

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. INTRODUCCION

El concepto de susceptibilidad térmica se define como el cambio de la consistencia con un cambio en la temperatura. La susceptibilidad a la temperatura es una de las propiedades más importantes en el uso de los cementos asfálticos. Esta propiedad nos permite modificar la consistencia, y por lo tanto la trabajabilidad del asfalto para el mezclado con los agregados, luego para la compactación y por último para la vida de servicio de la mezcla.

La temperatura de las mezclas asfálticas varía significativamente desde su producción en la planta hasta la conformación de la estructura de pavimento, especialmente en el proceso de compactación. Estas diferencias de temperatura de la mezcla de un punto a otro, generan segregación, micro fisuras, superficies onduladas, desgarramientos y especialmente cambios en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla.

Las mezclas asfálticas, reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las propiedades mecánicas que se obtienen por el ensayo Marshall para mezclas asfálticas, se puede decir que juegan un rol fundamental en la vida útil de un pavimento, ya que estas permiten definir su Fluencia, porcentaje de los vacíos, densidad, estabilidad y peso volumétrico.

En el departamento de Tarija, la construcción de carreteras con carpetas asfálticas se realiza más que todo con mezclas densas o cerradas (Mezclas tradicionales) y los estudios realizados sobre las mezclas asfálticas en nuestro Departamento son muy escasos, es por eso que esta investigación tiene un propósito de informar acerca de la susceptibilidad térmica (variación de temperatura) en el momento de la dosificación en las propiedades físico mecánica de las mezclas asfálticas así como sus ventajas y desventajas.

Lo que se pretende realizar con este trabajo del estudio experimental sobre la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas es realizar ensayos con dos tipos de cemento: convencional y modificado obteniendo mezclas asfálticas a diferentes temperaturas de tal manera que se pueda analizar el comportamiento y parámetros de sus propiedades y escoger el producto que más se ajuste a las necesidades de cada proyecto.

La ingeniería enfrenta permanentemente el reto de mantener y desarrollar estructuras de pavimento con recursos económicos limitados. Las especificaciones tradicionales de diseño y construcción establecen la necesidad de grandes cantidades de materiales de alta calidad para garantizar la durabilidad y desempeño de las estructuras, aunque no hay disponibilidad suficiente de tales materiales. Ante este panorama la ingeniería ha recurrido a alternativas de diseño que consideren, materiales diferentes a los convencionales en las mezclas asfálticas para poder dar nuevas alternativas y así reducir el costo, la contaminación del medio ambiente entre otros.

1.2. JUSTIFICACION

Las carreteras ocupan un lugar importante dentro de la infraestructura debido a que contribuyen al desarrollo del país, por ello es necesario darles el mantenimiento adecuado para alargar su vida útil, utilizando como muestra las vías del departamento de Tarija.

La susceptibilidad térmica afecta bastante en los pavimentos ya que con los cambios climatológicos el asfalto presenta cambios de consistencia y así mismo afecta la vida útil del pavimento.

Las mezclas asfálticas se ven afectadas al ser sometidas a la variación de la temperatura llegando a tener cambios en las propiedades mecánicas debido a que al ser compactadas a temperaturas bajas el asfalto se contrae y en temperaturas altas se dilata.

Una mezcla a la que se le hace el seguimiento adecuado en el momento de controlar la temperatura en la elaboración y luego en el proceso de compactación va a tener una buena resistencia, menor porcentaje vacíos en la mezcla, mayor durabilidad, menos fisuraciones, etc.

El presente trabajo de investigación se realizó con el fin de analizar el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas a diferentes temperaturas con asfalto convencional y modificado, también se determinó los valores de la susceptibilidad térmica de los dos asfaltos mediante el ensayo de la viscosidad para luego determinar si tienen la misma tendencia que el de las mezclas.

1.3. DISEÑO TEORICO

1.3.1. Situación problemática.

En nuestro país las carreteras se encuentran deterioradas, presentando un bajo rendimiento y respuesta inadecuada ante las cargas vehiculares, las temperaturas y el ambiente. Por este motivo se busca la manera de demostrar que las mezclas asfálticas son afectadas en sus propiedades cuando se hace variar la temperatura de compactación.

La susceptibilidad térmica es una de las propiedades más importantes en el uso de los cementos asfálticos. Esta propiedad nos permite establecer que los asfaltos tienen un cambio en su consistencia a medida que se aumenta la temperatura.

Un asfalto muy susceptible a la temperatura no es deseable en la producción de mezclas asfálticas ya que su viscosidad a 135 °C puede ser muy baja lo que se traduce en problemas durante el mezclado y compactación. Por otro lado, a temperaturas de servicio la viscosidad puede ser muy alta, lo cual puede generar problemas por fisuraciones térmicas.

Finalmente se propone en esta investigación: elaborar mezclas asfálticas (briquetas) con cemento convencional 85-100 y modificado 60-85 a diferentes temperaturas para ser sometidas al ensayo Marshall y hacer un análisis de sus propiedades, posteriormente con esas mismas temperaturas se realizara el ensayo de viscosidad para determinar los valores de la susceptibilidad térmica de ambos asfaltos y luego comparar con las curvas de las variables dependientes con la curva susceptibilidad térmica vs temperatura para verificar si tienen la misma tendencia entre el asfalto y las mezclas asfálticas que serán sometidas a diferentes temperaturas.

1.3.2. Problema.

¿Cuál es la tendencia, de la susceptibilidad térmica, aplicada a mezclas asfálticas y medida en las propiedades determinadas por el Marshall?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.

1.4.1. Objetivo general.

Estudiar el efecto de la susceptibilidad térmica de mezclas asfálticas en caliente, mediante briquetas con cemento asfáltico convencional y modificado; de tal manera; se pueda conocer variaciones en las propiedades, utilizando el método Marshall.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Definir los conceptos principales necesarios para desarrollar el tema de susceptibilidad térmica.
- Realizar la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico convencional y modificado, en base a las normas: ASTM y AASHTO.
- Determinar el contenido óptimo del cemento convencional y modificado mediante ensayos de laboratorio.
- Elaborar y analizar briquetas en el rango de 80 a 190°C.
- Analizar y observar el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas sometidas a diferentes temperaturas utilizando el método Marshall.
- Comparar las propiedades entre la mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con SBS.
- Determinar la susceptibilidad térmica de la mezcla convencional y modificada mediante del ensayo viscosidad Saybolt Furol a diferentes temperaturas.
- Analizar el comportamiento de la curva de la susceptibilidad térmica, luego comparar con las curvas de las variables dependientes.

1.5. HIPOTESIS.

La susceptibilidad térmica aplicada en asfaltos, es de igual tendencia cuando se aplica a las mezclas asfálticas.

1.6. DEFINICION DE VARIABLES INDEPENDIENTE Y DEPENDIENTES.

1.6.1. Independiente.

Medición de los valores de susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas (X1)

Susceptibilidad térmica (X2).

Tabla N° 1.1: Conceptualización y operacionalización de la variable independiente

Variable	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor / Acción
Independiente (X1) Medición de los valores de susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas	Son las temperaturas que serán aplicadas a las mezclas asfálticas. La temperatura indica la intensidad de calor o frío en una mezcla.	Temperatura	Medición de la temperatura	Grados centígrados
Independiente (X2) Susceptibilidad térmica	La susceptibilidad térmica se define como el cambio de la consistencia con un cambio en la temperatura.	Temperatura	Medición de la temperatura	Grados centígrados
		Viscosidad	Medición de la viscosidad	Segundos

Fuente: Elaboración propia.

1.6.2. Dependiente.

Fluencia (Y1)

Porcentaje de los vacíos (Y2)

Densidad (Y3)

Estabilidad (Y4)

Relación betumen vacíos (R.B.V.) (Y5)

Tabla N° 1.2: Conceptualización y operacionalización de la variable dependiente

Variable	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor / Acción
Dependiente (Y1) Fluencia	Es la deformación del espécimen de mezclas asfálticas	Fluencia	Briquetas con T ° > 100°C T ° < 100°C	Método Marshall
Dependiente (Y2) Porcentaje de los vacíos	Son los vacíos pequeños de aire que tiene los agregados en el espécimen de la mezcla asfáltica	Porcentaje de los vacíos	Briquetas con T ° > 100°C T ° < 100°C	Método Marshall
Dependiente (Y3) Densidad	Es el peso de un volumen específico de una mezcla asfáltica	Densidad	Briquetas con T ° > 100°C T ° < 100°C	Método Marshall
Dependiente (Y4) Estabilidad	Es la resistencia del espécimen de mezclas asfálticas	Estabilidad	Briquetas con T ° > 100°C T ° < 100°C	Método Marshall
Dependiente (Y5) Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Son los espacios de asfalto que existe entre las partículas del agregado	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Briquetas con T ° > 100°C T ° < 100°C	Método Marshall

Fuente: Elaboración propia.

1.7. ALCANCE DE INVESTIGACION.

Considerando que la investigación a emplear es del tipo explicativo donde se busca las causas que originan el problema, en nuestro caso particular se busca saber cuál es la tendencia de la susceptibilidad térmica a través del comportamiento del cemento asfáltico y mezclas.

Inicialmente se identifican los materiales de la investigación a las cuales se realiza su caracterización a través de ensayos de laboratorio tanto en los agregados como en los cementos asfálticos (asfalto convencional y modificado).

En la fase siguiente se elabora mezclas asfálticas (briquetas) con cemento convencional 85-100 y modificado 60-85 a diferentes temperaturas para ser sometidas al ensayo Marshall y hacer un análisis de sus propiedades: Densidad, % de vacíos de la mezcla, (VAM) vacíos del agregado mineral, (RBV) relación betumen-vacíos, estabilidad y fluencia., la segunda fase es que con esas mismas temperaturas se realizara el ensayo de viscosidad para determinar los valores de la susceptibilidad térmica de ambos asfaltos.

Posteriormente se va a analizar el comportamiento de la curva de la susceptibilidad térmica, luego comparar con las curvas de las variables dependientes para verificar si tienen la misma tendencia entre el asfalto y las mezclas asfálticas que serán sometidas a diferentes temperaturas.

También se hará una comparación de los resultados de las propiedades de las briquetas elaboradas con cemento convencional y modificado viendo cuál de las dos mezclas es más recomendada.

Se presentara las conclusiones, donde se da a conocer los resultados obtenidos y su análisis, finalmente se establecerá las recomendaciones necesarias para realizar dichas prácticas y obtener al final un resultado que pueda ser de utilidad a la comunidad científica.

1.8. Análisis estadístico.

Según la ASTM para un trabajo de investigación se debe realizar el análisis estadístico con un tamaño mínimo de muestras de 30.

Se realizara una estadística descriptiva para obtener las siguientes medidas de tendencia central.

Media aritmética: Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable. Suma de los valores divididos por el tamaño de la muestra, es muy sensible a los valores extremos.

$$\bar{x} = \frac{\sum xi}{n}$$

Mediada: Es un conjunto de datos ordenados de mayor a menor, la mediana corresponde al dato central, aquel que deja un 50% de la información abajo y el otro 50% es mayor. Es un valor que divide las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos. Si el número es de datos par, se elige la media de los datos centrales.

Moda: Es el valor o valores donde la distribución de frecuencias alcanza un máximo.

$$Mo = LI + \frac{f_m - f_{(m-1)}}{2 * f_m - f_{(m-1)} - f_{(m+1)}} * A$$

Desviación estándar: Es una de las medidas de mayor utilidad dentro del análisis estadístico es la desviación estándar, que es una medida que considera que tan lejos de la medida están localizados cada uno de los valores observados y se la define como la raíz cuadrada positiva de la varianza.

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

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ASFALTO.

2.1.1. Definición.

“El asfalto, es un mineral de color oscuro, que presenta propiedades ligantes y aglutinantes, conformado por una serie muy compleja de elementos y compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos; soluble en gran parte en desulfuro de carbono, presenta consistencia semisólida a las temperaturas ambientes ordinarias pero tiende rápidamente a la liquidez al incrementarse la temperatura”.¹

El asfalto o betún según la ASTM (American Society for Testing and Materials), es un material consistente de color marrón oscuro o negro compuesto principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular como los asfaltos, alquitranes breas y asfaltitas.

Es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad. Se utiliza para revestir carreteras, impermeabilizar estructuras (como depósitos, techos y tejados), y en la fabricación de baldosas, pisos y tejas.¹

El asfalto de penetración, también llamado cemento Asfáltico, es el material por excelencia para la pavimentación, en virtud de sus propiedades y características. Es un material altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales.

Todo el asfalto comercializado en el medio con la finalidad de ser usado en la pavimentación de carreteras es producido en refinerías de petróleo modernas y se denomina asfalto de petróleo.

¹ ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. 5 ed. Popayán: Litocenco.2006. p.17.

El asfalto de petróleo está compuesto casi enteramente por betún, mientras que en el alquitrán el contenido de betún es relativamente bajo. En vista de estas diferencias es necesario que los productos del alquitrán y los asfaltos de petróleo sean considerados y tratados como elementos completamente separados.

Como el asfalto es un material muy impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, presenta las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones:

Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.

Proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su capacidad.

También se puede utilizar para hacer techos.²

El asfalto para pavimentación a temperatura atmosférica normal (ambiente) es un material negro, pegajoso, semi-sólido y altamente viscoso. Está compuesto primordialmente de moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contiene otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. Debido a que el asfalto de pavimentación es pegajoso, se adhiere a las partículas del agregado y puede ser usado para cementarlas o ligarlas dentro del concreto asfáltico. El asfalto para pavimentación es impermeable y no le afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría. Esta combinación única de características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante.

² En Línea. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Asfalto>

El asfalto natural es durable y ha sido usado a lo largo de la historia antes del año 3800 antes de Cristo, el asfalto de petróleo moderno tiene las mismas características de durabilidad, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

2.1.2. Propiedades físicas del asfalto ³.

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

2.1.2.1. Durabilidad.

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). [Asphalt Institute; 1992].

2.1.2.2. Adhesión y cohesión.

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

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como relacionada con la

adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

2.1.2.3. Susceptibilidad a la temperatura.

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

2.1.2.4. Endurecimiento y envejecimiento.

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

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

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado ³.

³ En Línea. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104588/salamanca_ga.pdf?sequence=3&isAllowed=y

2.1.3. Ensayo de caracterización del cemento asfáltico.

2.1.3.1. Ensayos de penetración.

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo.

Consiste en calentar un recipiente con cemento asfáltico a una temperatura de referencia, 25°C, en un baño de agua a temperatura controlada. Se apoya una aguja normalizada de 100 gramos de peso sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos. La medida de la penetración es la longitud que penetra la aguja en el cemento asfáltico en unidades de 0,1 mm. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D5; AASHTO T99-97).

2.1.3.2. Ensayos de punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland.

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

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de “vaso abierto de Cleveland” que consiste en llenar un vaso con un determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El tiempo de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes vapores volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-92).

2.1.3.3. Ensayos de punto de ablandamiento mediante el aparato anillo y bola.

Para obras de ingeniería se requiere que los materiales a utilizar cumplan ciertos requisitos de calidad y tengan ciertas propiedades químicas y mecánicas; es por esto que se debe determinar las condiciones a las cuales los materiales pierden o cambian estas características, y para el asfalto que es un material bituminoso es preciso determinar a qué temperatura comienza a fluir y para esto se realiza este ensayo. El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas durante su vida de servicio⁴.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-36).

2.1.3.4. Ensayos de peso específico.

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto y los alquitranes suaves por uso de un picnómetro. Es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea también como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas.

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

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-70).

⁴ En Línea. Disponible en: https://www.academia.edu/36133663/ENSAYO_DE_ANILLO_Y_BOLA

2.1.3.5. Ensayo de viscosidad Saybolt Furol.

Este método describe el procedimiento para la medida empírica de la viscosidad Saybolt. El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol, calibrado bajo condiciones especificadas. La viscosidad Furol es aproximadamente un décimo de la viscosidad Universal y se recomienda para productos del petróleo que tienen viscosidad mayor que 1000 s (Saybolt Universal) tales como combustible, aceites y otros materiales residuales. La palabra “Furol” es una contracción de fuel and road oils

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-244).

2.2. AGREGADO EN MEZCLAS ASFALTICA.

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, esta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito.

El agregado mineral estará compuesto por granos gruesos, finos y además un relleno mineral (filler).

Se debe elegir cuidadosamente el tipo de agregado porque sus propiedades varían según el lugar de producción. Es muy importante el manipuleo de los agregados, ya que cuando el acopio de los materiales es malo puede llegar a producirse segregación, separación de materiales, entonces se debe tomar precauciones para evitar este comportamiento.

2.2.1. Propiedades de los agregados.

Es importante considerar que entre los criterios que definen el uso de un agregado sobre otro esta la disponibilidad y el costo, más aun es necesario considerar otros criterios esenciales para la elaboración de una buena mezcla, como: tamaño máximo de la partícula, limpieza, dureza, forma de partícula, textura de la superficie, capacidad de absorción, peso específico.

2.2.2. Tipos de agregados utilizados en mezclas asfálticas.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

2.2.2.1. Agregado grueso.

Estarán constituidos por piedras, grava fracturada natural o artificial y eventualmente por materiales naturales que se presenten en estado fracturado o muy anguloso, con textura superficial rugosa son de un tamaño aproximado a 2,5 mm (0,1 plg).

2.2.2.2. Agregado fino.

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2,5 mm (0,1 plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las fracciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas. Los áridos finos son los que pasan por el tamiz N°4. Se divide en arena y filler ⁵.

Arena: La arena es un conjunto de fragmentos sueltos de rocas o minerales de pequeño tamaño cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm.

Se clasifican por el lugar de excavación en: arena de río, arena de cantera u arena de mar.⁶

Filler: Es también llamado relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz N°200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado aunque puede utilizarse otros polvos de piedra, cal apagada, cemento portland y algunas sustancias muy finas. El filler en muchos casos aumenta la estabilidad y la calidad de las mezclas asfálticas.⁷

⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 450. Bogotá: INVIAS, 2007. p.6.

⁶ En Línea. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arena>

⁷ En Línea. Disponible en: <https://www.arqhys.com/construccion/asfalto-mezclas.html>

2.2.3. Ensayos de caracterización de los agregados.

La caracterización morfológica de los agregados usados en las mezclas asfálticas es:

Granulometría (ASTM D5821-95).

Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM D-127).

Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM D-128).

Resistencia al desgaste por abrasión del agregado grueso (ASTM C-131).

Equivalente de arena (ASTM D-2419).

2.2.3.1. Granulometría.

Tiene como fin determinar la distribución de tamaños de los agregados pétreos, estos son separados por medio de unos tamices predeterminados por el diseño de la mezcla asfáltica.

El procedimiento de ejecución del ensayo consiste en tomar una muestra de suelo de peso conocido, colocarlo en el juego de tamices ordenados de mayor a menor abertura, pesando los retenidos parciales de suelo en cada tamiz. Esta separación de la muestra en dos o más fracciones que contiene cada una de las partículas de un solo tamaño, es lo que se conoce como fraccionamiento.

La determinación del peso de cada fracción que contiene partículas de un solo tamaño es llamado “Análisis Mecánico”. Este es uno de los análisis de suelo más antiguo y común, brindando la información básica por revelar la uniformidad o graduación de un material dentro de rangos establecidos y para la clasificación por texturas de un suelo.⁸

⁸ MANUAL TECNICO DE CARRETERAS ABC. Ensayos de suelos y materiales*asfaltos volumen 4. Bolivia: ASTM,2008. D-422

2.2.3.2. Peso específico y absorción del agregado grueso.

Este método describe el proceso por medio del cual se determina el peso específico aparente y nominal, así como la absorción que presentan a las 24 horas de estar sumergidos en agua, esta caracterización se realiza con agregados que sean retenidos por el tamiz de 4,75 mm o N°4.

El peso específico de un agregado es el cociente entre el peso de un volumen unitario de material y el peso de igual volumen de agua a una temperatura entre 20° y 25° C. Hay tres tipos ampliamente usados de pesos específicos de los áridos: peso específico aparente, peso específico masivo del agregado seco (real- efectivo) y peso específico aparente con agregado saturado.

2.2.3.3. Peso específico y absorción del agregado fino.

Describe el proceso que debe seguirse para determinar El peso específico aparente y real, así como la absorción que presentan a las 24 horas de estar sumergidos en agua ⁹.

2.2.3.4. Resistencia al desgaste por abrasión.

El proceso describe el sometimiento a desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles de los agregados gruesos máximo de 1 ½” por medio de una carga abrasiva colocada en la máquina.

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia de los agregados triturados.

2.2.3.5. Equivalente de arena.

Este ensayo tiene como objetivo determinar la calidad q tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento y la cantidad de polvo arcilloso que tiene el agregado fino. Debido a que este tipo de suelos es nocivo para las mezclas.

⁹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 450. Bogotá: INVIAS, 2007.

2.3. MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL.

2.3.1. Definición.

Generalmente una mezcla es el resultado de la combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en unas proporciones exactas y predeterminadas; se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más usuales las Mezclas densas en caliente. Se conocen una serie de procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla en caliente, siendo el procedimiento Marshall uno de los métodos más usados y confiables.

Sirve como agente cementante que fija los agregados en la posición adecuada para transmitir las cargas aplicado a las capas inferiores. Los agregados son por lo general piedra partida, grava, arenas, etc., se pueden usar combinados o aisladamente ¹⁰.

Una mezcla tiene que ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, elevadas temperaturas, etc. También una mezcla tiene que ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno.

2.3.2. Contenido de asfalto.

El contenido de asfalto efectivo es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de agregado.

El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

¹⁰ RONDON QUINTANA, Hugo. Serie de guías: Fundamentos 1. 1 ed. Bogota D.C. Universidad Católica de Colombia. 2009. p. 45

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

2.3.3. Propiedades de mezclas asfálticas.

Las propiedades principales que contribuyen a la calidad de una mezcla en caliente son:

Estabilidad: Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Durabilidad: Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.

Impermeabilidad: Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.

Flexibilidad: Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.

Resistencia a la fatiga: Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.

Trabajabilidad: Es la facilidad de una mezcla a colocarse y compactarse.

Resistencia al deslizamiento: Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada ¹¹.

¹¹ Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. Popayán: ASOPAC, 1994. p.21.

2.3.4. Tipos de elaboración de mezclas asfálticas convencionales.

2.3.4.1. Mezcla asfáltica en caliente.

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante.

Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos ¹².

2.4. MEZCLA ASFALTICA MODIFICADAS CON POLIMEROS.

2.4.1. Definición de polímero.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuesto químico con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas. A continuación se nombraran algunos modificadores que han dado buenos resultados:

¹² En Línea. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/3406514.pdf?sequence=14&isAllowed=y>

Homopolímeros: Que tienen una sola unidad estructural (monómero)

Copo límeros: Tienen varias unidades estructurales distintas (EVA. SBS).

Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación.

2.4.2. Definición de asfalto modificado.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas ¹³.

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

¹³ J.Agnusdei, O.Iosco. Durabilidad de Mezclas Asfáltica Preparadas con Ligante Modificados con Polímeros. Comisión de Investigaciones Científicas. Lemit. Buenos Aires, Argentina.

2.4.3. Principales modificadores utilizados en el asfalto.

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

Estireno butadieno – estireno (SBS).

Estireno butadieno – látex.

Etil – vinil – acetato (EVA).

Hule molido de neumáticos.

2.4.4. Importancia de las mezclas modificadas con polímeros.

Está comprobado que los asfaltos convencionales poseen propiedades muy satisfactorias bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito.

Sin embargo en la actualidad existen situaciones como grandes e intensos volúmenes de tráfico vehicular y excesos de carga, lo que origina un incremento en la presión de inflado de las llantas y por consiguiente ocasiona el deterioro en el pavimento, poca durabilidad, deformaciones y otros, por lo tanto no satisfacen las expectativas de cumplir su vida útil.

En asfaltos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas. Una solución evidente fue mejorar las características de los asfaltos para mejorar su comportamiento en los pavimentos, de ahí se originan los nuevos asfaltos que fueron denominados “Asfaltos Modificados”.

