</sup>  |                |          |                    |                  |
| Moneda:  | Bs  |                |          |                    |                  |
| <b>1. Materiales</b>   |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Emulsión asfáltica RR-2C  | kg             | 15.13    | 6.09               | 92.12            |
| 2  | Grava 3/4   | m <sup>3</sup> | 0.03     | 130.00             | 4.11             |
| 3  | Gravilla 3/8  | m <sup>3</sup> | 0.04     | 150.00             | 6.00             |
| 4  | Arena   | m <sup>3</sup> | 0.05     | 125.00             | 6.38             |
| 5  |   |                |          |                    |                  |
| Total materiales   |   |                |          |                    | 108,60           |
| <b>2. Mano de obra</b>   |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Operador de equipo pesado   | Hrs            | 2.00     | 18.00              | 36               |
| 2  | Operador de planta  | Hrs            | 3.00     | 10.23              | 30.69            |
| 3  | Obrero  | Hrs            | 2.00     | 8.33               | 16.66            |
| 4  | Chofer  | Hrs            | 1.00     | 10.23              | 10.23            |
| 5  |   |                |          |                    |                  |
| Subtotal mano de obra  |   |                |          |                    | 93.58            |
| Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) ( 55% - 71.18%)    |   |                |          | 55                 | 51.47            |
| Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra) |   |                |          | 14.94              | 21.67            |
| Total mano de obra   |   |                |          |                    | 166.72           |
| <b>3. Equipo, maquinaria y herramientas</b>                              |   |                |          |                    |                  |
| N°   | Descripción   | Unidad         | Cantidad | Precio Unit.. (Bs) | Parcial (Bs)     |
| 1  | Micropavimentadora  | Hrs            | 0.02     | 669.06             | 13.38            |
| 2  | Barredora mecánica  | Hrs            | 0.02     | 162.47             | 3.25             |
| 3  | Compactador de rodillo neumático  | Hrs            | 0.08     | 332.81             | 26.62            |
| 4  | Compactador de rodillo liso   | Hrs            | 0.04     | 303.85             | 12.15            |
| 5  | Cargador frontal de ruedas =950m3   | Hrs            | 0.02     | 338.31             | 6.77             |
| 6  | Volquete de 12m3  | Hrs            | 0.00     | 227.87             | 0.23             |
| Herramientas =(% del total de mano de obra)                              |   |                |          | 5                  | 8.34             |
| Total equipo, maquinaria y herramientas                                  |   |                |          |                    | 70.74            |
| <b>4. Gastos generales y administrativos</b>                             |   |                |          |                    |                  |
| Gastos generales = % de 1+2+3  |   |                |          | 10                 |                  |
| Total gastos generales y administrativos                                 |   |                |          |                    | 34,61            |
| <b>5. Utilidad</b>   |   |                |          |                    |                  |
| Utilidad= % de 1+2+3+4   |   |                |          | 10                 |                  |
| Costo total utilidad   |   |                |          |                    | 38,07            |
| <b>6. Impuestos</b>  |   |                |          |                    |                  |
| Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5   |   |                |          | 3.09               |                  |
| Costo total impuestos  |   |                |          |                    | 12.94            |
| Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)                                      |   |                |          |                    | 431,67           |
| <b>Total precio unitario adoptado</b>                                    |   |                |          |                    | <b>432,00 Bs</b> |

En las planillas mostradas con los respectivos cálculos y resultados de los costos para mezclas asfálticas en frío y caliente, se puede observar que la mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico (85-100) tiene un precio por metro cuadrado de 406,00 Bs. siendo este menor al de la mezcla asfáltica en frío.

### **Costo de la adaptación de la prensa Lottman del equipo Marshall para la realización del ensayo a Tracción Indirecta**

Al no contar en el laboratorio de la Universidad con un equipo para realizar el ensayo de tracción indirecta a las mezclas asfálticas fue necesario realizar una adaptación a la prensa Lottman del equipo Marshall, ya que las características del equipo Marshall cumplía con los requerimientos y especificación de la norma NLT-346/90.

Siguiendo las indicaciones de dicha norma se encargó la construcción de los accesorios necesarios para adaptarlas a la prensa Lottman, con un costo económico que se mostrará a continuación.

**Figura 4.17** Accesorios necesarios para el ensayo de tracción indirecta



Fuente: Elaboración propia

| Accesorios incorporados a la prensa Lottman                                       |   |   |           |
|---|---|---|-----------|
|  |  | Dispositivo de sujeción de la probeta + generatriz de transmisión de desplazamiento | 600,00 Bs |
|   |   | Tornillos de ajuste   |           |

Como se muestra en el cuadro, toda la adaptación realizada a la prensa Lottman tuvo un costo de 600 Bs. con la cual se pudo realizar el ensayo a tracción indirecta.

Se realizó la cotización de equipos para el ensayo de Tracción Indirecta, en la Compañía Exportadora e Importadora Nacional Ltda. “CEINA Ltda”, las cuales proporcionaron el costo de los equipos de la marca CONTROLS. La planilla de costo de los equipos proporcionada por dicha compañía se encuentra en la parte de anexos.