2.4.5. Propiedades del asfalto modificado.

Las principales propiedades físicas y geológicas que se obtienen al modificar un asfalto son las siguientes:

Aumento de viscosidad, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero.

Disminución de la penetración.

Aumento del punto de inflamación.

Aumento de 1° y 2° la clasificación PG (grado de penetración) del asfalto.

Elevación de la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%.

Elevación de la resiliencia por encima de 25.

Amplio rango de temperatura en el manejo y almacenamiento.

Mayor intervalo de plasticidad.

Mayor cohesión.

Mayor resistencia a la acción del agua.

Mayor resistencia al envejecimiento ¹⁴.

2.5. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS¹⁵ .

El análisis está enfocado principalmente hacia cuatro características de la mezcla y la influencia que estas pueden tener en el comportamiento de la mezcla. Las principales características son:

2.5.1. Densidad efectiva.

Es el cociente entre la masa del árido y su volumen a una temperatura especificada. El volumen excluye los poros permeables al asfalto.

$$Dr \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PB(gr)}{VP(cm^3)}$$

Donde:

Dr = Densidad relativa de la mezcla (briquetas).

PB = Peso de la briqueta sin parafina.

PV = Volumen de la briqueta sin parafina.

¹⁴ En Línea. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos15/asfaltos-modificados/asfaltos-modificados.shtml>

2.5.2. Huecos en la mezcla o vacíos de aire (Va).

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

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

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

La fórmula para su cálculo es:

$$Vm(\%) = \frac{Dmt - Drm}{Dmt} * 100$$

Donde:

Vm = Vacíos de la mezcla compactada

Dmt = Densidad máxima teórica.

Drm = Densidad real promedio.

2.5.3. Vacíos en el agregado mineral (VAM).

Es el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total de la muestra.

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

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$VAM(\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

Donde:

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral.

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada.

CA (%) = Porcentaje de cemento asfáltico.

GCA = Peso específico del cemento asfáltico.

D_{rm} = Densidad real promedio.

2.5.4. Relación betún - vacíos (%)

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta.

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM) que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente.

$$RBV (\%) = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

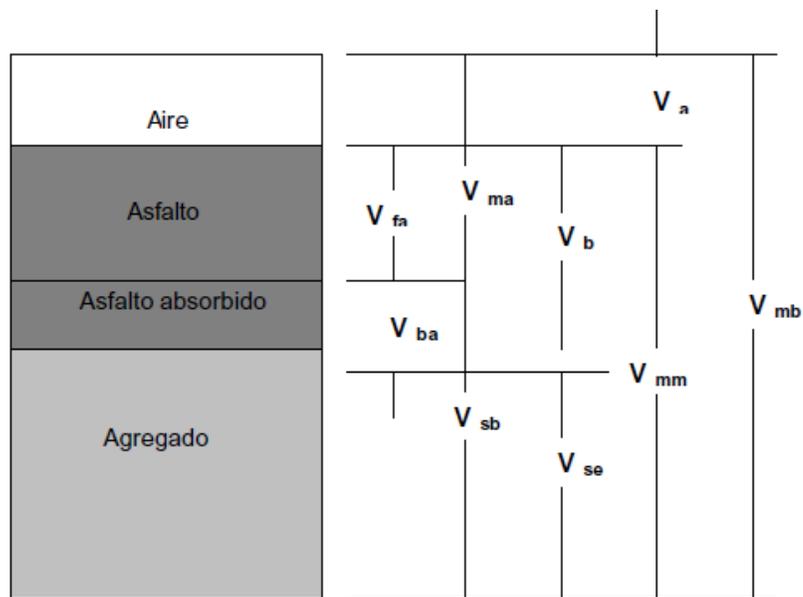
Donde:

RBV (%) = Relación betumen vacíos

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada.

Figura 2.1: Diagrama de compactación.



Fuente: Instituto de Piura. Diseño de mezclas asfálticas.

Donde:

V ma = Volumen de vacíos en agregado mineral

V mb = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V mm = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos

V_{fa} = 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)

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (V_a), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (RVB) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

Dependiendo de cómo se especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede ser expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que el vacío de aire, VAM y RBV son cantidades de volumen; una mezcla asfáltica, primero debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores masas, para proveer una mezcla de diseño¹⁵.

2.6. DISEÑO DE MEZCLAS POR EL METODO MARSHALL.

El Método Marshall es aplicable a mezclas en caliente de pavimentación, que usan cemento asfáltico clasificado por penetración o viscosidad que contengan áridos con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm (1 pulgada). Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de campo de mezclas asfálticas de pavimentación.

¹⁵ UNIVERSIDAD DE PIURA. (Citado 10 agosto, 2017). Diseño de mezclas asfálticas. Lima: La En línea Disponible en: http://www.biblioteca.upeu.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

2.6.1. Descripción del método de Marshall.

El Método Marshall debe cumplirse como se encuentra especificado en la Norma AASTHO T245 o ASTM D 1559 del “Manual de ensayos de suelos y materiales asfalto; Volumen 4”

2.6.2. Procedimiento resumido del ensayo Marshall.

Existen tres procedimientos en el método de ensayo de Marshall. Estos son: Determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas.

Determinación del peso específico total: El peso específico total de cada probeta es determinado tan pronto las briquetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de la densidad-vacíos. Se usa el procedimiento de la norma AASHTO T166.

Ensayo de estabilidad y fluencia: El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la consistencia a la deformación de la mezcla.

- 1) Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60° (140°F). Esta temperatura presenta, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- 2) La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un aparato que aplica carga constante sobre la briketa y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- 3) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51mm (2 pulgadas) por minuto hasta que falle. La falla esta definida como la carga máxima que la briketa puede resistir.
- 4) La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

Valor de estabilidad Marshall: El valor de estabilidad es una medida de la carga bajo la cual una briqueta cede o falla totalmente. Durante un ensayo cuando la carga es aplicada lentamente, el cabezal superior se acerca al cabezal inferior lentamente y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador. Luego se suspende la aplicación de la carga una vez que la briqueta falle después de haber registrado la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de la estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto es mucho mejor.

Figura 2.2: Medidor de estabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Valor de fluencia Marshall: La fluencia es medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad Marshall son considerados demasiado frágiles y rígidos para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo cargas del tránsito.

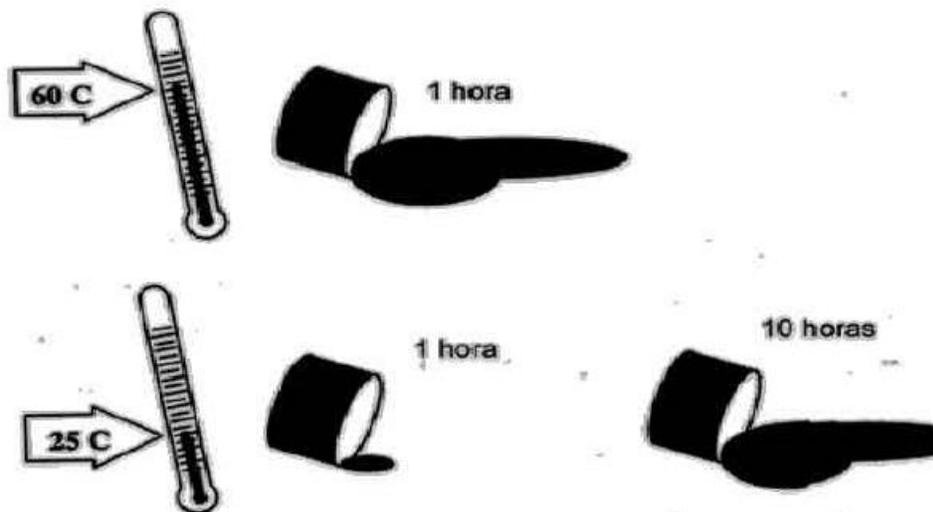
2.7. SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.

2.7.1. Definición.

La susceptibilidad térmica se define como el cambio de la consistencia con un cambio en la temperatura. La susceptibilidad a la temperatura es una de las propiedades más importantes en el uso de los cementos asfálticos. Esta propiedad nos permite modificar la consistencia, y por lo tanto la trabajabilidad del asfalto para el mezclado con los agregados, luego para la compactación y por último para la vida de servicio de la mezcla.

Un cambio de la temperatura en el caso del asfalto viene a ser la variación de sus propiedades al ser sometido a determinadas temperaturas. El cemento asfáltico es un material termoplástico, cuya consistencia cambia con la temperatura, la magnitud y la duración de la carga; es una propiedad inherente a todo cemento asfáltico, que se debe manejar y aprovechar al máximo. La figura 2.3 interpreta esta característica del asfalto cuando es sometido a diferentes temperaturas. Se requiere dos medidas de la viscosidad como mínimo, para poder establecer la susceptibilidad térmica de un asfalto.

Figura 2.3: Efecto de la susceptibilidad térmica del asfalto.



Fuente: elaboración propia.

Los cementos asfálticos con un alto grado de susceptibilidad térmica no son deseables, ya que su viscosidad a 135° C - muy baja puede ocasionar inconvenientes durante el proceso de mezclado y compactación. Por otro lado, a bajas temperaturas de servicio su viscosidad puede resultar muy alta y ser causante de problemas de fisuramiento por contracciones térmicas. Si un cemento asfáltico registra una viscosidad muy baja (muy fluido) a las altas temperaturas de servicio, se pueden generar ahuellamientos. Si por el contrario, el cemento asfáltico presenta altas viscosidades (muy viscosos) a bajas temperaturas de servicio, habrá fisuramientos. Lo anterior va unido a los cambios en el sistema coloidal que pudieron presentarse durante la elaboración de la mezcla en planta ¹⁶.

La susceptibilidad térmica de un cemento asfáltico se utiliza principalmente en los siguientes casos:

Determinación de las temperaturas de mezclado y compactado.

Calibración de las temperaturas de manejo en planta y en servicio.

2.7.2. Susceptibilidad en el cemento asfáltico convencional y modificado.

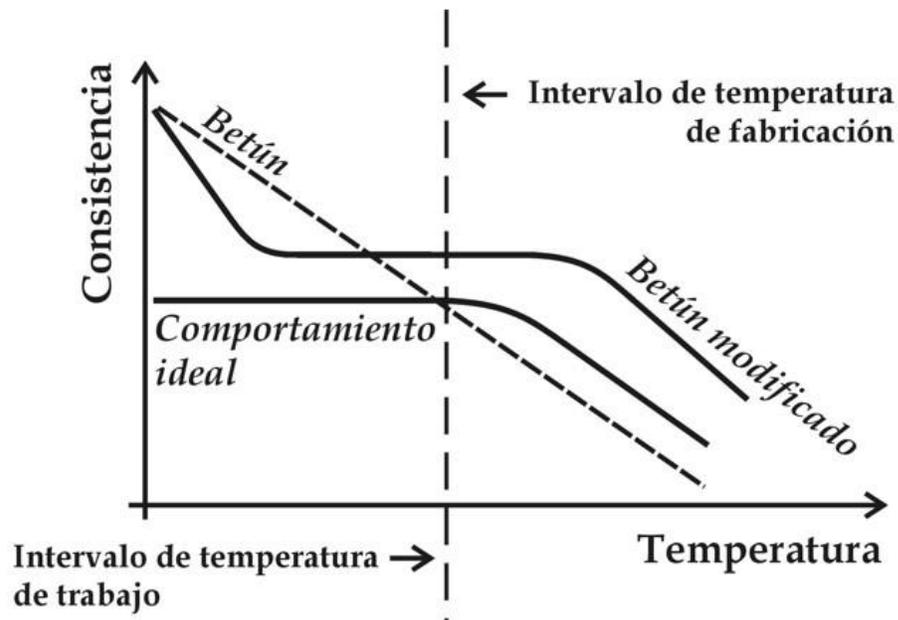
El betún convencional presenta una variación casi lineal de la consistencia con la temperatura, lo que no es bueno en el intervalo de las temperaturas de servicio: puede ser muy frágil a bajas temperaturas y no tener una consistencia adecuada en el rango de las altas temperaturas.

La curva de variación de consistencia con la temperatura de un asfalto modificado con SBS se acerca a la del asfalto ideal ya que en el intervalo de bajas temperaturas las variaciones son menores que las del asfalto convencional, presentando mejores características de flexibilidad (valores más bajos de consistencia). En el intervalo de las temperaturas de servicio, el asfalto modificado presenta una menor susceptibilidad térmica, con consistencias elevadas a altas temperaturas del camino (60-70 °C) lo que

¹⁶ HUAMÁN. N. (2010). El Estado del Arte de los Pavimentos Asfálticos. Perú: Curso TITEX URP.

asegura una buena resistencia de las mezclas a las deformaciones permanentes (ahuellamiento). Finalmente, en la zona de temperatura de mezclado en la planta asfáltica, el asfalto modificado presenta una viscosidad algo mayor que la del asfalto convencional, lo que de ninguna manera dificulta la preparación de las mezclas¹⁷.

Figura 2.4: Curva de variación de consistencia con la temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura de las mezclas asfálticas varía significativamente desde su producción en la planta hasta la conformación de la estructura de pavimento, especialmente en el proceso de compactación. Estas diferencias de temperatura de la mezcla de un punto a otro, generan segregación, micro fisuras, superficies onduladas, desgarramientos y especialmente cambios en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla.

¹⁷ ASPHALT INSTITUTE MS-22. Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.8. NORMATIVA A UTILIZAR EN EL PROYECTO DE EXPERIMENTACION.

Los ensayos de caracterización se realizaran según corresponde en el “Manual de ensayos de suelos y materiales – asfalto. Volumen 4”

Para los agregados:

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422; AASHTO T-88)

Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM D-127).

Determinación del peso específico y absorción del agregado fino (ASTM D-128).

Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM C-131; AASHTO T96-99).

Método para determinar equivalente de arena (ASTM D-2419).

Para el Cemento asfáltico convencional:

Método de ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49 - 97).

Método para determinar el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96).

Método para determinar el punto de ablandamiento mediante el aparato de anillo y bola (ASTM D-36; AASHTO T53-96).

Método para determinar el peso específico (AASHTO T-228)

Método para determinar la ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00).

Método para determinar la viscosidad a diferentes temperaturas desde 80 a 190°C (ASTM D-244).

Para el cemento asfáltico modificado: Realizamos los mismos ensayos del cemento asfáltico convencional más dos ensayos de gran importancia para el cemento modificado.

Recuperación Elástica (ASTM D 6084-06; AASHTO T301-99).

Índice de Penetración (UNE 104-285).

CAPITULO III

PREPARACION DE MATERIALES PARA LA INVESTIGACION

3.1. Componentes.

3.1.1. Unidad de estudio o muestreo

Susceptibilidad térmica del asfalto y mezclas asfálticas.

3.1.2. Población.

La población será las propiedades mecánicas de una mezcla con cemento asfáltico convencional y propiedades mecánicas de una mezcla con cemento asfáltico modificado con sus respectivas temperaturas.

3.1.3. Muestra.

La muestra es extraída de la población y en esta investigación es la resistencia a las deformaciones plásticas que son: Estabilidad y fluencia.

3.1.4. Muestreo.

La muestra se traerá de:

El cemento Asfáltico convencional se consiguió de la posta municipal del departamento de Tarija.

El cemento asfáltico modificado que se consiguió de SEDECA.

Se realizara mediciones de temperaturas:

En el momento de realizar la compactación en un rango de 80 a 190°C.

En el ensayo de viscosidad en un rango de 80 a 150°C.

3.2. METODOS Y TECNICAS EMPLEADAS.

Para realizar el presente trabajo de investigación se utilizara el método para determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas utilizando el aparato de Marshall, que es una maquina básica de compresión y ensayo de estabilidad del asfalto. Mide la estabilidad y el flujo de las mezclas de pavimentos bituminosos.

Se realizara mezclas asfálticas a diferentes temperaturas de compactación en un rango desde (80 – 190°C) con cemento asfáltico convencional (85 – 100) y cemento asfáltico modificado SBS (60 – 85) y con las mismas temperaturas se realizara el ensayo de viscosidad para obtener los valores de la susceptibilidad térmica y analizar el comportamiento de la curva, luego se comparara con las curvas de las variables dependientes y se lograra verificar si tienen la misma tendencia entre el asfalto y las mezclas asfálticas.

3.3. INSTRUMENTOS PARA REALIZAR LA CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES.

Es muy importante la caracterización de los materiales con los que se realizara el trabajo de investigación para terminar si estos se encuentran en los rangos establecidos para cada ensayo a realizar.

AGREGADOS.- Los ensayos que se realizaran para caracterizar los agregados serán:

Granulometría (ASTM E-40 AASHTO T27-99).

Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM E-127 AASHTO T85-91).

Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM E-128 AASHTO T84-00).

Resistencia al desgaste por abrasión del agregado grueso mediante la máquina de los ángeles (ASTM C-131 AASHTO T96-99).

Equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00).

Ensayo de Granulometría.- Para el ensayo de la granulometría se necesitara un juego de tamices 1” , ¾ ”, 1/2”, 3/4”, N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200.

Peso específico y absorción del agregado.- Para el ensayo de peso específico se necesitara un cesto, dos varillas, balanza de precisión y también se utilizara la guía de laboratorio para su desarrollo.

Ensayo de Resistencia al desgaste por abrasión.- Para la realización de este ensayo se necesitara un tambor y esferas de hierro.

CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL (85-100).- Los ensayos que se realizaran para caracterizar el asfalto convencional serán:

Penetración (ASTM D 5; AASHTO T49-97).

Punto de inflamación (ASTM D1310-01).

Punto de ablandamiento (ASTM D-36; AASHTO T53-96).

Peso específico (ASTM D-70; AASHTO T228-93)

Ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00).

Viscosidad (ASTM D-244).

Ensayo de penetración.- Para este ensayo de usará un penetrómetro para determinar la penetración del asfalto.

Ensayo de inflamación.- Se necesitara una copa abierta de Cleveland para determinar el punto de inflamación.

Punto de ablandamiento.- Se utilizara el aparato de anillo y bola para determinar el punto de ablandamiento.

Ductilidad.- Se utilizara el ductilímetro.

Viscosidad.- Se utilizara el viscosímetro.

CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO SBS (60-85).- Los ensayos que se realizaran para caracterizar el asfalto modificado serán:

Penetración (ASTM D 5; AASHTO T49-97).

Punto de inflamación (ASTM D1310-01).

Punto de ablandamiento (ASTM D-36; AASHTO T53-96).

Peso específico (ASTM D-70; AASHTO T228-93)

Ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00).

Viscosidad (ASTM D-244).

Recuperación Elástica (ASTM D 6084-06; AASHTO T301-99).

Recuperación Elástica.- Se utilizara Materiales, moldes, desmoldante, baño de agua, termómetro, ductilímetro, regla.

3.4. INSTRUMENTOS PARA REALIZAR EL TRABAJO DE INVESTIGACION.

Se utilizara el aparato de Marshall para realizar el método de resistencia a la deformación de mezclas asfálticas, corresponde los siguientes equipos.

Prensa Marshall.

Moldes de compactación.

Martillo de compactación.

Extractor.

Termómetro de vidrio.

Horno

Baño de agua.

Fuentes grandes y pequeñas.

Cocina a gas.

Espátula.

Agregados pétreos.

Cemento convencional y modificado con SBS.

3.5. SELECCIÓN DE MATERIAL.

Los materiales que se utilizaron para el presente proyecto son los siguientes:

3.5.1. Agregados.

Los agregados a utilizar para las mezclas asfálticas en caliente son de la Chancadora de Charaja que pertenece al Servicio Departamental De Caminos (SEDECA), ubicada en la provincia Avilés Municipio Uriondo aproximadamente a 41 km de la ciudad de Tarija.

Figura N° 3.1 Mapa político de Tarija



Fuente: Elaboración propia

3.6. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS ASFALTOS.

Para la presente investigación se utilizara dos tipos de cemento asfaltico:

Cemento asfaltico convencional de procedencia BETUNEL 85-100 (Brasil).

Cemento asfaltico modificado de procedencia STRATURA ASFALTOS (Brasil)

BETUFLEX 60-85.

Tabla N° 3.1: Especificaciones técnicas del cemento asfaltico BETUNEL.

Certificado de calidad del producto BETUNEL (85/100)				
Características del producto				
Especificaciones técnicas formularioc-1 (llenado por la entidad)-ensayos de verificación de calidad del material solicitado (ensayos AASHTO)	Limites	Método	Produc-tibilidad	Encon-tradas
Penetración a 25°C,100 GR. 0,1mm (T-201)	85 a 100	NBR-8576 ; ASTM D5; AASHTO T201	± 4 dmm	91
Viscosidad Saybolt Furoi 135°C seg. (T-72)	85 seg	NBR-14950 ; ASTM D88; AASHTO T72	± 2 %	120
Ensayo de la mancha @ 20% Xilol (T-102)	Negativo	ASTM D2170; AASHTO T102	ND	Negativo
Punto de ablandamiento °C (T-53)	43 a 46	NBR-6560; ASTM D36; AASHTO T53	± 3°C	45
Ductilidad a 25°C 5 cm/min, cm (T-51)	100 min	NBR-6293; ASTM D113; AASHTO T51	consultar NBR	>100
Viscosidad de Brookfield a 135°C, Cp	214 min	NBR-15184 ; ASTM D4402; AASHTO T318	ND	290
Viscosidad de Brookfield a 150°C, Cp	97 min	NBR-15184; ASTM D4402; AASHTO T318	ND	152
Viscosidad de Brookfield a 177°C, Cp	28 a 114	NBR-15184; ASTM D4402; AASHTO T318	ND	58
Temperatura de mistura, °C	Indicativo	Calculo	ND	141 a 147
Temperatura de compactación, °C	Indicativo	Calculo	ND	130 a 136
Índice de Penetración de Pleifler	(-)1,5 a 0,5	Calculo	ND	-1,1
Punto de inflamación C.O.C. °C (T-48)	230 min	NBR-11341; ASTM D92; AASHTO T48	± 18°C	> 235
Solubilidad en Tricloroatileno (T-44)	99 min	NBR-14855; ASTM D2042; AASHTO T44	± 0,26 %	99,9
Densidad a 25°C c/25 °C (T-228)	0,99 min	NBR-6292; AASHTO T228	± 0,005	1,012

Ensayos sobre el residuo película delgada (TFOT), 32 mm,163°C (AASHTO T240)				
(R)TFOT - Pérdida de masa (T-240)	1 max	NBR-15235; ASTM D2872; AASHTO T240	consultar NBR	0,41
(R)TFOT - Penetración del Residuo,% de la penetración original	50 min.	Calculo	ND	55
(R)TFOT-Perdida por Calentamiento (T-179)%	1 max.	Calculo; AASHTO T-179	± 4 dmm	0,42
Densidad a 25°C c/25 °C (T-228)	1 a 1,05	NBR-6296; AASHTO T228	± 0,005	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla N°3.2: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico BETUFLEX.

Certificado de calidad del cemento BETUFLEX (60/85)				
Características del producto				
Ensayo	Norma AASHTO; ASTM	Unidad	Especificación	Resultado
Penetración muestra original (100 g, 5 seg, 25°C)	T-49; D-5	0,1 mm	40 - 70	51
Punto de reblandecimiento A&B anillo bola	T-53; D-36	°C	60 min	68
Fuerza ductilidad	UNE 13589	°C	≥ 2 a 5	3,1
Viscosidad rotacional Brookfield 135°C	T-72 ; D-88	cP	3000 max	1502
Viscosidad rotacional Brookfield 155°C			2000 max	881
Viscosidad rotacional Brookfield 177°C			1000 max	307
Recuperación elástica 25°C, 20cm	T-301; D-6084	%	85 min	90
Punto de inflamación - Copa abierta de Cleveland	T-48; D-92	°C	235 min	> 235
Estabilidad de almacenamiento		°C	5	1,0
		0,01 mm	9	3,0
Punto de fragilidad frass	IP 80-53	°C	≤ 12	-13,4
Ensayo del residuo (RTFOT)				
Ensayo de película delgada rotatoria (variación de masa) 163°C, 85 min, PE.cal (% masa)	T-240; D-2872	%	1,0 max	-0,123
Porcentaje de penetración original (100g, 5 seg, 25 °C, ret del original	T-49; D-5	%	60 min	74

Recuperación elástica 25°C, 20cm	T-3041; D-6084	%	80 min	95,30
Reducción del punto de reblandecimiento A&B anillo bola	T-53 ; D-36	°C	5 max	0
Aumento Punto de reblandecimiento A&B anillo bola	T-53 ; D-36	°C	2 max	1,70

Fuente: elaboración propia.

3.7. CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS.

3.7.1. Granulometría de los agregados (ASTM E-40; AASHTO T27-99).

- **Granulometría de la Grava, gravilla y arena.**

Tabla N° 3.3: Granulometría de la grava, gravilla y arena.

Peso total (gr.)		5000		
Tamices	tamaño (mm)	% que pasa del total (GRAVA)	% que pasa del total (GRAVILLA)	% que pasa del total (ARENA)
1"	25,40	100,00	100,00	-
3/4"	19,00	93,45	100,00	-
1/2"	12,50	24,08	99,87	100,00
3/8"	9,50	5,93	99,03	100,00
N°4	4,75	0,02	23,65	99,44
N°8	2,36	0,02	1,13	80,24
N°16	1,18	0,02	0,75	59,88
N°30	0,60	0,02	0,73	39,72
N°50	0,30	0,02	0,70	21,52
N°100	0,15	0,02	0,63	10,64
N°200	0,075	0,02	0,38	5,12
BASE	-	0,02	0,02	0,01

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2. Mezcla de agregados.

La mezcla de los agregados estará compuesta por el 30 % de agregado grueso de 3/4", 20 % de gravilla de 3/8" y 50 % de agregado fino para la granulometría de la mezcla.

En la siguiente tabla se presenta los pesos retenidos en el tamiz de los agregados grueso y fino.

Tabla N° 3.4: Planilla de granulometría proyectada.

Tamices		Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL			
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0,30	al 0,20	al 0,50	Peso Ret. 1,00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
pulg	(mm)										
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	327,39	0,00	0,00	98,22	0,00	0,00	98,22	98,22	1,96	98,04
1/2"	12,50	3468,70	6,70	0,00	1040,61	1,34	0,00	1041,95	1140,17	22,81	77,19
3/8"	9,50	907,40	41,60	0,00	272,22	8,32	0,00	280,54	1420,71	28,42	71,58
N°4	4,75	295,70	3769,10	28,20	88,71	753,82	14,10	856,63	2277,34	45,55	54,45
N°8	2,36	0,00	1126,10	959,90	0,00	225,22	479,95	705,17	2982,51	59,66	40,34
N°16	1,18	0,00	19,10	1018,10	0,00	3,82	509,05	512,87	3495,38	69,92	30,08
N°30	0,60	0,00	0,80	1007,90	0,00	0,16	503,95	504,11	3999,49	80,00	20,00
N°50	0,30	0,00	1,40	909,80	0,00	0,28	454,90	455,18	4454,67	89,11	10,89
N°100	0,15	0,00	3,90	543,90	0,00	0,78	271,95	272,73	4727,40	94,56	5,44
N°200	0,075	0,00	12,40	276,20	0,00	2,48	138,10	140,58	4867,98	97,37	2,63
BASE	-	0,00	18,10	255,30	0,00	3,62	127,65	131,27	4999,25	100,00	0,00
SUMA		4999,20	4999,20	4999,30	1499,76	999,84	2499,65	4999,20			
PÉRDIDAS		0,80	0,80	0,70							

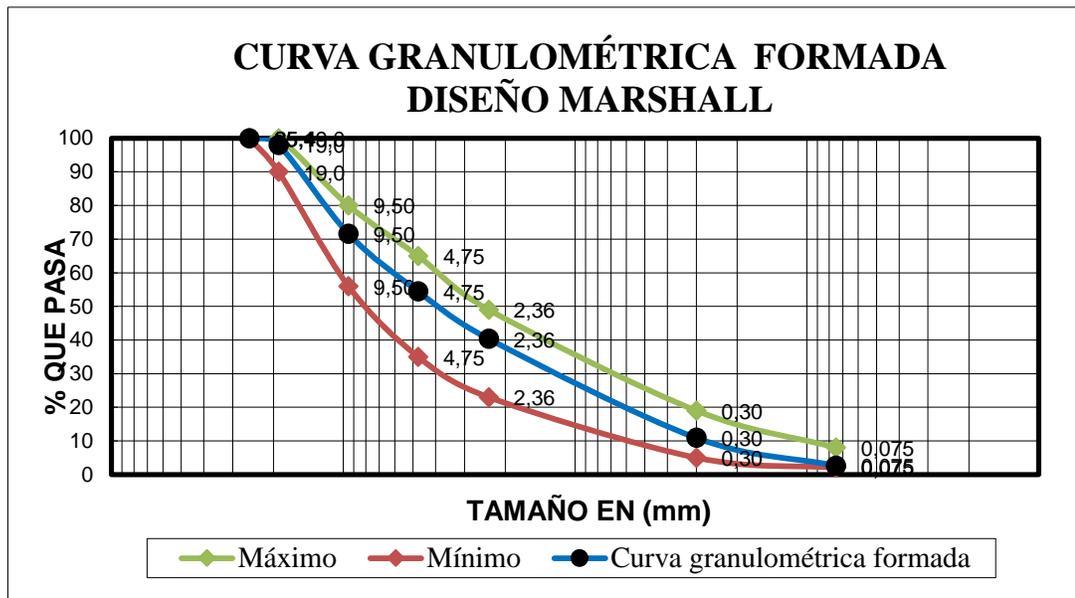
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.5: Especificaciones de la granulometría proyectada

Tamices		Especificaciones ASTM D3515	
pulg	(mm)	Mínimo	Máximo
1"	25,40	100,00	100,00
3/4"	19,00	90,00	100,00
1/2"	12,50	-	-
3/8"	9,50	56,00	80,00
N°4	4,75	35,00	65,00
N°8	2,36	23,00	49,00
N°16	1,18	-	-
N°30	0,60	-	-
N°50	0,30	5,00	19,00
N°100	0,15	-	-
N°200	0,08	2,00	8,00
BASE	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 3.1: Curva granulométrica formada



Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Resultados de caracterización de los agregados pétreos.

Tabla N° 3.6: Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados.

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	NORMA
Equivalente de arena	(%)	76,59	> 50%	ASTM D 2419 AASHTO T176-00
Peso específico del agregado grueso (grava)	(gr/cm ³)	2,74	-	ASTM D-127 AASHTO T85-91
Peso específico y del agregado grueso (gravilla)	(gr/cm ³)	2,71	-	ASTM D-127 AASHTO T85-91
Peso específico y del agregado fino	(gr/cm ³)	2,68	-	ASTM D-128 AASHTO T84-00
Máquina de los ángeles (grava)	(%)	23,25%	35% MAX	ASTM C-131 AASHTO T96-99
Máquina de los ángeles (gravilla)	(%)	24,33%	35% MAX	ASTM C-131 AASHTO T96-99

Fuente: Elaboración propia.

3.8. CARACTERIZACION DEL CEMENTO ASFALTICO CONVECCIONAL Y CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO.

El cemento asfaltico convencional es de procedencia BETUNEL 85-100 (Brasil).

El cemento asfaltico modificado es de procedencia STRATURA ASFALTOS (Brasil)

BETUFLEX 60-85

**3.8.1. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico convencional
85-100.**

Tabla N° 3.7: Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico convencional.

ENSAYO	UNID	ENSAY 1	ENSAY 2	ENSAY 3	PROMEDIO	ESPECIFIC	
						Mín	Máx
Peso Picnómetro	gr.	35,02	33,97	37,01			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr.	84,70	85,49	88,39			
Peso Picnómetro + Muestra	gr.	64,05	63,00	62,80			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr.	87,20	88,30	86,35			
Peso Específico	gr./cm ³	1,091	1,104	0,924	1,040	1,00	1,05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>275,00	>288,00	>278,00	280,00	>232,00	-
Ensayo de la mancha					No se realizo	NEGAT	
Solvente gasolina standart					No se realizo	NEGAT	
Solvente gasolina-xilol, % xilol					No se realizo	NEGAT	
Solvente heptano-xilol, % xilol					No se realizo	NEGAT	
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.					No se realizo		
Pérdida en masa	%				No se realizo		
Penetración del residuo, penetración original	%				No se realizo		
Índice de susceptibilidad térmica					No se realizo		
Punto de ablandamiento	°C	46,50	45,50	45,00	46,00	41,00	53,00
Destilación, Residuo	%				No se realizo		
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	118,00	109,00	116,00	114,00	>100,00	
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	91,00	85,00	79,00			
	Lectura N°2	88,00	85,00	83,00			
	Lectura N°3	87,00	92,00	89,00			
	Promedio	mm.	89,00	87,00	84,00	87,00	85,00
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	s				No se realizo	85,00	-

Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico modificado con SBS 60-85.

Tabla N° 3.8: Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico modificado.

ENSAYO	UNID	ENSAY 1	ENSAY 2	ENSAY 3	PROMEDIO	ESPECIFIC.	
						Mín.	Máx.
Peso Picnómetro	gr.	36,80	35,10	33,70			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr.	89,30	84,90	85,10			
Peso Picnómetro + Muestra	gr.	64,50	61,90	61,80			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr.	88,30	89,75	86,78			
Peso Específico	gr./cm ³	0,962	1,217	1,060	1,080	1,00	1,10
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>240,00	>256,00	>233,00	243,00	>235,00	-
Ensayo de la mancha					No se realizo	NEGAT	
Solvente gasolina standart					No se realizo	NEGAT	
Solvente gasolina-xilol, % xilol					No se realizo	NEGAT	
Solvente heptano-xilol, % xilol					No se realizo	NEGAT	
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.					No se realizo		
Pérdida en masa	%				No se realizo		
Penetración del residuo, penetración original	%				No se realizo		
Índice de susceptibilidad térmica					No se realizo		
Punto de ablandamiento	°C	70,00	68,00	69,00	69,00	>60,00	-
Recuperación elástica	%	18,50	19,50	19,00	95,00	>85,00	-
Destilación, Residuo	%				No se realizo		
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	150,00	145,00	140,00	145,00	>75,00	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	50,00	49,00	49,00			
	Lectura N°2	49,00	49,00	50,00			
	Lectura N°3	50,00	50,00	50,00			
	Promedio	mm.	50,00	49,00	50,00	50,00	40,00
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	s				No se realizo	85,00	-

Fuente: Elaboración propia.

3.9. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO.

Para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico se realizara 15 briquetas para cada cemento mediante el método Marshall con diferentes porcentajes de cemento asfáltico para determinar el contenido óptimo a utilizar.

Los porcentajes de asfalto que se utilizaran en la elaboración de las briquetas son los siguientes: 4,5 %; 5 %; 5,5 %; 6 %; 6,5 %. Se hará 3 briquetas para cada porcentaje.

Tabla N° 3.9: Dosificación con el cemento asfáltico.

Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	4,50 %	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso de Cemento Asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40
Peso de Arena (gr)	573,00	570,00	567,00	564,00	561,00
Peso de Filler(suelo) (gr)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso total de la briketa (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la misma dosificación para el cemento asfáltico convencional y cemento asfáltico modificado con SBS.

3.10. DESARROLLO DE LAS BRIQUETAS

Equipo:

Bandejas metálicas.

Balanza A \pm 0,1 gr.

Espátula.

Termómetro de 360°C.

Agregados (grava, gravilla y arena).

Cemento asfáltico convencional y modificado.

Cocina a gas.

Martillo de compactación.

Moldes para las probetas.

Extractor de probetas.

Procedimiento:

Antes de preparar la mezcla se debe limpiar y calentar los moldes a una temperatura aproximada de 100 a 150° C. también se debe pesar en una fuente los agregados de acuerdo a la dosificación indicada en la tabla 4.3 y calentar en la cocina de gas. Por otro lado se debe calentar el asfalto a una temperatura de 120 a 140°C.

Se coloca la bandeja de los agregados en la balanza y se vierte sobre ellos el cemento asfáltico caliente de acuerdo al peso establecido en la anterior tabla.

Se lleva nuevamente la fuente con los agregados + cemento a la hornalla y mezclar bien hasta tener una mezcla homogénea a una temperatura de 140°C.

Figura N° 3.4 Mezcla de los agregado más el cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia

Vaciar la mezcla al molde previamente calentado, se fija sobre la superficie de la mezcla un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre un disco. Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes para cada cara de la briqueta en la compactación proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 3 briquetas por cada porcentaje de cemento asfáltico haciendo un total de 15 briquetas.

Figura N° 3.5 Muestra compactada en ambas caras.



Fuente: Elaboración propia.

El molde conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura N° 3.6 Extracción de briqueta con un gato hidráulico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3.7 Briquetas desmoldadas.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizadas las briquetas se llevaron estas a la prensa Marshall para determinar: peso específico total, análisis de la densidad, contenido de vacíos, medición de la estabilidad y fluencia.

Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta forma determinar su altura media. Posteriormente pesar las briquetas (peso seco), luego colocar las briquetas en agua a 25°C por 5 minutos y pesar después de ser saturadas, también se debe determinar el peso sumergido.

Por último se debe sumergir las briquetas en baño de agua a 60° C durante un tiempo no inferior de 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero. Se procede a colocar la briqueta en las mordazas y aplica la carga hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida y el número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60° C se anota como el valor de estabilidad.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad se mantiene el medidor de deformación (fluencia) 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 fluencia de la briqueta.

Figura N° 3.8 Briquetas en prensa Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3.9 Briquetas después de pasar por la prensa Marshall.



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.

4.1. VISCOSIDAD (MEDICION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA).

La viscosidad se medirá en un rango de 80 a 150° C, las diferentes temperaturas irán variando de 10 en 10°C.

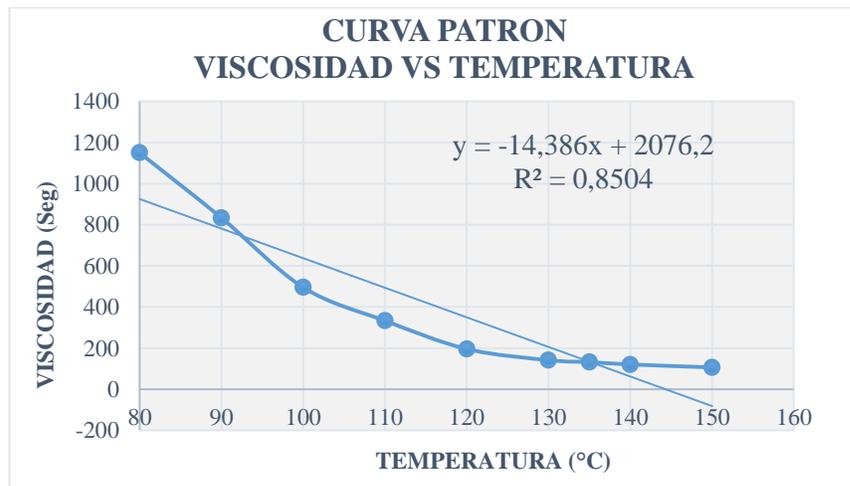
4.1.1 Viscosidad del cemento convencional 85-100.

Tabla N° 4.1: Viscosidad del cemento convencional.

Temperatura (°C)	Viscosidad Saybolt Furol (Seg.)	Viscosidad (min)
80	1150,19	19:17
90	833,78	13:90
100	495,59	8:26
110	333,10	5:55
120	195,84	3:26
130	141,36	2:36
135	132,00	2:20
140	120,45	2:00
150	106,00	1:78

Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 4.1: Curva patrón viscosidad VS temperatura del cemento convencional.



Fuente: Elaboración propia

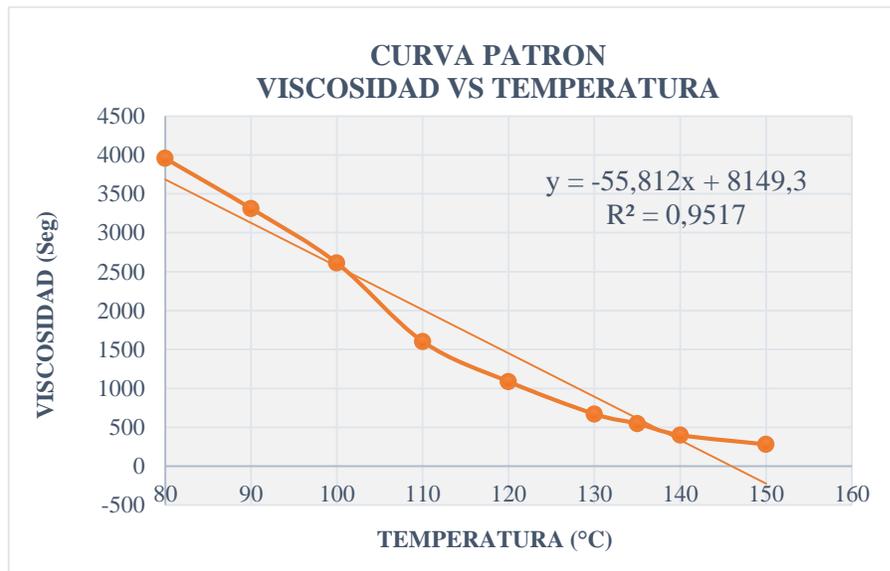
4.1.2. Viscosidad del cemento modificado con polímero SBS 60-85.

Tabla N° 4.2: Viscosidad del cemento modificado.

Temperatura (°C)	Viscosidad Saybolt Furol (Seg.)	Viscosidad (min)
80	3954,53	65:91
90	3310,80	55:18
100	2610,35	43:51
110	1602,19	26:70
120	1086,00	18:10
130	670,72	11:18
135	547,19	9:11
140	399,64	6:66
150	280,00	4:67

Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 4.2: Curva patrón viscosidad VS temperatura del cemento modificado.



Fuente: Elaboración propia

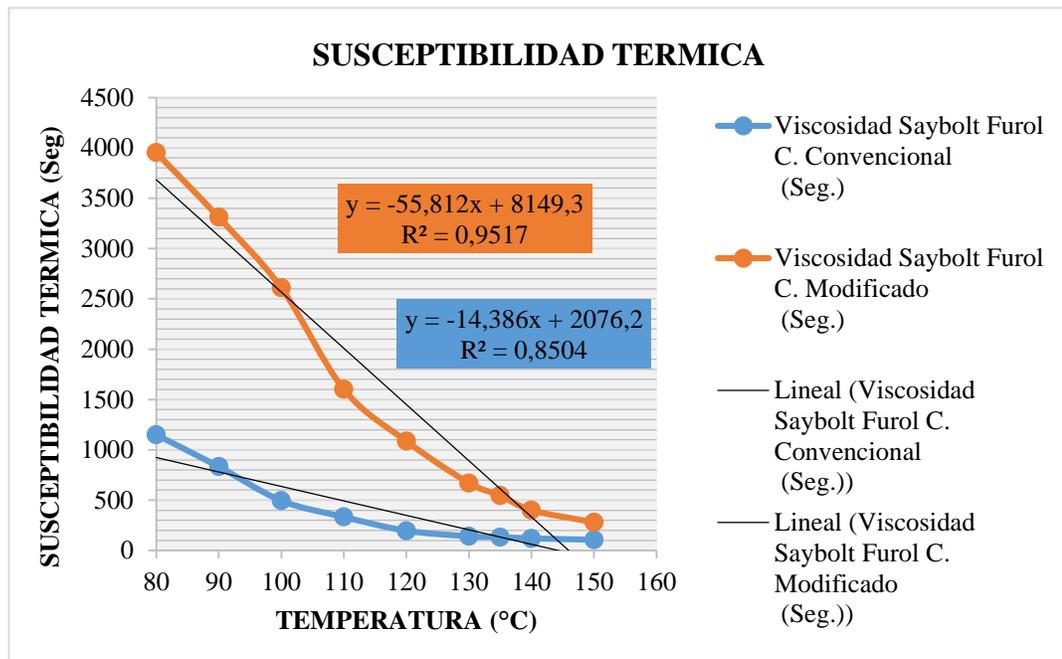
4.1.3 Análisis de comparación de la viscosidad con asfalto convencional y asfalto modificado.

Tabla N° 4.3: Tabla comparativa de viscosidad.

Temperatura (°C)	Viscosidad Saybolt Furol C. Convencional (Seg.)	Viscosidad Saybolt Furol C. Modificado (Seg.)
80	1150,19	3954,53
90	833,78	3310,80
100	495,59	2610,35
110	333,10	1602,19
120	195,84	1086,00
130	141,36	670,72
135	132,00	547,19
140	120,45	399,64
150	106,00	280,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 4.3: Curva comparativa de la susceptibilidad térmica.



Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica comparativa de viscosidad se puede ver que el asfalto modificado tiene mayor viscosidad que el asfalto convencional. A los 80°C el asfalto modificado tiene un valor de 3954,53 seg y el convencional tiene un valor de 1150,19 seg.

La viscosidad disminuye con respecto a la temperatura de forma descendente es decir que a mayor temperatura menor será la viscosidad.

De acuerdo a la gráfica podemos afirmar que la mezcla asfáltica a partir del cemento asfáltico cuanto más es la temperatura de la mezcla tiene una menor viscosidad, por lo que es importante que la mezcla sea colocada en temperatura exigidas por las especificaciones para que la viscosidad garantice una deformación sin rompimiento. Asimismo la gráfica nos muestra que el comportamiento del asfalto modificado en cuanto a la viscosidad es mejor comparado con el asfalto convencional, eso nos permite concluir que en proyectos de mezclas asfálticas si las condiciones económicas lo permite debe elegirse el asfalto modificado, para asegurar un mejor comportamiento de la deformación de la mezcla por su viscosidad alta.