El equipo es una prensa Marshall que cuenta con un kit de accesorios para la ejecución de ensayo de tracción indirecta en modo digital

Estos equipos tienen un costo de:

El primer equipo (proforma # 210801 ver anexos)

Tiene un costo de 33.700,00 Bs (Digitalización de prensa Marshall modelo B0030 + kit de accesorios para ensayo de Tracción indirecta)

Segundo equipo (proforma # 210802 ver anexos)

Tiene un costo de 86.400,00 Bs (Prensa Multivelocidad con controlador digital integrado modelo V1172 + kit de accesorios para la ejecución de ensayo de tracción indirecta)

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Luego de realizar el análisis de los resultados obtenidos de resistencia a tracción indirecta empleando en el ensayo brasileño “resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas”, se llegó a las siguientes conclusiones.

- Con el uso del ensayo a tracción indirecta se pudo determinar las resistencias de ambos tipos de mezclas, cuyos valores medios luego del tratamiento estadístico fueron, para mezcla en caliente de  $10,14 \pm 0,459 \text{ kgf/cm}^2$ , una desviación estándar de 0,31 y un nivel de confianza de 87,76%. Para la mezcla en frío el valor medio conseguido fue de  $4,01 \pm 0,614 \text{ kgf/cm}^2$  con una desviación estándar de 0,53. y nivel de confianza de 82,13%.
- Se determinó que las resistencias máximas y mínimas a tracción indirecta en mezclas asfálticas en frío tienen un valor de  $4,80 \text{ kgf/cm}^2$  y  $3,36 \text{ kgf/cm}^2$  y en caliente un valor de  $10,61 \text{ kgf/cm}^2$  y  $9,66 \text{ kgf/cm}^2$
- En la comparación realizada entre las mezclas se observó que las mezclas elaboradas en caliente obtuvieron mayores resistencias a tracción indirecta en comparación a la mezcla elaborada en frío que fueron menores con una diferencia de hasta un 60%; en cambio las deformaciones ocurridas antes de la rotura fueron menores en la mezcla en frío, mientras que en la mezcla en caliente fueron mayores.
- Todos los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo a tracción indirecta nos muestran la posibilidad de emplear este ensayo en el control de ejecución de mezclas asfálticas, ya que sus resultados se traducen en las características mecánicas del pavimento, de tal forma que se tenga una mejor idea respecto al comportamiento esperado del pavimento.

- Se logró determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción indirecta, cumpliendo así con el objetivo general planteado en la investigación.
- Se realizó la validación de la hipótesis planteada, en la cual se determinó su validez, ya que cumple con lo establecido en la estadística que valores con N.C. mayor a 80% se consideran válidos y lo exigido por la norma AASHTO, un nivel de confianza de 80 a 99% para carreteras de primer orden.
- Al analizar los resultados también se puede comprobar que este ensayo presenta sensibilidad para detectar la variación en la resistencia de las mezclas cuando se modifica las proporciones de materiales; por tanto, se debe considerar incluir en los controles de calidad de mezclas, la prueba de tracción indirecta (método brasileño), por la confiabilidad en los resultados obtenidos, y por la sencillez y rapidez que presenta el empleo de este ensayo.

## **5.2. Recomendaciones**

- Durante el proceso de investigación se pudo identificar las fases en las cuales se podría incurrir en errores al momento de obtener el material a ensayar, es decir en las briquetas durante el proceso de elaboración, refiriéndonos a aspectos como la temperatura del molde y martillo de compactación en el caso de las mezclas en caliente, así como también la segregación del material al vertido, granulometrías exactas, entre otros, por lo que requiere de toda la atención posible de parte del investigador, pues esos pequeños detalles aparentemente insignificantes pueden influir bastante en los resultados.
- El ensayo de tracción indirecta se lo realizó a una misma temperatura de 25° especificada en la normativa NLT 346/90, esto se realizó sobre mezclas convencionales; para ello se recomienda la adquisición de un equipo termostático o baño termostático con el cual se pueda mantener una temperatura constante, y así obtener mejores resultados.

- Se recomienda realizar un control más riguroso con respecto a las temperaturas de mezclado y compactación para mezclas en caliente, puesto que este es un factor determinante para la obtención de buenos resultados, y obtener características muy similares a las mezclas puestas en obra.
- Con los resultados obtenidos en esta investigación y a partir del análisis de estos resultados se puede recomendar un valor mínimo de resistencia que deben cumplir las mezclas convencionales, los cuales son de 10,14 kgf/cm<sup>2</sup> para mezcla en caliente y de 4,01 kgf/cm<sup>2</sup> para mezcla en frío.
- Se recomienda la adquisición de un equipo digitalizado para realizar el ensayo de tracción indirecta, que cuente con las características cotizadas anteriormente, con las cuales se pueda obtener los resultados de forma inmediata, en cuanto a la resistencia, deformaciones, tensiones, etc.
- Para tener una mayor comprensión de la resistencia de mezcla asfáltica una vez puesta en servicio, se recomienda para próximos estudios, la extracción de núcleos, para que de esta manera se pueda comparar los resultados de resistencia de la mezcla elaborada en laboratorio y los núcleos extraídos, determinando así la relación existente de resistencia entre ellas.
- Para investigaciones futuras, se propone se pueda variar las temperaturas de ensayo con el fin de evaluar la variación y susceptibilidad de las resistencias con relación al cambio de la temperatura.