4.2. ANALISIS DE RESULTADOS.

4.2.1. Diseño de la mezcla de trabajo con cemento asfáltico convencional 85-100.

4.2.1.1. Determinación del contenido óptimo.

Tabla N° 4.4 Diseño Marshall de mezcla



UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA) DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS METODO MARSHALL	
MUESTRA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 85/100	
MEZCLA EN CALIENTE	
PROCEDENCIA DEL AGREGADO: PLANTA DE CHARAJAS (SEDECA)	FECHA: MAYO DE 2019

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado	
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	50,00	
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,68	50,00	
Peso Específico Total	2,70	100,00	

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1,0400

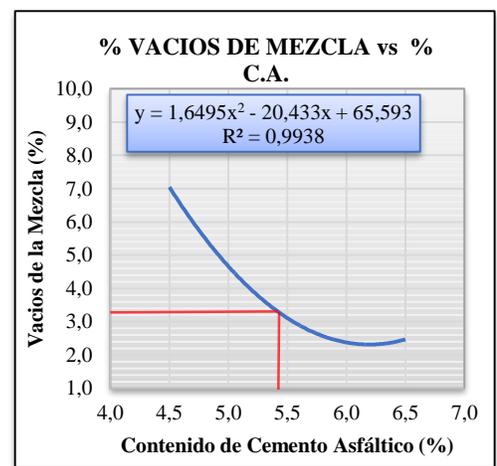
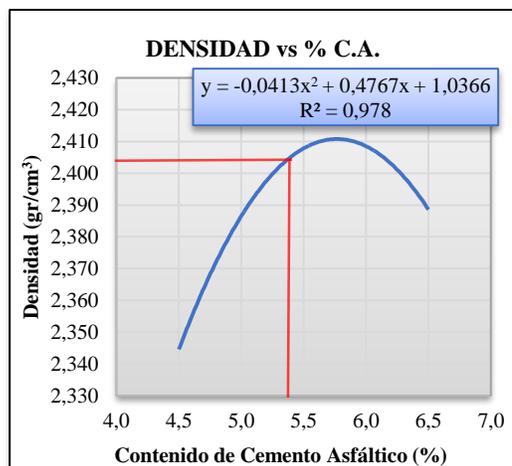
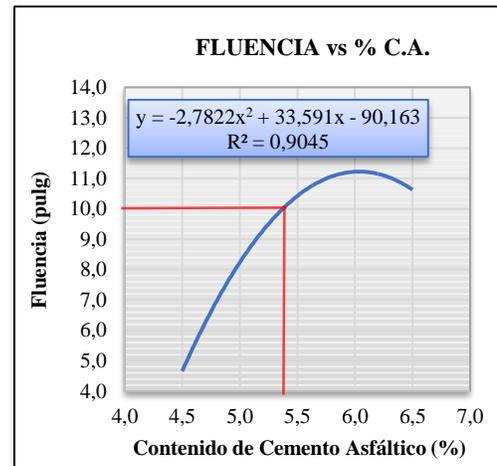
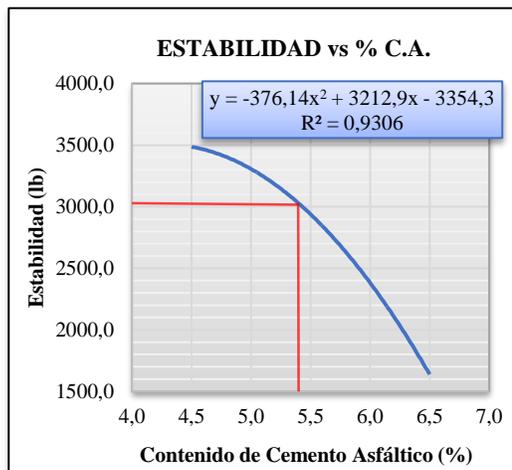
Agregad	P.E.	%
Grava	2,74	30,00
Gravilla	2,71	20,00
Arena	2,68	50,00
Filler	0,00	0

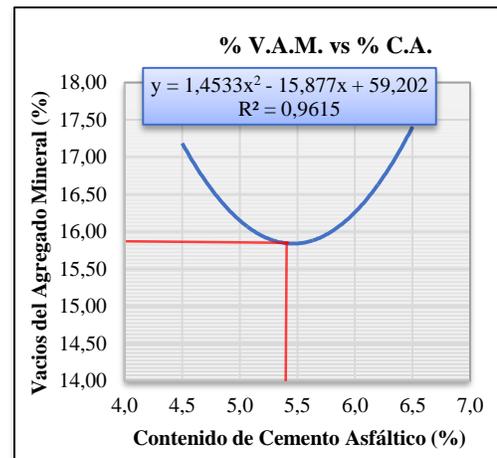
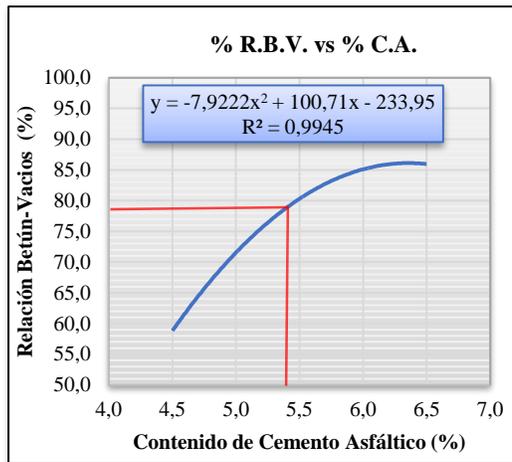
N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia					
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregados mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio			
		%	%	gr.	gr.	gr.		cc	gs/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg		
1	6.27	4,50	4,71	1179,90	1184,80	681	503,80	2,34	2,34	2,52	7,04	17,18	59,04	1429	3829,80	1,02	3910,22	3355	100	0,039	4,07			
2	6.31			1189,40	1194,30	689	505,30	2,35						1170	3132,40	1,01	3166,81		110	0,043				
3	6.28			1189,00	1193,50	685	508,50	2,34						1096	2933,10	1,02	2988,82		100	0,039				
4	5,74	5,00	5,26	1178,20	1181,30	675	506,30	2,33	2,38	2,50	4,76	16,22	70,68	1113	2978,90	1,18	3526,98	3632	240	0,0945	9,61			
5	6,17			1185,00	1188,80	701	487,80	2,43						1439	3856,70	1,05	4045,70		250	0,0984				
6	6,01			1179,60	1182,10	690	492,10	2,40						1230	3293,90	1,01	3323,57		242	0,0953				
7	6,12	5,50	5,82	1188,00	1192,10	700	492,10	2,41	2,41	2,49	2,89	15,66	81,52	939	2510,30	1,07	2673,49	2752	240	0,0945	9,84			
8	6,14			1187,40	1191,70	698	493,70	2,41						959	2564,20	1,06	2715,47		260	0,1024				
9	6,14			1185,50	1189,80	700	489,80	2,42						1012	2706,90	1,06	2866,60		250	0,0984				
10	6,16	6,00	6,38	1174,60	1178,50	692	486,50	2,41	2,40	2,47	2,57	16,44	84,34	963	2574,90	1,05	2711,42	2305	290	0,1142	10,63			
11	6,18			1179,50	1185,70	694	491,70	2,40						750	2001,40	1,05	2093,44		260	0,1024				
12	6,13			1184,00	1191,90	698	493,90	2,40						745	1987,90	1,06	2111,17		260	0,1024				
13	6,13	6,50	6,95	1178,50	1181,00	693	488,00	2,41	2,39	2,45	2,41	17,35	86,12	662	1764,40	1,06	1873,81	1707	340	0,1339	11,02			
14	6,10			1180,80	1183,90	685	498,90	2,37						610	1624,40	1,07	1739,72		230	0,0906				
15	6,18			1179,30	1181,70	688	493,70	2,39						542	1441,30	1,05	1507,58		270	0,1063				
ESPECIFICACIONES				mínimo						3,00			14,00			65,00			1500			8,00		
				máximo						5,00			-			75,00						14,00		

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3506,66	4,27
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,41	5,77
	Vacios de la mezcla (%)	2,84	6,17
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,40

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.4: Curvas método Marshall de mezcla convencional





Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.5: Resumen de propiedades de diseño Marshall.

Propiedades	Valores de grafica	Especificaciones técnicas	
		mínimas	máximas
Estabilidad (libras)	3027,12	1500,00	-
Fluencia (0,01 pulg)	10,10	8,00	14,00
Densidad (gr/cm ³)	2,41	-	-
% de Vacíos de la mezcla (%)	3,35	3,00	5,00
V.A.M. (%)	15,84	13,00	-
Rel. Betumen- Vacíos (%)	78,87	65,00	75,00

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la mezcla convencional se consideran aceptables para este tipo de mezcla ya que cumple con las especificaciones técnicas.

- La estabilidad es de 3027,12 libras por lo que consideramos que tiene una estabilidad mayor a la requerida, su comportamiento ante las cargas del pavimento serán de mayor calidad.

- La fluencia o deformación es de 10,10 centésimas de pulgadas cumple con los valores de la especificación técnica esto nos garantiza que las cargas de tráfico no ejercerán deformaciones en el pavimento.
- El % de vacíos de la mezcla es de 3,35% está dentro de lo aceptable para una mezcla convencional, eso nos asegura una buena densificación en la mezcla.
- La relación Betumen – vacíos es de 78,87 % es un valor aceptable esto nos asegura que los vacíos están ocupados por cemento asfáltico llegando a tener una buena adhesión entre las partículas del esqueleto mineral y el asfalto.

4.2.1.2. Selección de rango de temperaturas.

La Norma ASTM recomienda usar una temperatura de compactación de 140 a 150 °C, para este trabajo de investigación se hará variar diferentes temperaturas es decir que del rango recomendado por la norma se va a subir y bajar la temperatura para poder hacer un análisis de las propiedades de la mezcla y la variación que pueda existir de una temperatura a la otra. Los rangos que se seleccionara para el compactado de las briquetas con mezcla convencional son entre 80 a 190°C.

Se adopta como mínimo 80°C porque menos de esa temperatura ya no se puede obtener una mezcla para compacta debido a que el asfalto se endurece y no logra adherirse a los agregados y como máximo se adoptó 190°C porque pasando de esa temperatura el asfalto comienza a evaporarse por el sobrecalentamiento del mismo.

4.2.1.3. Elaboración de briquetas con mezcla convencional.

Después de calcular el contenido óptimo del cemento asfáltico convencional que es de 5,40 se procede a determinar los pesos de las muestras para posteriormente realizar las briquetas a diferentes temperaturas que irán variando de 10 en 10°C.

Tabla N° 4.6: Dosificación para un contenido óptimo de 5,40.

Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	5,40%
Porcentaje de Agregado (%)	94,60%
Peso de Cemento Asfáltico (gr)	64,80
Peso de Grava (gr)	340,56
Peso de Gravilla (gr)	227,04
Peso de Arena (gr)	567,60
Peso de Filler(suelo) (gr)	0,00
Peso total de la briketa (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo todos los parámetros establecidos se procede a elaborar 3 briquetas para cada temperatura de compactación que varían de 10 en 10°C empezando con una temperatura mínima de 80°C hasta los 190°C haciendo un total de 36 briquetas.

El equipo a utilizar y procedimiento para la elaboración de las briquetas es el mismo q se explicó anteriormente en el subtítulo 3.10.

4.2.1.4. Estudio experimental sobre la susceptibilidad térmica de mezclas asfálticas convencionales.

Ensayo Marshall a diferentes temperaturas.

Tabla N° 4.7: Ensayo Marshall.

	UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL DISEÑO DE MEZCLAS AFALTICAS METODO MARSHALL MUESTRA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 85/100	
	TEMPERATURA DE MEZCLADO 80 - 190 ° C	FECHA: Agosto de 2019
	PROCEDENCIA DEL AGREGADO: CHANCADORA DE CHARAJAS (SEDECA)	LABORATORISTA: ERIKA TATIANA VALDEZ VACA

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	50,00
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,68	50,00
Peso Especifico Total	2,70	100,00

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1,04

Agregad	P.E.	%
Grava	2,74	30
Gravilla	2,71	20
Arena	2,68	50
Filler	0,00	0

N° de probeta	Temperatura de compactación ° C	altura de probeta	% de Asfalto		Peso briqueta			Volum cc	Densidad briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia				
			% Óptimo Asfalto	base Agregados	seco gr.	sat. Sup. Seca gr.	sumergida en agua gr.		densidad real gr/cm³	Densidad promedio gr/cm³	Densidad máxima teórica gr/cm³	% de vacíos mezcla %	V.A.M.(vacíos agregado mineral) %	R.B.V. (relación betumen vacíos) %	% de vacíos mezcla total %	V.A.M.(vacíos agregado mineral) %	R.B.V. (relación betumen vacíos) %	lectura del dial mm	carga libras	factor de corrección de altura de probeta -	Estabilidad real corregida libras	Estabilidad promedio libras	lectura dial del flujo -	Fluencia promedio 0,01 pul
1	80	6,54	5,40	5,71	1190,10	1195,80	683	512,80	2,321	2,36	2,47	6,060	18,330	66,940	4,33	16,60	74,30	551	1466,080	0,94	1375,180	1464,66	10	9,000
2		6,29			1194,40	1196,70	697	499,70	2,390									544	1447,590	1,02	1470,750		8	
3		6,16			1195,00	1197,20	695	502,20	2,380									553	1470,150	1,05	1548,070		9	
4	90	6,41	5,40	5,71	1190,20	1195,80	685	510,80	2,330	2,33	2,47	7,690	19,790	61,150	6,34	18,44	65,78	663	1767,110	0,99	1740,600	1770,50	9	9,670
5		6,34			1183,10	1189,60	682	507,60	2,331									690	1839,810	1,00	1845,330		10	
6		6,39			1189,30	1195,40	685	510,40	2,330									654	1742,870	0,99	1725,440		10	

7		6,42			1194,80	1199,00	688	511,00	2,338			5,360	17,490	69,360				726	1936,750	0,98	1902,860		11				
8	100	6,36	5,40	5,71	1187,40	1190,50	683	507,50	2,340	2,34	2,47	5,300	17,430	69,600	5,45	17,58	69,00	685	1826,350	1,00	1821,780	1892,80	10	10,330			
9		6,30			1192,60	1197,90	686	511,90	2,330			5,700	17,830	68,030				723	1928,670	1,01	1953,750		10				
10		6,31			1186,50	1189,50	678	511,50	2,320			6,110	18,260	66,550				785	2095,630	1,01	2118,680		11				
11	110	6,11	5,40	5,71	1190,30	1194,20	679	515,20	2,310	2,34	2,47	6,480	18,630	65,200	5,28	17,43	70,20	769	2052,540	1,07	2192,110	2111,90	12	11,330			
12		6,33			1192,90	1194,10	695	499,10	2,390			3,260	15,410	78,860				755	2014,840	1,01	2024,920		11				
13		6,30			1195,30	1197,40	690	507,40	2,356			4,650	16,880	72,460				810	2162,950	1,01	2191,070		11				
14	120	6,19	5,40	5,71	1192,80	1195,30	690	505,30	2,360	2,36	2,47	4,460	16,690	73,300	4,66	16,89	72,40	795	2122,550	1,04	2213,820	2253,59	12	11,670			
15		6,20			1193,20	1194,80	687	507,80	2,350			4,890	17,120	71,440				848	2265,270	1,04	2355,880		12				
16		6,11			1186,70	1188,50	678	510,50	2,325			5,910	18,100	67,350				860	2297,590	1,07	2453,820		13				
17	130	6,29	5,40	5,71	1191,60	1192,00	685	507,00	2,350	2,35	2,47	4,870	17,060	71,460	4,97	17,16	71,15	898	2399,910	1,02	2438,310	2470,30	12	12,000			
18		6,18			1193,60	1195,00	691	504,00	2,368			4,140	16,330	74,640				901	2407,990	1,05	2518,760		11				
19		6,29			1193,80	1195,80	692	503,80	2,370			4,090	16,390	75,070				921	2461,850	1,02	2501,240		12				
20	140	6,21	5,40	5,71	1185,60	1188,20	688	500,20	2,370	2,37	2,47	4,060	16,370	75,190	4,07	16,38	75,14	938	2507,630	1,04	2600,410	2570,82	13	12,670			
21		6,24			1190,50	1194,30	692	502,30	2,370			4,070	16,370	75,160				949	2537,250	1,03	2610,830		13				
22		6,11			1184,80	1186,80	689	497,80	2,380			3,660	16,000	77,110				950	2539,940	1,07	2712,650		14				
23	150	6,14	5,40	5,71	1186,70	1188,80	689	499,80	2,374	2,38	2,47	3,890	16,230	76,010	3,82	16,16	76,36	957	2558,790	1,06	2709,760	2691,43	13	13,670			
24		6,16			1189,40	1191,00	690	501,00	2,374			3,900	16,240	75,970				942	2518,400	1,05	2651,870		14				
25		6,23			1192,60	1196,00	682	514,00	2,320			6,080	18,300	66,760				953	2548,020	1,03	2629,550		14				
26	160	6,26	5,40	5,71	1188,80	1190,70	689	501,70	2,370	2,35	2,47	4,090	16,310	74,930	4,75	16,97	72,23	990	2647,650	1,02	2711,190	2643,54	15	14,330			
27		6,26			1191,60	1193,80	691	502,80	2,370			4,070	16,290	75,000				946	2529,170	1,02	2589,870		14				
28		6,19			1186,30	1189,30	687	502,30	2,362			4,400	16,670	73,570				910	2432,230	1,04	2536,810		16				
29	170	6,11	5,40	5,71	1184,90	1186,30	685	501,30	2,364	2,36	2,47	4,330	16,590	73,920	4,40	16,66	73,60	882	2456,830	1,07	2517,090	2556,14	15	15,000			
30		6,18			1189,60	1193,00	689	504,00	2,360			4,460	16,730	73,320				935	2499,550	1,05	2614,530		14				
31		6,16			1193,50	1186,20	674	512,20	2,330			5,680	17,890	68,220				887	2370290	1,05	2495,920		14				
32	180	6,28	5,40	5,71	1183,60	1186,70	683	503,70	2,350	2,35	2,47	4,890	17,090	71,400	4,88	17,08	71,54	916	2448,380	1,02	2494,900	2465,09	17	15,330			
33		6,23			1181,70	1183,60	685	498,60	2,370			4,070	16,270	74,990				872	2329,900	1,03	2404,460		15				
34		6,14			1192,60	1195,00	684	511,00	2,334			5,530	17,660	68,660				866	2313,740	1,06	2450,250		19				
35	190	6,08	5,40	5,71	1191,50	1194,50	681	513,50	2,320	2,33	2,47	6,080	18,200	66,600	5,50	17,62	68,84	813	2171,030	1,08	2340,370	2381,31	15	17,330			
36		6,14			1188,30	1190,70	685	505,70	2,350			4,890	17,010	71,270				832	2222,190	1,06	2353,300		18				
ESPECIFICACIONES					mínimo							3,000	14,000	65,00	3,00	14,00	65,00						1500,00		8,00		
					máximo							5,00	-	75,00	5,00	-	75,00						-		14,00		

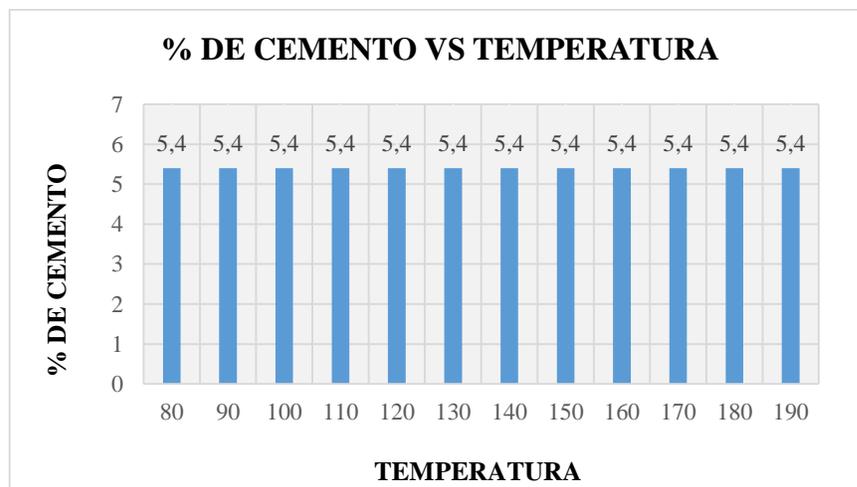
4.2.1.5. Análisis de la cantidad de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica.

Tabla N° 4.8: Porcentaje del cemento.

Temperatura °C	% Cemento asfáltico
80	5,40
90	5,40
100	5,40
110	5,40
120	5,40
130	5,40
140	5,40
150	5,40
160	5,40
170	5,40
180	5,40
190	5,40

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.5: Porcentaje del cemento.



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó el porcentaje óptimo del cemento asfáltico convencional con el ensayo Marshall en la tabla 4.4 llegando a obtener un valor de 5,40 siendo este el mismo valor para todas las temperaturas (80 a 190°C).

4.2.1.6. Estadística.

Una vez realizado el ensayo de Marshall de la mezcla convencional a diferentes temperaturas se procederá a realizar un análisis estadístico mediante el cálculo de parámetros de tendencia central (media) y medias de dispersión (desviación estándar y rangos) con el fin de analizar la confiabilidad de los valores obtenidos de densidad real (gr/cm^3), % Vacíos en la mezcla (Vv), % Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M), Estabilidad corregida (lb) y fluencia (0,01 pulg).

Tabla N° 4.9: Datos obtenidos de las propiedades mecánicas.

N°	Propiedades mecánicas					
	Densidad real (gr/cm^3)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
1	2,321	6,060	18,330	66,940	1375,180	10,000
2	2,390	3,250	15,520	79,060	1470,750	8,000
3	2,380	3,680	15,960	76,910	1548,070	9,000
4	2,330	7,690	19,790	61,150	1740,600	9,000
5	2,331	5,660	17,760	68,140	1845,330	10,000
6	2,330	5,680	17,780	68,040	1725,440	10,000
7	2,338	5,360	17,490	69,360	1902,860	11,000
8	2,340	5,300	17,430	69,600	1821,780	10,000
9	2,330	5,700	17,830	68,030	1953,750	10,000
10	2,320	6,110	18,260	66,550	2118,680	11,000
11	2,310	6,480	18,630	65,200	2192,110	12,000
12	2,390	3,260	15,410	78,860	2024,920	11,000
13	2,356	4,650	16,880	72,460	2191,070	11,000
14	2,360	4,460	16,690	73,300	2213,820	12,000
15	2,350	4,890	17,120	71,440	2355,880	12,000
16	2,325	5,910	18,100	67,350	2453,820	13,000
17	2,350	4,870	17,060	71,460	2438,310	12,000
18	2,368	4,140	16,330	74,640	2518,760	11,000
19	2,370	4,090	16,390	75,070	2501,240	12,000
20	2,370	4,060	16,370	75,190	2600,410	13,000
21	2,370	4,070	16,370	75,160	2610,830	13,000
22	2,380	3,660	16,000	77,110	2712,650	14,000
23	2,374	3,890	16,230	76,010	2709,760	13,000
24	2,374	3,900	16,240	75,963	2651,870	14,000

25	2,320	6,080	18,300	66,760	2629,550	14,000
26	2,370	4,090	16,310	74,930	2711,190	15,000
27	2,370	4,070	16,290	75,000	2589,870	14,000
28	2,362	4,400	16,670	73,570	2536,810	16,000
29	2,364	4,330	16,590	73,920	2517,090	15,000
30	2,360	4,460	16,730	73,320	2614,530	14,000
31	2,330	5,680	17,890	68,220	2495,920	14,000
32	2,350	4,890	17,090	71,400	2494,900	17,000
33	2,370	4,070	16,270	74,990	2404,460	15,000
34	2,334	5,530	17,660	68,660	2450,250	19,000
35	2,320	6,080	18,200	66,597	2340,370	15,000
36	2,350	4,890	17,010	71,270	2353,300	18,000
Media (X)	2,352	4,872	17,083	71,712	2272,670	12,694
Desviación estándar (S)	0,02	1,017	0,971	4,251	379,410	2,573
Rango superior (X+S)	2,374	5,889	18,054	75,963	2652,080	15,267
Rango inferior (X-S)	2,329	3,855	16,112	67,461	1893,261	10,122

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.6.1. Análisis estadístico de la densidad real.

Con los resultados obtenidos de la densidad real de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.10: Depuración de datos de la densidad real.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	2,321	2,374 - 2,329	Depurado
2	2,390	2,374 - 2,329	Depurado
3	2,380	2,374 - 2,329	Depurado
4	2,330	2,374 - 2,329	No depurado
5	2,331	2,374 - 2,329	No depurado
6	2,330	2,374 - 2,329	No depurado
7	2,338	2,374 - 2,329	No depurado
8	2,340	2,374 - 2,329	No depurado
9	2,330	2,374 - 2,329	No depurado
10	2,320	2,374 - 2,329	Depurado
11	2,310	2,374 - 2,329	Depurado
12	2,390	2,374 - 2,329	Depurado
13	2,356	2,374 - 2,329	No depurado
14	2,360	2,374 - 2,329	No depurado
15	2,350	2,374 - 2,329	No depurado
16	2,325	2,374 - 2,329	Depurado
17	2,350	2,374 - 2,329	No depurado
18	2,368	2,374 - 2,329	No depurado
19	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
20	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
21	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
22	2,380	2,374 - 2,329	Depurado
23	2,374	2,374 - 2,329	No depurado
24	2,374	2,374 - 2,329	No depurado
25	2,320	2,374 - 2,329	Depurado
26	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
27	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
28	2,362	2,374 - 2,329	No depurado
29	2,364	2,374 - 2,329	No depurado
30	2,360	2,374 - 2,329	No depurado
31	2,330	2,374 - 2,329	No depurado
32	2,350	2,374 - 2,329	No depurado
33	2,370	2,374 - 2,329	No depurado
34	2,334	2,374 - 2,329	No depurado
35	2,320	2,374 - 2,329	Depurado
36	2,350	2,374 - 2,329	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la densidad real que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.11: Densidad real promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Densidad promedio
1	-	
2	-	
3	-	
4	2,330	
5	2,331	
6	2,330	2,330
7	2,338	
8	2,340	
9	2,330	2,336
10	-	
11	-	
12	-	
13	2,356	
14	2,360	
15	2,350	2,355
16	-	
17	2,350	
18	2,368	2,359
19	2,370	
20	2,370	
21	2,370	2,370
22	-	
23	2,374	
24	2,374	2,374
25	-	
26	2,370	
27	2,370	2,370
28	2,362	
29	2,364	
30	2,360	2,362
31	2,330	
32	2,350	
33	2,370	2,350
34	2,334	
35	-	
36	2,350	2,342

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados la densidad real a diferentes temperaturas de compactación.

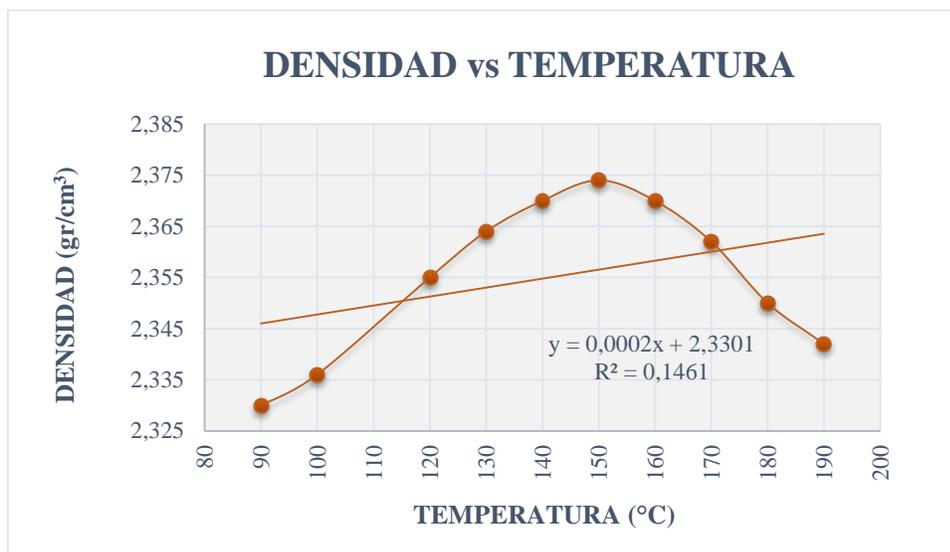
Tabla N° 4.12: Resultados finales de la densidad real.

Temperatura (°C)	Densidad real (gr/cm³)
80	-
90	2,330
100	2,336
110	-
120	2,355
130	2,359
140	2,370
150	2,374
160	2,370
170	2,362
180	2,350
190	2,342

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica DENSIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.6: Densidad Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.6 se puede ver que la densidad aumenta respecto a la temperatura de forma ascendente hasta la temperatura de 150 °C llegando a obtener en ese punto la densidad máxima en el momento de dosificación.

En el proceso de elaboración de briquetas las de 90°C, 100°C la mezcla tiene superficie áspera, es poco trabajable, difícil de compactar y poco durable esto es debido a que la temperatura es baja, el cemento asfáltico se endurece y no logran adherirse a los agregados y al ir incrementando la temperatura la mezcla comienza a mejorar hasta la temperatura de 150°C en este punto se obtiene las mejores condiciones en el proceso de elaboración por lo tanto una mejor mezcla asfáltica, es más trabajable, tiene una mejor compactación y la densidad máxima, pasando de este punto las mezclas nuevamente bajan su calidad al aumentar la temperatura esto es debido a que el cemento se sobrecalienta, se evapora y pierde sus propiedades. En la siguiente imagen se puede ver una briqueta con buena mezcla y otra con mala mezcla. Ver figura 4.1.

Figura 4.1 Mezcla convencional.



Buena mezcla.
a 150°C

Mala mezcla.
a 90°C

Fuente: Elaboración propia.

La curva nos muestra que a partir de temperaturas mayores a 150°C comienza a descender es decir que a temperaturas mayores y menores a 150 °C la mezcla tiene otro comportamiento llegando a ser sus densidades menores lo cual influirá en la calidad del pavimento.

De acuerdo a la gráfica se puede observar que la densidad máxima de 2,374 gr/cm³ es a los 150°C llegando a ser esta temperatura la más adecuada para obtener la mejor densidad.

Se evidencia que a la temperatura de 150° C la densidad es máxima porque ahí se obtiene el menor porcentaje de vacíos.

4.2.1.6.2. Análisis estadístico de % de vacíos en la mezcla (Vv).

Con los resultados obtenidos de % de Vacíos en la mezcla (Vv) de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.13: Depuración de datos de % de vacíos en la mezcla (Vv).

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	6,060	5,889 - 3,855	Depurado
2	3,250	5,889 - 3,855	Depurado
3	3,680	5,889 - 3,855	Depurado
4	7,690	5,889 - 3,855	Depurado
5	5,660	5,889 - 3,855	No depurado
6	5,680	5,889 - 3,855	No depurado
7	5,360	5,889 - 3,855	No depurado
8	5,300	5,889 - 3,855	No depurado
9	5,700	5,889 - 3,855	No depurado
10	6,110	5,889 - 3,855	Depurado
11	6,480	5,889 - 3,855	Depurado
12	3,260	5,889 - 3,855	Depurado
13	4,650	5,889 - 3,855	No depurado
14	4,460	5,889 - 3,855	No depurado
15	4,890	5,889 - 3,855	No depurado
16	5,910	5,889 - 3,855	Depurado
17	4,870	5,889 - 3,855	No depurado
18	4,140	5,889 - 3,855	No depurado
19	4,090	5,889 - 3,855	No depurado
20	4,060	5,889 - 3,855	No depurado
21	4,070	5,889 - 3,855	No depurado
22	3,660	5,889 - 3,855	Depurado
23	3,890	5,889 - 3,855	No depurado
24	3,900	5,889 - 3,855	No depurado
25	6,080	5,889 - 3,855	Depurado
26	4,090	5,889 - 3,855	No depurado
27	4,070	5,889 - 3,855	No depurado
28	4,400	5,889 - 3,855	No depurado
29	4,330	5,889 - 3,855	No depurado
30	4,460	5,889 - 3,855	No depurado
31	5,680	5,889 - 3,855	No depurado
32	4,890	5,889 - 3,855	No depurado
33	4,070	5,889 - 3,855	No depurado
34	5,530	5,889 - 3,855	No depurado
35	6,080	5,889 - 3,855	Depurado
36	4,890	5,889 - 3,855	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos del % de Vacíos en la mezcla (Vv) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.14: % de vacíos en la mezcla (Vv) promedio con datos no depurados.

N°	Datos	% Vacíos en la mezcla (Vv)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	5,660	
6	5,680	5,670
7	5,360	
8	5,300	
9	5,700	5,450
10	-	
11	-	
12	-	-
13	4,650	
14	4,460	
15	4,890	4,670
16	-	
17	4,870	
18	4,140	4,510
19	4,090	
20	4,060	
21	4,070	4,070
22	-	
23	3,890	
24	3,900	3,900
25	-	
26	4,090	
27	4,070	4,080
28	4,400	
29	4,330	
30	4,460	4,400
31	5,680	
32	4,890	
33	4,070	4,880
34	5,530	
35	-	
36	4,890	5,210

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de % de Vacíos en la mezcla (Vv) a diferentes temperaturas de compactación.

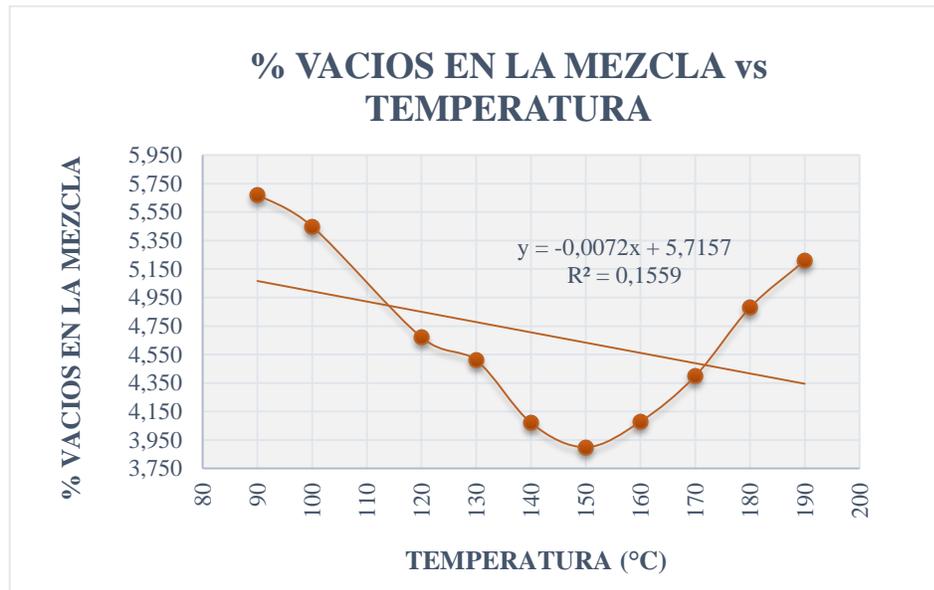
Tabla N° 4.15: Resultados finales de % de vacíos en la mezcla (Vv).

Temperatura (°C)	% Vacíos en la mezcla (Vv)
80	-
90	5,670
100	5,450
110	-
120	4,670
130	4,510
140	4,070
150	3,900
160	4,080
170	4,400
180	4,880
190	5,210

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica % DE VACIOS EN LA MEZCLA VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.7: % de vacíos de la mezcla Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

La grafica 4.7 nos muestra que la temperatura afecta la condición del % de vacíos en la mezcla, es decir, en temperaturas bajas y altas al ser la densidad menor a la máxima genera mayor porcentaje de vacíos mientras que en temperaturas de máxima densidad se consigue menor % de vacíos.

Se observa que algunos de los valores de porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas no se encuentran en un rango de 3% y 5% según norma, estos valores son de temperaturas más bajas (90, 100°C) y de la más alta (190°C).

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22), un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar con facilidad el agua y el aire al pavimento y causar deterioro en el mismo también causa endurecimiento y envejecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración por otro lado la densidad y el contenido de vacíos están

directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla lo cual nos garantiza que a la máxima densidad se obtiene una mejor mezcla.

Se puede ver en la gráfica que a temperaturas menores el porcentaje de vacíos es mayor esto es debido a que al no ser tan fluido el asfalto no llega a mezclarse bien con el agregado.

Se puede observar que el porcentaje de vacíos menor es 3,900 en la temperatura de 150°C esto nos garantiza que a esa temperatura existirá mayor durabilidad de un pavimento asfáltico, por lo tanto entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla y menos frágil esto se puede corroborar en el manual del instituto de asfaltos (MS – 22) pág. 58.

4.2.1.6.3. Análisis estadístico de % de vacíos de agregado mineral (V.A.M.).

Con los resultados obtenidos de % de Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M.) de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.16: Depuración de datos de % de vacíos de agregado mineral.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	18,330	18,054 - 16,112	Depurado
2	15,520	18,054 - 16,112	Depurado
3	15,960	18,054 - 16,112	Depurado
4	19,790	18,054 - 16,112	Depurado
5	17,760	18,054 - 16,112	No depurado

6	17,780	18,054 - 16,112	No depurado
7	17,490	18,054 - 16,112	No depurado
8	17,430	18,054 - 16,112	No depurado
9	17,830	18,054 - 16,112	No depurado
10	18,260	18,054 - 16,112	Depurado
11	18,630	18,054 - 16,112	Depurado
12	15,410	18,054 - 16,112	Depurado
13	16,880	18,054 - 16,112	No depurado
14	16,690	18,054 - 16,112	No depurado
15	17,120	18,054 - 16,112	No depurado
16	18,100	18,054 - 16,112	Depurado
17	17,060	18,054 - 16,112	No depurado
18	16,330	18,054 - 16,112	No depurado
19	16,390	18,054 - 16,112	No depurado
20	16,370	18,054 - 16,112	No depurado
21	16,370	18,054 - 16,112	No depurado
22	16,000	18,054 - 16,112	Depurado
23	16,230	18,054 - 16,112	No depurado
24	16,240	18,054 - 16,112	No depurado
25	18,300	18,054 - 16,112	Depurado
26	16,310	18,054 - 16,112	No depurado
27	16,290	18,054 - 16,112	No depurado
28	16,670	18,054 - 16,112	No depurado
29	16,590	18,054 - 16,112	No depurado
30	16,730	18,054 - 16,112	No depurado
31	17,890	18,054 - 16,112	No depurado
32	17,090	18,054 - 16,112	No depurado
33	16,270	18,054 - 16,112	No depurado
34	17,660	18,054 - 16,112	No depurado
35	18,200	18,054 - 16,112	Depurado
36	17,010	18,054 - 16,112	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos del % Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo

con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.17: % de Vacíos de agregado mineral promedio con datos no depurados.

N°	Datos	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	17,760	
6	17,780	17,770
7	17,490	
8	17,430	
9	17,830	17,583
10	-	
11	-	
12	-	-
13	16,880	
14	16,690	
15	17,120	16,897
16	-	
17	17,060	
18	16,330	16,695
19	16,390	
20	16,370	
21	16,370	16,377
22	-	
23	16,230	
24	16,240	16,235
25	-	
26	16,310	
27	16,290	16,300
28	16,670	
29	16,590	
30	16,730	16,663
31	17,890	
32	17,090	
33	16,270	17,083
34	17,660	
35	-	
36	17,010	17,335

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de % de Vacíos de Agregado Mineral a diferentes temperaturas de compactación.

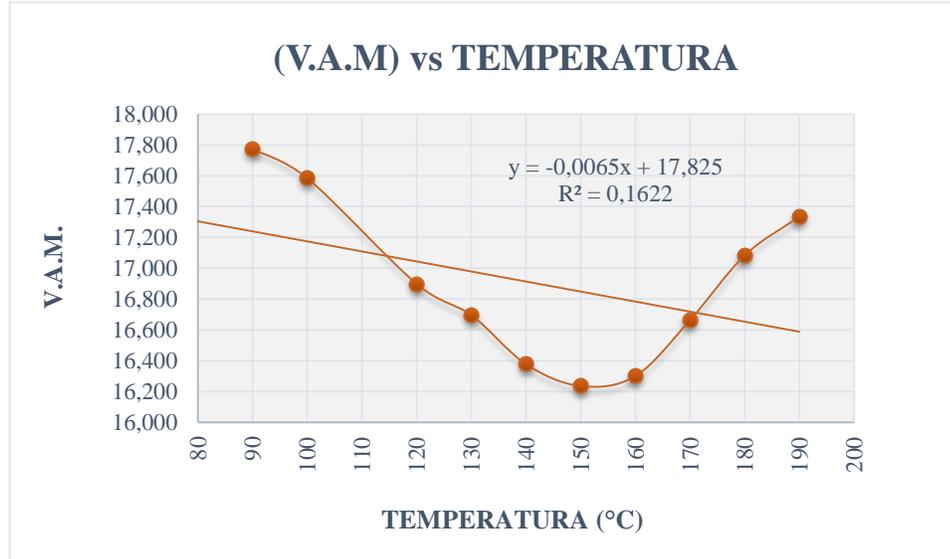
Tabla N° 4.18: Resultados finales de % de vacíos de agregado mineral.

Temperatura (°C)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)
80	-
90	17,770
100	17,583
110	-
120	16,897
130	16,695
140	16,377
150	16,235
160	16,300
170	16,663
180	17,083
190	17,335

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica % DE VACIOS DE AGREGADO MINERAL VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.8: % de vacíos de agregado mineral Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Se verifica que el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM) es mayor a 14 % como indica la norma ASTM.

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22) pág 58, cuanto mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. Una mezcla con alto contenido de VAM es muy viscosa, difícil de manejar, poco durable y una mezcla con bajo contenido de VAM es tierna y altamente permeable (Pag.64).

Relacionando las gráficas de VAM y % de vacíos de la mezcla se observa que éstas son proporcionales entre sí a medida que aumenta el porcentaje de vacíos aumenta el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

El % de vacíos de agregado mineral (VAM) más adecuado se considera a los 150°C donde el valor del VAM es de 16,235 % porque a esa temperatura se obtuvo una mejor mezcla con mayor trabajabilidad, compactación y densidad máxima.

4.2.1.6.4. Análisis estadístico de relación betumen vacíos (R.B.V.).

Con los resultados obtenidos de la Relación betumen vacíos (R.B.V.) de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.19: Depuración de datos de relación betumen vacíos (R.B.V.).

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	66,940	75,963 - 67,461	Depurado
2	79,060	75,963 - 67,461	Depurado
3	76,910	75,963 - 67,461	Depurado
4	61,150	75,963 - 67,461	Depurado
5	68,140	75,963 - 67,461	No depurado
6	68,040	75,963 - 67,461	No depurado
7	69,360	75,963 - 67,461	No depurado
8	69,600	75,963 - 67,461	No depurado
9	68,030	75,963 - 67,461	No depurado
10	66,550	75,963 - 67,461	Depurado
11	65,200	75,963 - 67,461	Depurado
12	78,860	75,963 - 67,461	Depurado
13	72,460	75,963 - 67,461	No depurado
14	73,300	75,963 - 67,461	No depurado
15	71,440	75,963 - 67,461	No depurado
16	67,350	75,963 - 67,461	Depurado
17	71,460	75,963 - 67,461	No depurado
18	74,640	75,963 - 67,461	No depurado
19	75,070	75,963 - 67,461	No depurado

20	75,190	75,963 - 67,461	No depurado
21	75,160	75,963 - 67,461	No depurado
22	77,110	75,963 - 67,461	Depurado
23	76,010	75,963 - 67,461	Depurado
24	75,963	75,963 - 67,461	No depurado
25	66,760	75,963 - 67,461	Depurado
26	74,930	75,963 - 67,461	No depurado
27	75,000	75,963 - 67,461	No depurado
28	73,570	75,963 - 67,461	No depurado
29	73,920	75,963 - 67,461	No depurado
30	73,320	75,963 - 67,461	No depurado
31	68,220	75,963 - 67,461	No depurado
32	71,400	75,963 - 67,461	No depurado
33	74,990	75,963 - 67,461	No depurado
34	68,660	75,963 - 67,461	No depurado
35	66,597	75,963 - 67,461	Depurado
36	71,270	75,963 - 67,461	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Relación betumen vacíos (R.B.V.) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.20: Relación betumen vacíos promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Relación betumen vacíos (R.B.V.)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	68,140	
6	68,040	68,090
7	69,360	
8	69,600	
9	68,030	68,997
10	-	
11	-	
12	-	-
13	72,460	
14	73,300	
15	71,440	72,400
16	-	
17	71,460	
18	74,640	73,050
19	75,070	
20	75,190	
21	75,160	75,140
22	-	
23	-	
24	75,963	75,963
25	-	
26	74,930	
27	75,000	74,965
28	73,570	
29	73,920	
30	73,320	73,603
31	68,220	
32	71,400	
33	74,990	71,537
34	68,660	
35	-	
36	71,270	69,965

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados la Relación betumen vacíos a diferentes temperaturas de compactación.

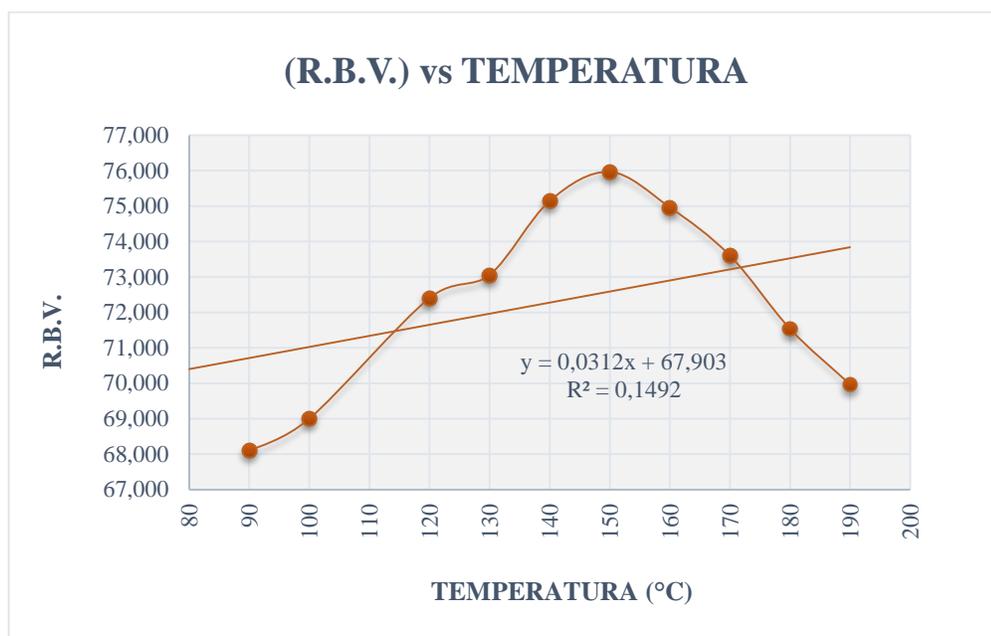
Tabla N° 4.21: Resultados finales de la relación betumen vacíos.

Temperatura (°C)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)
80	-
90	68,090
100	68,997
110	-
120	72,400
130	73,050
140	75,140
150	75,963
160	74,965
170	73,603
180	71,537
190	69,965

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica R.B.V. VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.9: E.B.V. Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.9 se puede observar que a temperaturas bajas y altas los vacíos llenos de asfalto son menores.

La relación betumen – vacíos (R.B.V.) está dentro de las especificaciones cuyo rango es de 65 - 75% esto nos garantiza que los vacíos están ocupados por cemento asfáltico y lograra la adhesión entre asfalto y partículas del esqueleto mineral de la mezcla con mayor consistencia de acuerdo a lo estipulado en el Manual del Instituto de Asfaltos.

A las temperaturas de 140 y 150°C el valor de la relación betumen – vacíos está próximo a los 75 llegando a ser un valor aceptable según especifica la norma AASHTO que es 65 – 75%.

4.2.1.6.5. Análisis estadístico de la estabilidad.

Con los resultados obtenidos de la Estabilidad de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.22: Depuración de datos de la estabilidad.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	1375,180	2652,080 - 1893,261	Depurado
2	1470,750	2652,080 - 1893,261	Depurado
3	1548,070	2652,080 - 1893,261	Depurado
4	1740,600	2652,080 - 1893,261	Depurado
5	1845,330	2652,080 - 1893,261	Depurado
6	1725,440	2652,080 - 1893,261	Depurado
7	1902,860	2652,080 - 1893,261	No depurado
8	1821,780	2652,080 - 1893,261	Depurado
9	1953,750	2652,080 - 1893,261	No depurado
10	2118,680	2652,080 - 1893,261	No depurado
11	2192,110	2652,080 - 1893,261	No depurado
12	2024,920	2652,080 - 1893,261	No depurado
13	2191,070	2652,080 - 1893,261	No depurado
14	2213,820	2652,080 - 1893,261	No depurado
15	2355,880	2652,080 - 1893,261	No depurado
16	2453,820	2652,080 - 1893,261	No depurado
17	2438,310	2652,080 - 1893,261	No depurado
18	2518,760	2652,080 - 1893,261	No depurado
19	2501,240	2652,080 - 1893,261	No depurado
20	2600,410	2652,080 - 1893,261	No depurado
21	2610,830	2652,080 - 1893,261	No depurado
22	2712,650	2652,080 - 1893,261	Depurado
23	2709,760	2652,080 - 1893,261	Depurado
24	2651,870	2652,080 - 1893,261	No depurado
25	2629,550	2652,080 - 1893,261	No depurado
26	2711,190	2652,080 - 1893,261	Depurado
27	2589,870	2652,080 - 1893,261	No depurado
28	2536,810	2652,080 - 1893,261	No depurado
29	2517,090	2652,080 - 1893,261	No depurado
30	2614,530	2652,080 - 1893,261	No depurado
31	2495,920	2652,080 - 1893,261	No depurado
32	2494,900	2652,080 - 1893,261	No depurado
33	2404,460	2652,080 - 1893,261	No depurado
34	2450,250	2652,080 - 1893,261	No depurado
35	2340,370	2652,080 - 1893,261	No depurado
36	2353,300	2652,080 - 1893,261	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Estabilidad que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.23: Estabilidad promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Estabilidad promedio (libras)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	-	
6	-	-
7	1902,860	
8	-	
9	1953,750	1928,310
10	2118,680	
11	2192,110	
12	2024,920	2111,900
13	2191,070	
14	2213,820	
15	2355,880	2253,590
16	2453,820	
17	2438,310	
18	2518,760	2470,300
19	2501,240	
20	2600,410	
21	2610,830	2570,830
22	-	
23	-	
24	2651,870	2651,870
25	2629,550	
26	-	
27	2589,870	2609,710
28	2536,810	
29	2517,090	
30	2614,530	2556,140
31	2495,920	
32	2494,900	
33	2404,460	2465,090
34	2450,250	
35	2340,370	
36	2353,300	2381,310

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados la estabilidad a diferentes temperaturas de compactación.

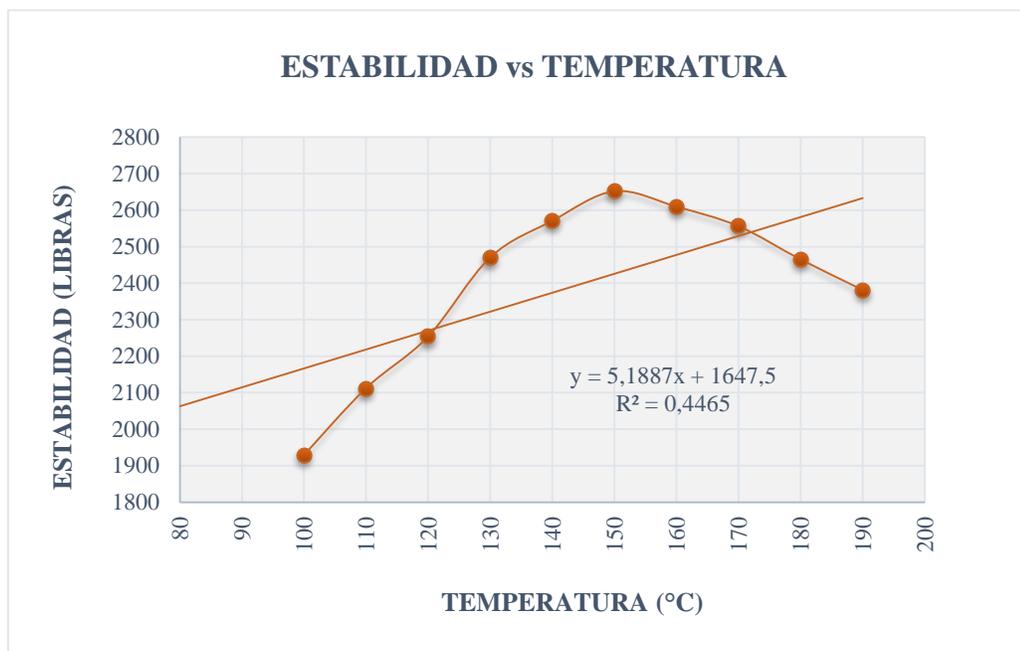
Tabla N° 4.24: Resultados finales de la estabilidad.

Temperatura (°C)	Estabilidad (libras)
80	-
90	-
100	1928,310
110	2111,900
120	2253,590
130	2470,300
140	2570,830
150	2651,870
160	2609,710
170	2556,140
180	2465,090
190	2381,310

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica ESTABILIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.10: Estabilidad Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22) pag 61, los valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto, menos durable que lo deseado y una mezcla con estabilidad baja produce baja resistencia en la compactación, ondulación, ahuellamiento y canalización.

En la gráfica 4.10 lo que se muestra con los resultados de estabilidad a diferentes temperaturas (80 a 190 °C) es que el valor de la estabilidad sube mientras la temperatura aumente hasta llegar a una máxima de 2651,870 libras luego comienza a descender, esto nos demuestra que a temperaturas bajas y altas la estabilidad tiene valores menores y en una temperatura promedio que es a los 150°C se obtiene la estabilidad máxima y más recomendable esto es debido a que en ese punto se tiene una buena mezcla con la mejor condición de estabilidad y es concordante con las otras características (densidad máxima

y menor porcentaje de vacíos), tiene mayor resistencia, trabajabilidad y mejor compactación

En la curva de estabilidad vs temperatura se puede apreciar que hay un quiebre suave y no existe mucha variación en la estabilidad en la temperatura 150 a 160 °C comportándose como una recta, esto quiere decir que a estas temperaturas no hay mucha variación en sus propiedades.

4.2.1.6.6. Análisis estadístico de la fluencia.

Con los resultados obtenidos de la Fluencia de la tabla 4,7 y el rango superior e inferior de la tabla 4.9 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.25: Depuración de datos de la fluencia.

N°	DATOS	RANGOS	DATOS DEPURADOS
1	10,00	15,267 - 10,122	Depurado
2	8,00	15,267 - 10,122	Depurado
3	9,00	15,267 - 10,122	Depurado
4	9,00	15,267 - 10,122	Depurado
5	10,00	15,267 - 10,122	Depurado
6	10,00	15,267 - 10,122	Depurado
7	11,00	15,267 - 10,122	No depurado
8	10,00	15,267 - 10,122	Depurado
9	10,00	15,267 - 10,122	Depurado
10	11,00	15,267 - 10,122	No depurado
11	12,00	15,267 - 10,122	No depurado
12	11,00	15,267 - 10,122	No depurado
13	11,00	15,267 - 10,122	No depurado
14	12,00	15,267 - 10,122	No depurado
15	12,00	15,267 - 10,122	No depurado
16	13,00	15,267 - 10,122	No depurado

17	12,00	15,267 - 10,122	No depurado
18	11,00	15,267 - 10,122	No depurado
19	12,00	15,267 - 10,122	No depurado
20	13,00	15,267 - 10,122	No depurado
21	13,00	15,267 - 10,122	No depurado
22	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
23	13,00	15,267 - 10,122	No depurado
24	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
25	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
26	15,00	15,267 - 10,122	No depurado
27	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
28	16,00	15,267 - 10,122	Depurado
29	15,00	15,267 - 10,122	No depurado
30	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
31	14,00	15,267 - 10,122	No depurado
32	17,00	15,267 - 10,122	Depurado
33	15,00	15,267 - 10,122	No depurado
34	19,00	15,267 - 10,122	Depurado
35	15,00	15,267 - 10,122	No depurado
36	18,00	15,267 - 10,122	Depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Fluencia que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.26: Fluencia promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Fluencia promedio (0,01 pulg)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	-	
6	-	-
7	11,000	
8	-	
9	-	11,000
10	11,000	
11	12,000	
12	11,000	11,330
13	11,000	
14	12,000	
15	12,000	11,670
16	13,000	
17	12,000	
18	11,000	12,000
19	12,000	
20	13,000	
21	13,000	12,670
22	14,000	
23	13,000	
24	14,000	13,670
25	14,000	
26	15,000	
27	14,000	14,330
28	-	
29	15,000	
30	14,000	14,500
31	14,000	
32	-	
33	15,000	14,500
34	-	
35	15,000	
36	-	15,000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de la Fluencia a diferentes temperaturas de compactación.

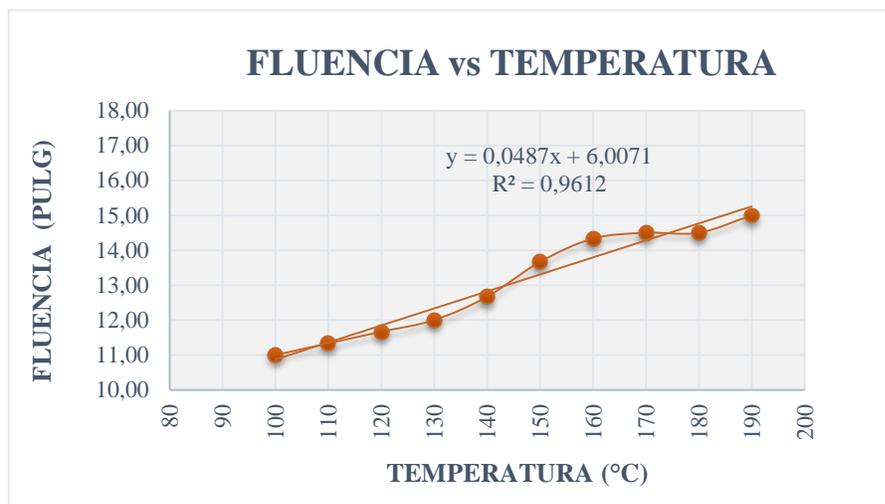
Tabla N° 4.27: Resultados finales de la fluencia.

Temperatura (°C)	Fluencia (0,01 Pulg)
80	-
90	-
100	11,000
110	11,330
120	11,670
130	12,000
140	12,670
150	13,670
160	14,330
170	14,500
180	14,500
190	15,000

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica ESTABILIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.11: Fluencia Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

De la curva FLUENCIA VS TEMPERATURA se puede observar que a mayor temperatura se deforma más.

En el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Serie de manuales N°22 (MS -22) pag 77 nos explica que en las temperaturas de la mezcla que tienen valores bajos de fluencia son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio y aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

En estas mezclas convencionales no presenta valores muy bajos de fluencia pero si hay valores altos que están fuera del rango establecido por la norma AASHTO T-245 que es 8 a 14 (0,01 pulg) , los siguientes puntos son: 160, 170, 180 y 190 °C por lo tanto en esas temperaturas no es recomendable realizar una compactación porque las mezclas se deforman con mayor facilidad.

Los puntos que están dentro del rango de fluencia establecido que es de 8 a 14 (0,01 pulg) nos garantiza que las cargas de tráfico no ejercerán deformaciones en el pavimento.

4.2.2. Diseño de la mezcla de trabajo con cemento asfáltico modificado con SBS 60 - 85.

4.2.2.1. Determinación del contenido óptimo.

Tabla N° 4.28 Diseño Marshall de mezcla

	UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA) DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS METODO MARSHALL	
	MUESTRA CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO 60/85	
	MEZCLA EN CALIENTE	
	PROCEDENCIA DEL AGREGADO: PLANTA DE CHARAJAS (SEDECA)	FECHA: MAYO DE 2019

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregad
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	50,00
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,68	50,00
Peso Específico Total	2,70	100,00

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1,0800

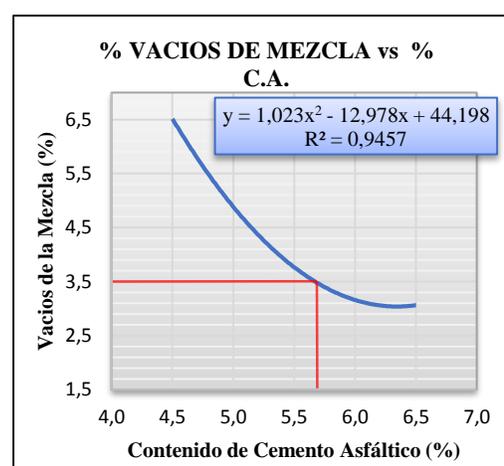
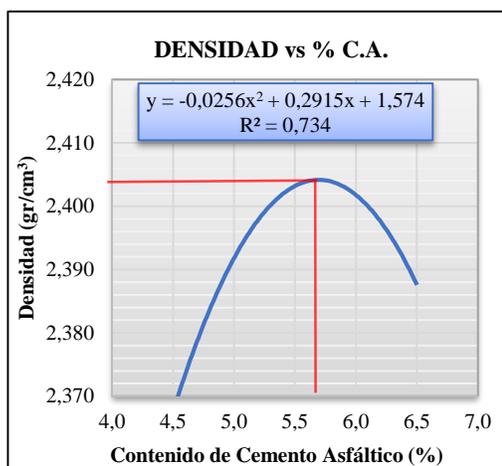
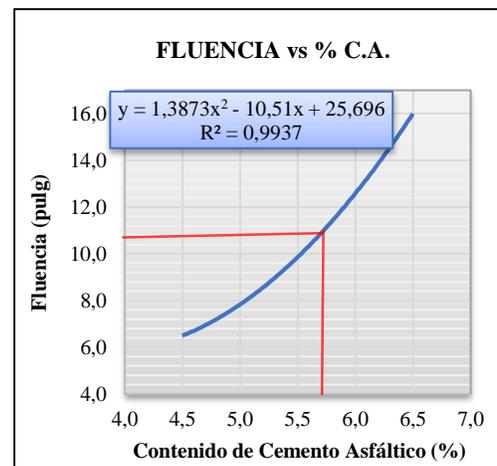
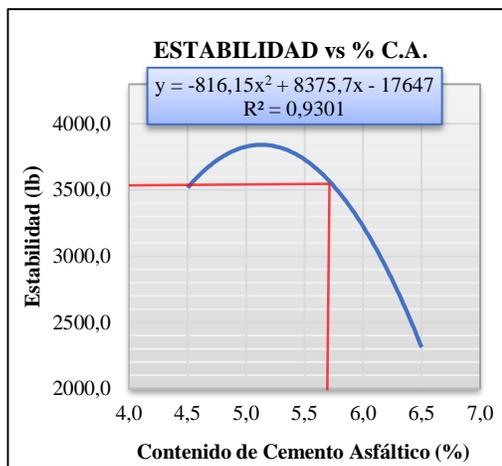
Agregad	P.E.	%
Grava	2,74	30
Gravilla	2,71	20
Arena	2,68	50
Filler	0,00	0

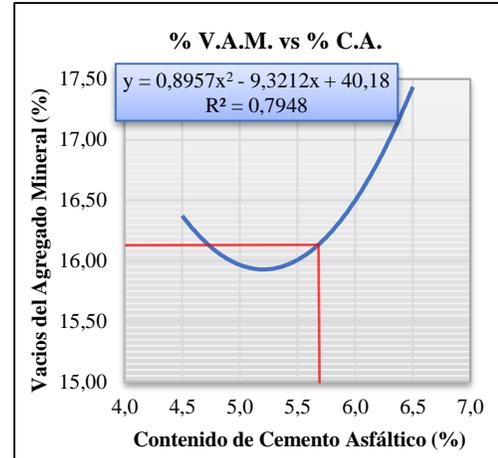
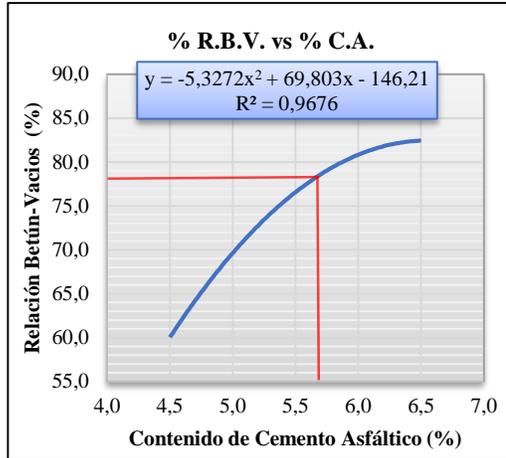
N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall			Fluencia					
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregados mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio	
		%	%	gr.	gr.	gr.	cc	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg	
1	6,37	4,50	4,71	1192,90	1196,50	693	503,50	2,37	2,37	2,53	6,30	16,19	61,09	1323	3544,40	0,995	3526,63	3545	160	0,063	6,69	
2	6,26			1184,00	1190,10	694	496,10	2,39						1307	3501,30	1,024	3585,30		180	0,071		
3	6,27			1183,40	1190,80	690	500,80	2,36						1288	3450,10	1,021	3522,56		170	0,067		
4	6,39	5,00	5,26	1184,40	1191,70	693	498,70	2,37	2,38	2,51	5,43	16,44	66,97	1485	3980,60	0,990	3940,78	3836	160	0,0630	7,35	
5	6,33			1187,50	1192,20	696	496,20	2,39						1439	3856,70	1,005	3876,00		230	0,0906		
6	6,40			1185,80	1193,10	692	501,10	2,37						1395	3738,20	0,988	3691,51		170	0,0669		
7	6,27	5,50	5,82	1184,20	1190,40	698	492,40	2,40	2,41	2,50	3,42	15,71	78,20	1206	3229,30	1,021	3297,11	3535	300	0,1181	10,10	
8	6,11			1176,20	1181,60	695	486,60	2,42						1394	3735,50	1,068	3989,56		220	0,0866		
9	6,19			1186,80	1191,80	700	491,80	2,41						1188	3180,80	1,043	3317,60		250	0,0984		
10	6,24	6,00	6,38	1181,70	1188,10	698	490,10	2,41	2,40	2,48	3,07	16,43	81,31	1198	3207,80	1,029	3300,78	3478	270	0,1063	12,73	
11	6,20			1184,20	1190,60	697	493,60	2,40						1347	3609,00	1,040	3753,34		390	0,1535		
12	6,30			1186,10	1192,90	699	493,90	2,40						1246	3337,00	1,013	3380,39		310	0,1220		
13	6,20	6,50	6,95	1171,90	1176,60	686	490,60	2,39	2,39	2,46	3,17	17,52	81,93	668	1780,60	1,040	1851,79	2219	380	0,1496	15,88	
14	6,22			1185,20	1191,20	693	498,20	2,38						829	2214,10	1,035	2291,60		430	0,1693		
15	6,14			1157,50	1162,80	678	484,80	2,39						888	2373,00	1,059	2512,99		400	0,1575		
ESPECIFICACIONES				mínimo							3,00	14,00	70,00				2200				10,00	
				máximo							5,00	-	85,00				-					16,00

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3841,80	5,13
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,40	5,69
	Vacíos de la mezcla (%)	3,04	6,34
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,72

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.12: Curvas método Marshall de mezcla modificada.





Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.29: Resumen de propiedades de diseño Marshall.

Propiedades	Valores de grafica	Especificaciones técnicas	
		Mínimas	Máximas
Estabilidad (libras)	3558,88	2200,00	-
Fluencia (0,01 pulg)	10,97	10,00	16,00
Densidad (gr/cm ³)	2,40	-	-
% de Vacíos de la mezcla (%)	3,43	3,00	5,00
V.A.M. (%)	16,17	14,00	-
Rel. Betumen- Vacíos (%)	78,77	70,00	85,00

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la mezcla modificada se consideran aceptables para este tipo de mezcla ya que cumple con las especificaciones técnicas.

- La estabilidad es de 3558,88 libras por lo que consideramos que tiene una estabilidad mayor a la requerida, su comportamiento ante las cargas del pavimento serán de mayor calidad.

- La fluencia o deformación es de 10,97 centésimas de pulgadas cumple con los valores de la especificación técnica esto nos garantiza que las cargas de tráfico no ejercerán deformaciones en el pavimento.
- El % de vacíos de la mezcla es de 3,43 % está dentro de lo aceptable para una mezcla modificada, eso nos asegura una buena densificación en la mezcla.
- La relación Betumen – vacíos es de 78,766 % está dentro del rango de la especificación técnica esto nos asegura que los vacíos están ocupados por cemento asfáltico llegando a tener una buena adhesión entre las partículas del esqueleto mineral y el asfalto.

4.2.2.2. Selección de rango de temperaturas.

La Norma ASTM recomienda usar una temperatura de compactación de 150 a 160 °C, para este trabajo de investigación se hará variar diferentes temperaturas es decir que del rango recomendado por la norma se va a subir y bajar la temperatura para poder hacer un análisis de las propiedades de la mezcla y la variación que pueda existir de una temperatura a la otra. Los rangos que se seleccionara para el compactado de las briquetas con mezcla convencional son entre 80 a 190°C.

Se adopta como mínimo 80°C porque menos de esa temperatura ya no se puede obtener una mezcla para compacta debido a que el asfalto se endurece y no logra adherirse a los agregados y como máximo se adoptó 190°C porque pasando de esa temperatura el asfalto comienza a evaporarse por el sobrecalentamiento del mismo.

4.2.2.3. Elaboración de briquetas con mezcla modificada.

Después de calcular el contenido óptimo del cemento asfáltico convencional que es de 5,72 se procede a determinar los pesos de las muestras para posteriormente realizar las briquetas a diferentes temperaturas que irán variando de 10 en 10°C.

Tabla 4.30: Dosificación para un contenido óptimo de 5,72.

Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	5,72%
Porcentaje de Agregado (%)	94,30%
Peso de Cemento Asfáltico (gr)	68,64
Peso de Grava (gr)	339,41
Peso de Gravilla (gr)	226,27
Peso de Arena (gr)	565,68
Peso de Filler(suelo) (gr)	0,00
Peso total de la briketa (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo todos los parámetros establecidos se procede a elaborar 3 briquetas para cada temperatura de compactación que varían de 10 en 10°C empezando con una temperatura mínima de 80°C hasta los 190°C haciendo un total de 36 briquetas.

El equipo a utilizar y procedimiento para la elaboración de las briquetas es el mismo q se explicó anteriormente en el subtítulo 3.10.

4.2.2.4. Estudio experimental sobre la susceptibilidad térmica de mezclas asfálticas modificada.

Ensayo Marshall a diferentes temperaturas

Tabla N° 4.31: Ensayo Marshall.



UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS METODO MARSHALL	
MUESTRA CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO 60/85	
TEMPERATURA DE MEZCLADO 80 - 190 ° C	FECHA: Julio de 2019
PROCEDENCIA DEL AGREGADO: CHANCADORA DE CHARAJAS (SEDECA)	LABORATORISTA: ERIKA TATIANA VALDEZ VACA

PESOS ESPECÍFICOS	% de agregad	
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	50
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,68	50
Peso Especifico Total	2,70	100

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1,080

Agregado	P.E.	%
Grava	2,74	30
Gravilla	2,71	20
Arena	2,68	50
Filler	0,00	0

N° de probeta	Temperatura de mezclado	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volum	Densidad Briqueta			%	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia			
			Óptimo Asfalto	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio				densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
			%	%	gr.	gr.	gr.		cc	gr/cm ³	gr/cm ³				gr/cm ³	%	%	%	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras
1	80	6,24	5,72	6,07	1193,90	1196,10	688	508,10	2,350	2,36	2,47	4,866	17,383	72,009	4,31	16,83	74,68	822	2195,26	0,94	2059,150	2075,44	9	9,670		
2		6,14			1181,50	1185,30	693	492,30	2,400			2,832	15,350	81,548				731	1950,22	1,06	2065,280		10			
3		6,18			1187,80	1192,50	685	507,50	2,340			5,240	17,757	70,491				753	2009,46	1,05	2101,890		10			
4	90	6,28	5,72	6,07	1195,40	1197,10	687	510,10	2,343	2,36	2,47	7,120	19,621	63,714	5,10	17,60	71,73	834	2227,57	1,02	2269,900	2317,70	10	10,000		
5		6,16			1192,70	1195,70	686	509,70	2,340			5,260	17,761	70,387				791	2111,78	1,05	2223,710		10			
6		6,20			1197,50	1198,40	699	499,40	2,398			2,917	15,418	81,084				885	2364,91	1,04	2459,500		10			

7		5,96			1190,80	1194,80	689	505,80	2,354			4,681	17,139	72,686				994	2658,42	1,12	2964,140		10			
8	100	6,09	5,72	6,07	1194,20	1196,10	688	508,10	2,350	2,35	2,47	4,842	17,299	72,011	4,77	17,23	72,32	903	2413,38	1,07	2591,970	2678,34	11	10,670		
9		6,06			1192,80	1195,20	688	507,20	2,352			4,785	17,242	72,250				856	2286,82	1,08	2478,910		11			
10		6,04			1189,50	1191,50	688	503,50	2,362			4,350	16,957	74,344				1002	2679,96	1,09	2921,160		11			
11	110	5,97	5,72	6,07	1180,60	1185,90	698	487,90	2,420	2,38	2,47	2,031	14,637	86,126	3,63	16,24	78,04	1048	2803,83	1,11	3117,860	3091,44	12	11,330		
12		6,03			1184,20	1187,10	685	502,10	2,358			4,511	17,118	73,646				1106	2960,83	1,09	3235,300		11			
13		5,97			1187,20	1188,50	685	503,50	2,358			4,535	17,077	73,442				1182	3164,67	1,11	3519,110		13			
14	120	5,89	5,72	6,07	1181,50	1186,90	689	497,90	2,373	2,37	2,47	3,925	16,467	76,164	4,12	16,67	75,28	1139	3048,88	1,14	3466,570	3315,96	12	12,330		
15		6,01			1188,30	1191,70	691	500,70	2,373			3,913	16,454	76,222				1097	2935,78	1,01	2962,200		12			
16		5,99			1194,60	1199,00	695	504,00	2,370			4,036	16,570	75,645				1277	3420,48	1,11	3783,060		13			
17	130	5,90	5,72	6,07	1180,00	1184,80	689	495,80	2,380	2,37	2,47	3,641	16,175	77,492	4,18	16,72	75,05	1239	3318,16	1,13	3762,790	3688,88	12	13,000		
18		6,03			1179,90	1183,20	681	502,20	2,350			4,875	17,409	71,999				1203	3221,22	1,09	3520,790		14			
19		5,93			1189,70	1191,20	692	499,20	2,383			3,510	16,123	78,227				1300	3482,42	1,12	3914,240		13			
20	140	5,94	5,72	6,07	1189,00	1193,50	694	499,50	2,380	2,38	2,47	3,625	16,237	77,675	3,59	16,20	77,86	1280	3428,56	1,12	3843,420	3923,66	14	14,000		
21		5,71			1187,10	1190,70	692	498,70	2,380			3,625	16,237	77,677				1255	3361,24	1,19	4013,320		15			
22		5,97			1191,80	1194,60	699	495,60	2,405			2,638	15,307	82,767				1478	3961,74	1,11	4405,450		15			
23	150	5,92	5,72	6,07	1181,20	1183,90	688	495,90	2,382	2,39	2,47	3,562	16,231	78,054	3,15	15,82	80,13	1341	3592,82	1,13	4052,700	4271,43	15	14,670		
24		5,93			1184,30	1186,60	691	495,60	2,390			3,251	15,920	79,582				1446	3875,57	1,12	4356,140		14			
25		5,72			1190,60	1193,20	695	498,20	2,390			3,243	15,830	79,511				1468	3934,81	1,19	4682,420		15			
26	160	5,99	5,72	6,07	1198,00	1201,20	700	501,20	2,390	2,38	2,47	3,225	15,812	79,605	3,78	16,37	77,07	1425	3819,02	1,11	4223,830	4463,14	15	15,330		
27		5,98			1190,50	1193,70	687	506,70	2,350			4,875	17,461	72,084				1508	4042,52	1,11	4483,160		16			
28		5,62			1181,50	1185,30	691	494,30	2,390			3,225	15,873	79,679				1345	3603,59	1,23	4425,210		15			
29	170	5,57	5,72	6,07	1187,10	1189,20	692	497,20	2,388	2,39	2,47	3,334	15,981	79,139	3,32	15,97	79,21	1346	3606,29	1,25	4493,430	4362,69	16	15,670		
30		5,94			1186,80	1188,40	691	497,40	2,386			3,397	16,044	78,827				1388	3719,39	1,12	4169,430		16			
31		5,81			1186,60	1188,90	689	499,90	2,374			3,896	16,511	76,400				1345	3603,59	1,16	4187,380		17			
32	180	5,91	5,72	6,07	1181,00	1186,80	691	495,80	2,382	2,38	2,47	3,559	16,173	77,994	3,57	16,18	77,96	1442	3864,80	1,13	4371,080	4157,57	16	16,670		
33		5,93			1188,30	1190,30	693	497,30	2,390			3,256	15,870	79,486				1300	3482,42	1,12	3914,240		17			
34		5,94			1186,60	1189,50	695	494,50	2,400			2,847	15,465	81,591				1286	3444,72	1,12	3861,530		18			
35	190	6,07	5,72	6,07	1189,00	1190,20	688	502,20	2,368	2,38	2,47	4,143	16,762	75,282	3,54	16,16	78,18	1410	3778,63	1,08	4084,700	3908,75	17	18,000		
36		6,01			1189,70	1191,80	692	499,80	2,380			3,626	16,245	77,678				1398	3746,31	1,01	3780,030		19			
ESPECIFICACIONES					Mínimo								3,000	14,000	70,000	3,000	14,000	70,000						2200,000		10,000
					máximo								5,000	-	85,000	5,000	-	85,000						-		16,000

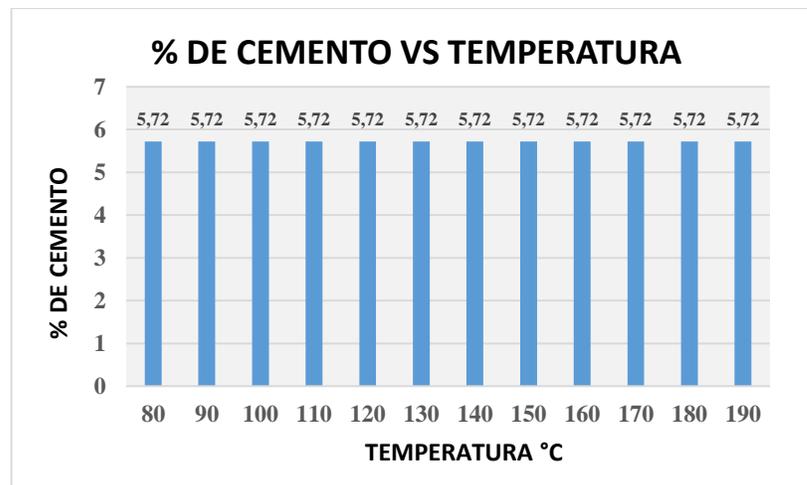
4.2.2.5. Análisis de la cantidad de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica.

Tabla N° 4.32: Porcentaje del cemento.

Temperatura °C	% Cemento asfáltico
80	5,72
90	5,72
100	5,72
110	5,72
120	5,72
130	5,72
140	5,72
150	5,72
160	5,72
170	5,72
180	5,72
190	5,72

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.13: Porcentaje de cemento.



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó el porcentaje óptimo del cemento asfáltico modificado con el ensayo Marshall en la tabla 4.28 llegando a obtener un valor de 5,72 siendo este el mismo valor para todas las temperaturas de (80 a 190°C).

4.2.2.6. Estadística.

Una vez realizado el ensayo de Marshall de la mezcla modificada a diferentes temperaturas se procederá a realizar un análisis estadístico mediante el cálculo de parámetros de tendencia central (media) y medias de dispersión (desviación estándar y rangos) con el fin de analizar la confiabilidad de los valores obtenidos de densidad real (gr/cm^3), % Vacíos en la mezcla (Vv), % Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M), Estabilidad corregida (lb) y fluencia (0,01 pulg).

Tabla 4.33: Datos obtenidos de las propiedades mecánicas.

N°	Propiedades mecánicas					
	Densidad real (gr/cm^3)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M)	Relación betumen vacuos (R.B.V.)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	2,350	4,866	17,383	72,009	2059,150	9,00
2	2,440	2,832	15,350	81,548	2065,280	10,00
3	2,340	5,240	17,757	70,491	2101,890	10,00
4	2,350	7,120	19,621	63,714	2269,900	10,00
5	2,343	5,260	17,761	70,387	2223,710	10,00
6	2,350	2,917	15,418	81,084	2459,500	10,00
7	2,354	4,681	17,139	72,686	2964,140	10,00
8	2,350	4,842	17,299	72,011	2591,970	11,00
9	2,352	4,785	17,242	72,250	2478,910	11,00
10	2,362	4,350	16,957	74,344	2921,160	11,00
11	2,420	2,031	14,637	86,126	3117,860	12,00
12	2,358	4,511	17,118	73,646	3235,300	11,00
13	2,358	4,535	17,077	73,646	3519,110	13,00
14	2,373	3,925	16,467	76,164	3466,570	12,00
15	2,373	3,913	16,454	76,222	2962,200	12,00
16	2,370	4,036	16,570	75,645	3783,060	13,00
17	2,380	3,641	16,175	77,492	3762,790	12,00
18	2,350	4,879	17,419	71,999	3520,790	14,00
19	2,383	3,510	16,123	78,227	3914,240	13,00
20	2,380	3,625	16,237	77,675	3843,420	14,00
21	2,380	3,625	16,237	77,677	4013,320	15,00
22	2,405	2,638	15,307	82,767	4405,450	15,00
23	2,382	3,562	16,231	78,054	4052,700	15,00
24	2,390	3,251	15,920	79,582	4356,140	14,00

25	2,390	3,243	15,831	79,511	4682,420	15,00
26	2,390	3,225	15,812	79,605	4223,830	15,00
27	2,350	4,879	17,461	72,084	4483,160	16,00
28	2,390	3,225	15,873	79,679	4425,210	15,00
29	2,388	3,334	15,981	79,139	4493,430	16,00
30	2,386	3,397	16,044	78,827	4169,430	16,00
31	2,374	3,896	16,511	76,400	4187,380	17,00
32	2,382	3,559	16,173	77,994	4371,080	16,00
33	2,390	3,256	15,840	79,486	3914,240	17,00
34	2,420	2,847	15,465	81,591	3861,530	18,00
35	2,368	4,143	16,762	75,282	4084,700	17,00
36	2,380	3,626	16,245	77,678	3780,030	19,00
Media (X)	2,375	3,922	16,497	76,465	3521,250	13,444
Desviación estándar (S)	0,020	0,955	0,921	4,308	810,437	2,699
Rango superior (X+S)	2,398	4,877	17,418	80,773	4331,687	16,143
Rango inferior (X-S)	2,352	2,967	15,576	72,156	2710,813	10,746

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.6.1. Análisis estadístico de la densidad real.

Con los resultados obtenidos de la densidad real de la tabla 4.31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.34: Depuración de datos de la densidad real.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
2	2,440	2,398 - 2,352	Depurado
3	2,340	2,398 - 2,352	Depurado
4	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
5	2,343	2,398 - 2,352	Depurado
6	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
7	2,354	2,398 - 2,352	No depurado
8	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
9	2,352	2,398 - 2,352	No depurado
10	2,362	2,398 - 2,352	No depurado
11	2,420	2,398 - 2,352	Depurado
12	2,358	2,398 - 2,352	No depurado
13	2,358	2,398 - 2,352	No depurado
14	2,373	2,398 - 2,352	No depurado
15	2,373	2,398 - 2,352	No depurado
16	2,370	2,398 - 2,352	No depurado
17	2,380	2,398 - 2,352	No depurado
18	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
19	2,383	2,398 - 2,352	No depurado
20	2,380	2,398 - 2,352	No depurado
21	2,380	2,398 - 2,352	No depurado
22	2,405	2,398 - 2,352	Depurado
23	2,382	2,398 - 2,352	No depurado
24	2,390	2,398 - 2,352	No depurado
25	2,390	2,398 - 2,352	No depurado
26	2,390	2,398 - 2,352	No depurado
27	2,350	2,398 - 2,352	Depurado
28	2,390	2,398 - 2,352	No depurado
29	2,388	2,398 - 2,352	No depurado
30	2,386	2,398 - 2,352	No depurado
31	2,374	2,398 - 2,352	No depurado
32	2,382	2,398 - 2,352	No depurado
33	2,390	2,398 - 2,352	No depurado
34	2,420	2,398 - 2,352	Depurado
35	2,368	2,398 - 2,352	No depurado
36	2,380	2,398 - 2,352	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la densidad real que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.35: Densidad real promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Densidad promedio
1	-	
2	-	
3	-	
4		
5		
6		
7	2,354	
8		
9	2,352	2,353
10	2,362	
11	-	
12	2,358	2,360
13	2,358	
14	2,373	
15	2,373	2,368
16	2,370	
17	2,380	
18	-	2,375
19	2,383	
20	2,380	
21	2,380	2,381
22	-	
23	2,382	
24	2,390	2,386
25	2,390	
26	2,390	
27	-	2,390
28	2,390	
29	2,388	
30	2,386	2,388
31	2,374	
32	2,382	
33	2,390	2,382
34	-	
35	2,368	
36	2,380	2,374

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados la densidad real a diferentes temperaturas de compactación.

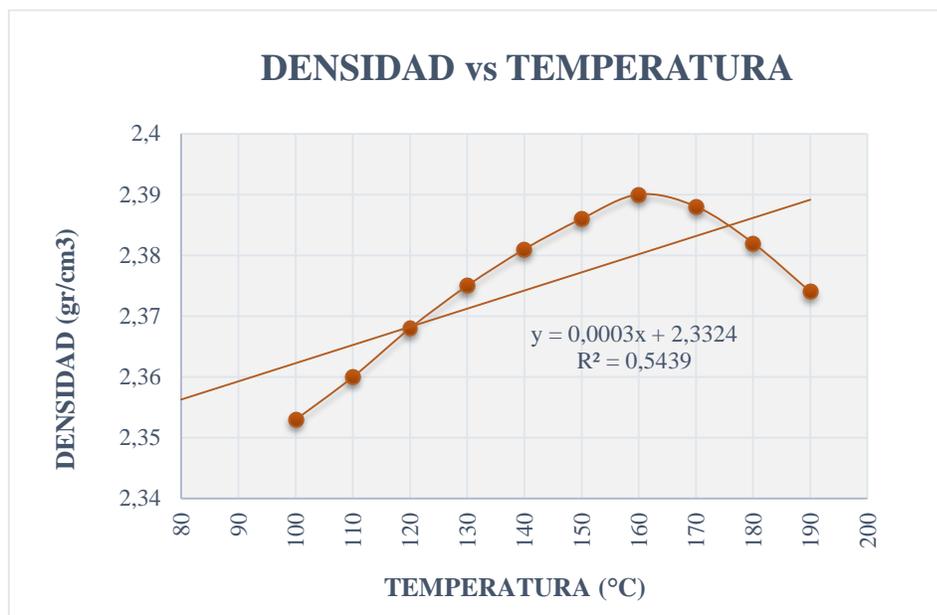
Tabla 4.36: Resultados finales de la densidad real.

Temperatura (°C)	Densidad real (gr/cm³)
80	-
90	
100	2,353
110	2,360
120	2,368
130	2,375
140	2,381
150	2,386
160	2,390
170	2,388
180	2,382
190	2,374

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica DENSIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la densidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.14: Densidad Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.14 se puede ver que la densidad aumenta respecto a la temperatura de forma ascendente hasta la temperatura de 160 °C llegando a obtener en ese punto la densidad máxima en el momento de dosificación.

En el proceso de elaboración de briquetas las de 90°C, 100°C la mezcla tiene superficie áspera, es poco trabajable, difícil de compactar y poco durable esto es debido a que la temperatura es baja, el cemento asfáltico se endurece y no logran adherirse a los agregados y al ir incrementando la temperatura la mezcla comienza a mejorar hasta la temperatura de 160°C en este punto se obtiene las mejores condiciones en el proceso de elaboración por lo tanto una mejor mezcla asfáltica, es más trabajable, tiene una mejor compactación y la densidad máxima, pasando de este punto las mezclas nuevamente bajan su calidad al aumentar la temperatura esto es debido a que el cemento se sobrecalienta, se evapora y pierde sus propiedades.

La curva nos muestra que a partir de temperaturas mayores a 160°C comienza a descender es decir que a temperaturas mayores y menores a 160 °C la mezcla tiene otro comportamiento llegando a ser sus densidades menores lo cual influirá en la calidad del pavimento.

De acuerdo a la gráfica se puede observar que la densidad máxima de 2,390 gr/cm³ es a los 160°C llegando a ser esta temperatura la más adecuada para obtener la mejor densidad.

Se evidencia que a la temperatura de 160° C la densidad es máxima porque ahí se obtiene el menor porcentaje de vacíos.

4.2.2.6.2. Análisis estadístico de % de vacíos en la mezcla (Vv).

Con los resultados obtenidos de % de Vacíos en la mezcla (Vv) de la tabla 4,31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla 4.37: Depuración de datos de % de vacíos en la mezcla (Vv).

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	4,866	4,877 - 2,967	No depurado
2	2,832	4,877 - 2,967	Depurado
3	5,240	4,877 - 2,967	Depurado
4	7,120	4,877 - 2,967	Depurado
5	5,260	4,877 - 2,967	Depurado
6	2,917	4,877 - 2,967	Depurado
7	4,681	4,877 - 2,967	No depurado
8	4,842	4,877 - 2,967	No depurado
9	4,785	4,877 - 2,967	No depurado
10	4,350	4,877 - 2,967	No depurado

11	2,031	4,877 - 2,967	Depurado
12	4,511	4,877 - 2,967	No depurado
13	4,535	4,877 - 2,967	No depurado
14	3,925	4,877 - 2,967	No depurado
15	3,913	4,877 - 2,967	No depurado
16	4,036	4,877 - 2,967	No depurado
17	3,641	4,877 - 2,967	No depurado
18	4,879	4,877 - 2,967	Depurado
19	3,510	4,877 - 2,967	No depurado
20	3,625	4,877 - 2,967	No depurado
21	3,625	4,877 - 2,967	No depurado
22	2,638	4,877 - 2,967	Depurado
23	3,562	4,877 - 2,967	No depurado
24	3,251	4,877 - 2,967	No depurado
25	3,243	4,877 - 2,967	No depurado
26	3,225	4,877 - 2,967	No depurado
27	4,879	4,877 - 2,967	Depurado
28	3,225	4,877 - 2,967	No depurado
29	3,334	4,877 - 2,967	No depurado
30	3,397	4,877 - 2,967	No depurado
31	3,896	4,877 - 2,967	No depurado
32	3,559	4,877 - 2,967	No depurado
33	3,256	4,877 - 2,967	No depurado
34	2,847	4,877 - 2,967	Depurado
35	4,143	4,877 - 2,967	No depurado
36	3,626	4,877 - 2,967	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos del % de Vacíos en la mezcla (Vv) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.38: % de vacíos en la mezcla (Vv) promedio con datos no depurados.

N°	Datos	% Vacíos en la mezcla (Vv)
1	4,866	
2	-	
3	-	4,866
4	-	
5	-	
6	-	-
7	4,681	
8	4,842	
9	4,785	4,769
10	4,350	
11	-	
12	4,511	4,431
13	4,535	
14	3,925	
15	3,913	4,124
16	4,036	
17	3,641	
18	-	3,839
19	3,510	
20	3,625	
21	3,625	3,587
22	-	
23	3,562	
24	3,251	3,41
25	3,243	
26	3,225	
27	-	3,234
28	3,225	
29	3,334	
30	3,397	3,319
31	3,896	
32	3,559	
33	3,256	3,57
34	-	
35	4,143	
36	3,626	3,88

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de % de Vacíos en la mezcla (Vv) a diferentes temperaturas de compactación.

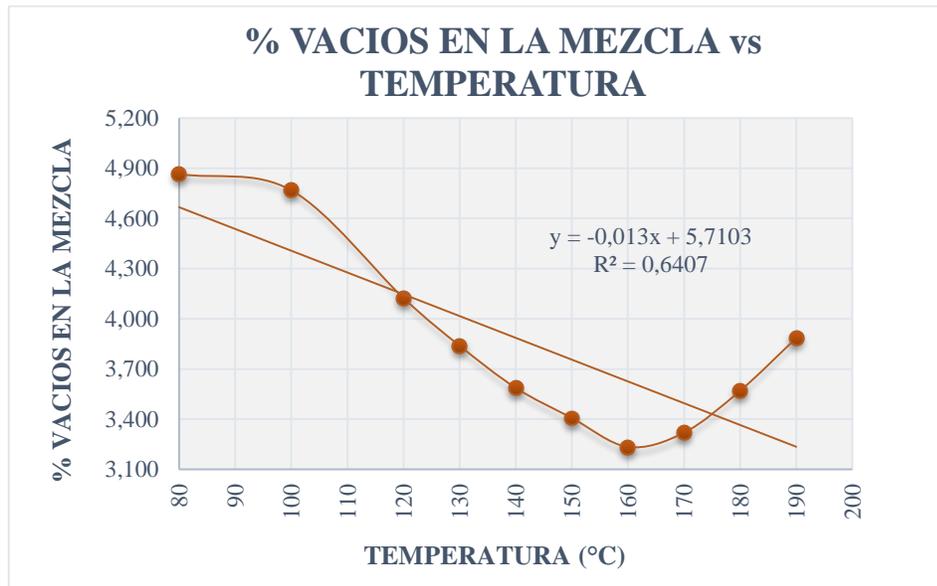
Tabla N° 4.39: Resultados finales de % de vacíos en la mezcla (Vv).

Temperatura (°C)	% Vacíos en la mezcla (Vv)
80	4,866
90	-
100	4,769
110	-
120	4,124
130	3,839
140	3,587
150	3,407
160	3,234
170	3,319
180	3,570
190	3,885

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica % DE VACIOS EN LA MEZCLA VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento del % de vacíos en la mezcla a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.15: % de vacíos de la mezcla Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

La grafica 4.15 nos muestra que la temperatura afecta la condición del % de vacíos en la mezcla, es decir, en temperaturas bajas y altas al ser la densidad menor a la máxima genera mayor porcentaje de vacíos mientras que en temperaturas de máxima densidad se consigue menor % de vacíos.

Se observa que todos los valores de porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada se encuentran en el rango de 3% y 5% según establece la norma AASTHO, eso nos asegura una buena densificación en la mezcla.

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22), un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar con facilidad el agua y el aire al pavimento y causar deterioro en el mismo también causa endurecimiento y envejecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración por otro lado la densidad y el contenido de vacíos están

directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla lo cual nos garantiza que a la máxima densidad se obtiene una mejor mezcla.

Se puede ver en la gráfica que a temperaturas menores el porcentaje de vacíos es mayor esto es debido a que al no ser tan fluido el asfalto no llega a mezclarse bien con el agregado.

Se puede observar que el porcentaje de vacíos menor es 3,234 en la temperatura de 160°C esto nos garantiza que a esa temperatura existirá mayor durabilidad de un pavimento asfáltico, por lo tanto entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla y menos frágil esto se puede corroborar en el manual del instituto de asfaltos (MS – 22) pág. 58.

4.2.2.6.3. Análisis estadístico de % de vacíos de agregado mineral (V.A.M.).

Con los resultados obtenidos de % de Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M.) de la tabla 4,31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N°4.40: Depuración de datos de % de vacíos de agregado mineral.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	17,383	17,418 - 15,576	No depurado
2	15,350	17,418 - 15,576	Depurado
3	17,757	17,418 - 15,576	Depurado
4	19,621	17,418 - 15,576	Depurado
5	17,761	17,418 - 15,576	Depurado
6	15,418	17,418 - 15,576	Depurado
7	17,139	17,418 - 15,576	No depurado
8	17,299	17,418 - 15,576	No depurado
9	17,242	17,418 - 15,576	No depurado
10	16,957	17,418 - 15,576	No depurado
11	14,637	17,418 - 15,576	Depurado

12	17,118	17,418 - 15,576	No depurado
13	17,077	17,418 - 15,576	No depurado
14	16,467	17,418 - 15,576	No depurado
15	16,454	17,418 - 15,576	No depurado
16	16,570	17,418 - 15,576	No depurado
17	16,175	17,418 - 15,576	No depurado
18	17,419	17,418 - 15,576	Depurado
19	16,123	17,418 - 15,576	No depurado
20	16,237	17,418 - 15,576	No depurado
21	16,237	17,418 - 15,576	No depurado
22	15,307	17,418 - 15,576	Depurado
23	16,231	17,418 - 15,576	No depurado
24	15,920	17,418 - 15,576	No depurado
25	15,831	17,418 - 15,576	No depurado
26	15,812	17,418 - 15,576	No depurado
27	17,461	17,418 - 15,576	Depurado
28	15,873	17,418 - 15,576	No depurado
29	15,981	17,418 - 15,576	No depurado
30	16,044	17,418 - 15,576	No depurado
31	16,511	17,418 - 15,576	No depurado
32	16,173	17,418 - 15,576	No depurado
33	15,840	17,418 - 15,576	No depurado
34	15,465	17,418 - 15,576	Depurado
35	16,762	17,418 - 15,576	No depurado
36	16,245	17,418 - 15,576	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos del % Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.41: % de vacíos de agregado mineral promedio con datos no depurados.

N°	Datos	% (V.A.M)
1	17,383	
2	-	
3	-	17,383
4	-	
5	-	
6	-	-
7	17,139	
8	17,299	
9	17,242	17,227
10	16,957	
11	-	
12	17,118	17,038
13	17,077	
14	16,467	
15	16,454	16,666
16	16,570	
17	16,175	
18	-	16,373
19	16,123	
20	16,237	
21	16,237	16,199
22	-	
23	16,231	
24	15,920	16,076
25	15,831	
26	15,812	
27	-	15,822
28	15,873	
29	15,981	
30	16,044	15,966
31	16,511	
32	16,173	
33	15,840	16,175
34	-	
35	16,762	
36	16,245	16,504

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de % de Vacíos de Agregado Mineral a diferentes temperaturas de compactación.

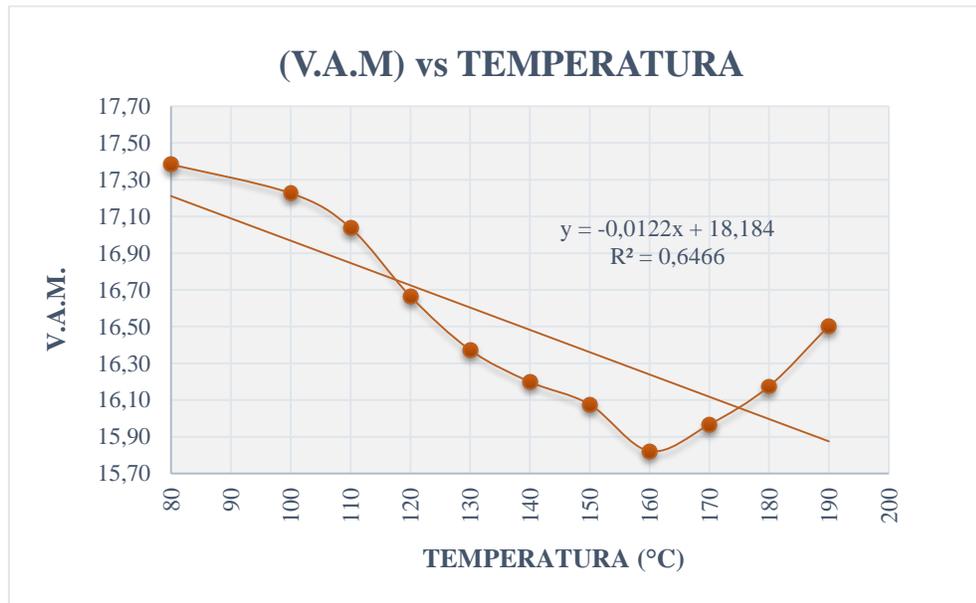
Tabla N° 4.42: Resultados finales de % de vacíos de agregado mineral.

Temperatura (°C)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)
80	17,383
90	-
100	17,227
110	17,038
120	16,666
130	16,373
140	16,199
150	16,076
160	15,822
170	15,966
180	16,175
190	16,504

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica % DE VACIOS DE AGREGADO MINERAL VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento del % de vacíos de agregado mineral a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.16: % de vacíos de agregado mineral Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Se verifica que el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM) es mayor a 14 % como indica la norma ASTM.

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22) pág. 58, cuanto mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. Una mezcla con alto contenido de VAM es muy viscosa, difícil de manejar, poco durable y una mezcla con bajo contenido de VAM es tierna y altamente permeable (Pag.64).

Relacionando las gráficas de VAM y % de vacíos de la mezcla se observa que éstas son proporcionales entre sí a medida que aumenta el porcentaje de vacíos aumenta el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

El % de vacíos de agregado mineral (VAM) más adecuado se considera a los 160°C donde el valor del VAM es de 15,822 % porque a esa temperatura se obtuvo una mejor mezcla con mayor trabajabilidad, compactación y densidad máxima.

4.2.2.6.4. Análisis estadístico de relación betumen vacíos (R.B.V.).

Con los resultados obtenidos de la Relación betumen vacíos (R.B.V.) de la tabla 4.31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.43: Depuración de datos de relación betumen vacíos (R.B.V.).

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	72,009	80,773 - 72,156	Depurado
2	81,548	80,773 - 72,156	Depurado
3	70,491	80,773 - 72,156	Depurado
4	63,714	80,773 - 72,156	Depurado
5	70,387	80,773 - 72,156	Depurado
6	81,084	80,773 - 72,156	Depurado
7	72,686	80,773 - 72,156	No depurado
8	72,011	80,773 - 72,156	Depurado
9	72,250	80,773 - 72,156	No depurado
10	74,344	80,773 - 72,156	No depurado
11	86,126	80,773 - 72,156	Depurado
12	73,646	80,773 - 72,156	No depurado
13	73,646	80,773 - 72,156	No depurado
14	76,164	80,773 - 72,156	No depurado
15	76,222	80,773 - 72,156	No depurado
16	75,645	80,773 - 72,156	No depurado
17	77,492	80,773 - 72,156	No depurado
18	71,999	80,773 - 72,156	Depurado
19	78,227	80,773 - 72,156	No depurado
20	77,675	80,773 - 72,156	No depurado

21	77,677	80,773 - 72,156	No depurado
22	82,767	80,773 - 72,156	Depurado
23	78,054	80,773 - 72,156	No depurado
24	79,582	80,773 - 72,156	No depurado
25	79,511	80,773 - 72,156	No depurado
26	79,605	80,773 - 72,156	No depurado
27	72,084	80,773 - 72,156	Depurado
28	79,679	80,773 - 72,156	No depurado
29	79,139	80,773 - 72,156	No depurado
30	78,827	80,773 - 72,156	No depurado
31	76,400	80,773 - 72,156	No depurado
32	77,994	80,773 - 72,156	No depurado
33	79,486	80,773 - 72,156	No depurado
34	81,591	80,773 - 72,156	Depurado
35	75,282	80,773 - 72,156	No depurado
36	77,678	80,773 - 72,156	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Relación betumen vacíos (R.B.V.) que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.44: Relación betumen vacíos promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Relación betumen vacíos (R.B.V.)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	-	
6	-	-
7	72,686	
8	-	
9	72,250	72,468

10	74,344	
11	-	
12	73,646	73,995
13	73,646	
14	76,164	
15	76,222	75,344
16	75,645	
17	77,492	
18	-	76,569
19	78,227	
20	77,675	
21	77,677	77,860
22	-	
23	78,054	
24	79,582	78,818
25	79,511	
26	79,605	
27	-	79,558
28	79,679	
29	79,139	
30	78,827	79,215
31	76,400	
32	77,994	
33	79,486	77,960
34	-	
35	75,282	
36	77,678	76,480

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados la Relación betumen vacíos a diferentes temperaturas de compactación.

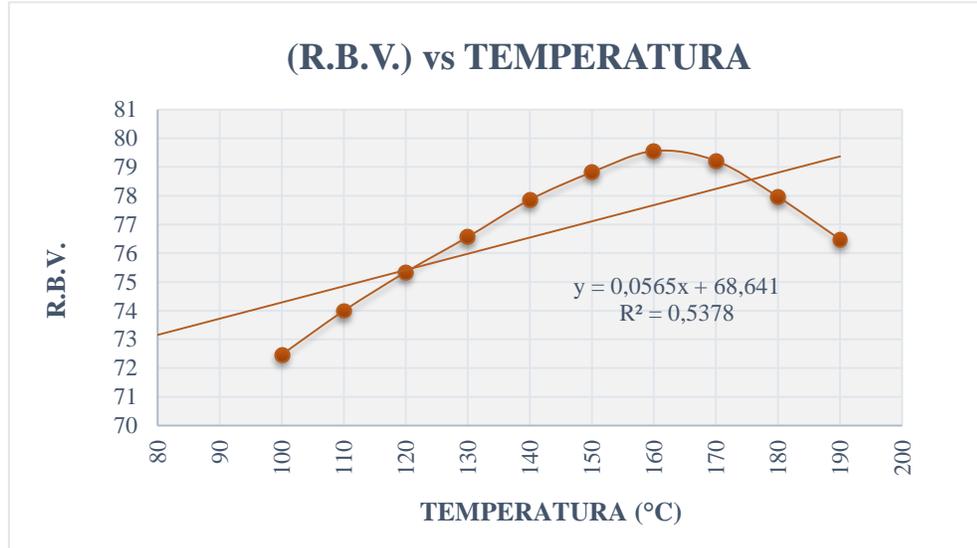
Tabla N° 4.45: Resultados finales de la relación betumen vacíos.

Temperatura (°C)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)
80	-
90	-
100	72,468
110	73,995
120	75,344
130	76,569
140	77,860
150	78,818
160	79,558
170	79,215
180	77,960
190	76,480

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica R.B.V. VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la R.B.V. a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.17: R.B.V. Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.17 se puede observar que a temperaturas bajas y altas los vacíos llenos de asfalto son menores.

La relación betumen – vacíos (R.B.V.) está dentro de las especificaciones cuyo rango es de 70 - 85% esto nos garantiza que los vacíos están ocupados por cemento asfáltico y lograra la adhesión entre asfalto y partículas del esqueleto mineral de la mezcla con mayor consistencia de acuerdo a lo estipulado en el Manual del Instituto de Asfaltos.

4.2.2.6.5. Análisis estadístico de la estabilidad.

Con los resultados obtenidos de la Estabilidad de la tabla 4.31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N° 4.46: Depuración de datos de la estabilidad.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	2059,150	4331,687 - 2710,813	Depurado
2	2065,280	4331,687 - 2710,813	Depurado
3	2101,890	4331,687 - 2710,813	Depurado
4	2269,900	4331,687 - 2710,813	Depurado
5	2223,710	4331,687 - 2710,813	Depurado
6	2459,500	4331,687 - 2710,813	Depurado
7	2964,140	4331,687 - 2710,813	No depurado
8	2591,970	4331,687 - 2710,813	Depurado
9	2478,910	4331,687 - 2710,813	Depurado
10	2921,160	4331,687 - 2710,813	No depurado
11	3117,860	4331,687 - 2710,813	No depurado
12	3235,300	4331,687 - 2710,813	No depurado
13	3519,110	4331,687 - 2710,813	No depurado
14	3466,570	4331,687 - 2710,813	No depurado
15	2962,200	4331,687 - 2710,813	No depurado
16	3783,060	4331,687 - 2710,813	No depurado
17	3762,790	4331,687 - 2710,813	No depurado
18	3520,790	4331,687 - 2710,813	No depurado
19	3914,240	4331,687 - 2710,813	No depurado
20	3843,420	4331,687 - 2710,813	No depurado
21	4013,320	4331,687 - 2710,813	No depurado
22	4405,450	4331,687 - 2710,813	Depurado
23	4052,700	4331,687 - 2710,813	No depurado
24	4356,140	4331,687 - 2710,813	Depurado
25	4682,420	4331,687 - 2710,813	Depurado
26	4223,830	4331,687 - 2710,813	No depurado
27	4483,160	4331,687 - 2710,813	Depurado
28	4425,210	4331,687 - 2710,813	Depurado
29	4493,430	4331,687 - 2710,813	Depurado
30	4169,430	4331,687 - 2710,813	No depurado
31	4187,380	4331,687 - 2710,813	No depurado
32	4371,080	4331,687 - 2710,813	Depurado
33	3914,240	4331,687 - 2710,813	No depurado
34	3861,530	4331,687 - 2710,813	No depurado
35	4084,700	4331,687 - 2710,813	No depurado
36	3780,030	4331,687 - 2710,813	No depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Estabilidad que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.47: Estabilidad promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Estabilidad promedio (libras)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	-	
6	-	-
7	2964,140	
8	-	
9	-	2964,14
10	2921,160	
11	3117,860	
12	3235,300	3091,44
13	3519,110	
14	3466,570	
15	2962,200	3315,96
16	3783,060	
17	3762,790	
18	3520,790	3688,88
19	3914,240	
20	3843,420	
21	4013,320	3923,66
22	-	
23	4052,700	
24	-	4052,70
25	-	
26	4223,830	
27	-	4223,830
28	-	
29	-	
30	4169,430	4169,43
31	4187,380	
32	-	
33	3914,000	4050,69
34	3843,000	
35	4084,700	
36	3762,000	3896,57

Tabla de resultados la estabilidad a diferentes temperaturas de compactación.

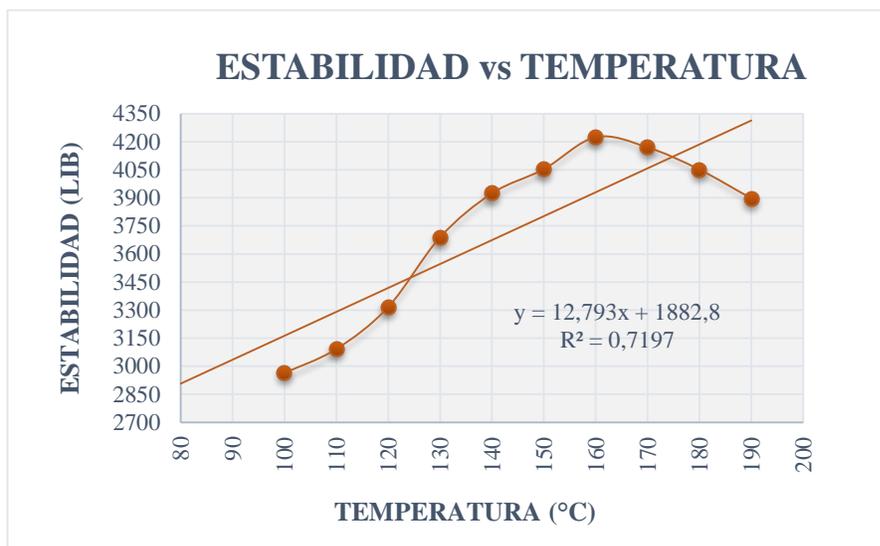
Tabla N° 4.48: Resultados finales de la estabilidad.

Temperatura (°C)	Estabilidad (libras)
80	-
90	-
100	2964,140
110	3091,440
120	3315,960
130	3688,880
140	3923,660
150	4052,700
160	4223,830
170	4169,430
180	4050,690
190	3896,567

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica ESTABILIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la Estabilidad a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.18: Estabilidad Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo que explica el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N°22 (MS -22) pág. 61, los valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto, menos durable que lo deseado y una mezcla con estabilidad baja produce baja resistencia en la compactación, ondulación, ahuellamiento y canalización.

En la gráfica 4.18 lo que se muestra con los resultados de estabilidad a diferentes temperaturas (80 a 190 °C) es que el valor de la estabilidad sube mientras la temperatura aumente hasta llegar a una máxima de 4223,830 libras luego comienza a descender, esto nos demuestra que a temperaturas bajas y altas la estabilidad tiene valores menores y en una temperatura promedio que es a los 160°C se obtiene la estabilidad máxima y más recomendable esto es debido a que en ese punto se tiene una buena mezcla con la mejor condición de estabilidad y es concordante con las otras características (densidad máxima y menor porcentaje de vacíos), tiene mayor resistencia, trabajabilidad y mejor compactación.

En la curva de estabilidad vs temperatura se puede apreciar que hay un quiebre suave y no existe mucha variación en la estabilidad en la temperatura 160 a 170 °C comportándose como una recta, esto quiere decir que a estas temperaturas no hay mucha variación en sus propiedades.

4.2.2.6.6. Análisis estadístico de la fluencia.

Con los resultados obtenidos de la Fluencia de la tabla 4.31 y el rango superior e inferior de la tabla 4.33 se procede a una depuración de datos para observar la confiabilidad y validez de estos.

Tabla N ° 4.49: Depuración de datos de la fluencia.

N°	Datos	Rangos	Datos depurados
1	9,000	16,164 - 10,725	Depurado
2	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
3	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
4	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
5	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
6	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
7	10,000	16,164 - 10,725	Depurado
8	11,000	16,164 - 10,725	No depurado
9	11,000	16,164 - 10,725	No depurado
10	11,000	16,164 - 10,725	No depurado
11	12,000	16,164 - 10,725	No depurado
12	11,000	16,164 - 10,725	No depurado
13	13,000	16,164 - 10,725	No depurado
14	12,000	16,164 - 10,725	No depurado
15	12,000	16,164 - 10,725	No depurado
16	13,000	16,164 - 10,725	No depurado
17	12,000	16,164 - 10,725	No depurado

18	14,000	16,164 - 10,725	No depurado
19	13,000	16,164 - 10,725	No depurado
20	14,000	16,164 - 10,725	No depurado
21	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
22	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
23	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
24	14,000	16,164 - 10,725	No depurado
25	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
26	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
27	16,000	16,164 - 10,725	No depurado
28	15,000	16,164 - 10,725	No depurado
29	16,000	16,164 - 10,725	No depurado
30	16,000	16,164 - 10,725	No depurado
31	17,000	16,164 - 10,725	Depurado
32	16,000	16,164 - 10,725	No depurado
33	17,000	16,164 - 10,725	Depurado
34	18,000	16,164 - 10,725	Depurado
35	17,000	16,164 - 10,725	Depurado
36	19,000	16,164 - 10,725	Depurado

Fuente: Elaboración propia.

Después de depurar los datos de la Fluencia que no se encontraban dentro del rango establecido se realizó el promedio de cada temperatura solo con los datos no depurados para obtener los resultados finales como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.50: Fluencia promedio con datos no depurados.

N°	Datos	Fluencia promedio (0,01 pulg)
1	-	
2	-	
3	-	-
4	-	
5	-	
6	-	-
7	-	

8	11,000	
9	11,000	11,000
10	11,000	
11	12,000	
12	11,000	11,330
13	13,000	
14	12,000	
15	12,000	12,330
16	13,000	
17	12,000	
18	14,000	13,000
19	13,000	
20	14,000	
21	15,000	14,000
22	15,000	
23	15,000	
24	14,000	14,670
25	15,000	
26	15,000	
27	16,000	15,330
28	15,000	
29	16,000	
30	16,000	15,670
31	-	
32	16,000	
33	-	16,000
34	-	
35	-	
36	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de resultados de la Fluencia a diferentes temperaturas de compactación.

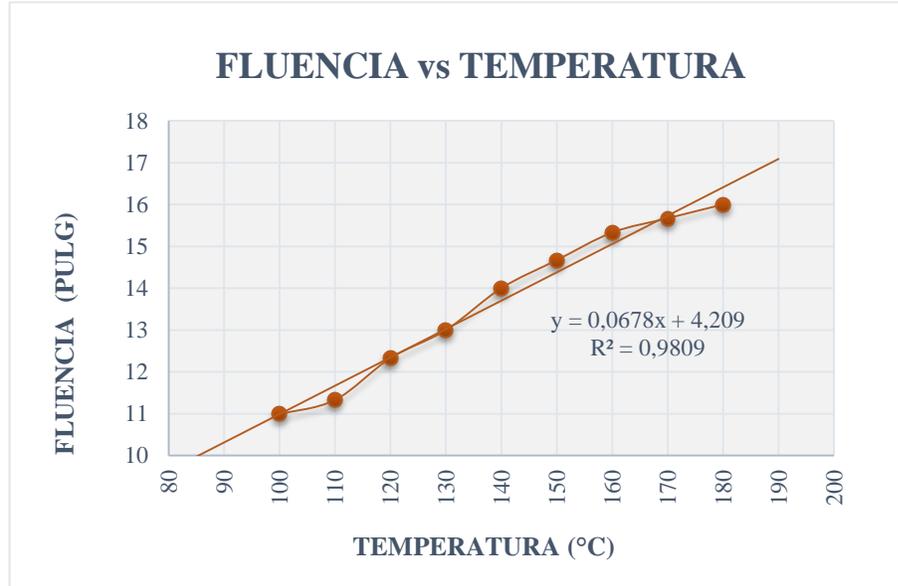
Tabla N° 4.51: Resultados finales de la fluencia.

Temperatura (°C)	Fluencia (0,01 Pulg)
80	-
90	-
100	11,000
110	11,330
120	12,330
130	13,000
140	14,000
150	14,670
160	15,330
170	15,670
180	16,000
190	-

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados finales se realizó la gráfica ESTABILIDAD VS TEMPERATURA DE COMPACTACION para ver gráficamente el comportamiento de la fluencia a medida que la temperatura va aumentando.

Grafica N° 4.19: Fluencia Vs. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

De la curva FLUENCIA VS TEMPERATURA se puede observar que a mayor temperatura se deforma más.

En el manual del instituto de asfaltos, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Serie de manuales N°22 (MS -22) pag 77 nos explica que en las temperaturas de la mezcla que tienen valores bajos de fluencia son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio y aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

En estas mezclas modificadas se puede ver que todos los puntos están dentro del rango de fluencia establecido por la NORMA AASHTO T-245 que es de 10 a 16 (0,01 pulg) esto nos garantiza que las cargas de tráfico no ejercerán deformaciones en el pavimento.

4.2.3. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE EL CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL 85-100 Y CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO 60-85.

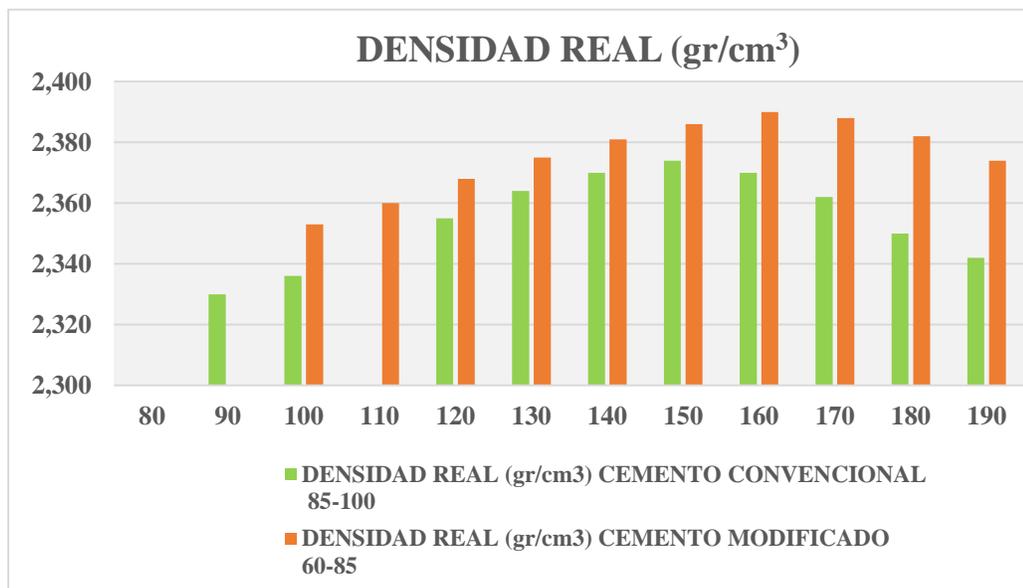
4.2.3.1. Densidad real.

Tabla N°4.52: Resultados de la densidad del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	Densidad real (gr/cm ³)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	-
90	2,330	-
100	2,336	2,353
110	-	2,360
120	2,355	2,368
130	2,364	2,375
140	2,370	2,381
150	2,374	2,386
160	2,370	2,390
170	2,362	2,388
180	2,350	2,382
190	2,342	2,374

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.20: Grafica comparativa de la densidad.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica comparativa 4.20 se puede ver la diferencia del grado de desempeño entre el cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado con respecto a las diferentes temperaturas, los mayores valores de densidad se presentan para este último tipo de ligante, lo que indica que el asfalto modificado tendrá mejores condiciones en su grado de solidez debido a que tiene un menor porcentaje de vacíos que el asfalto convencional. De acuerdo a lo que indica el autor Fernando Andres Wulf Rodriguez en la tesis “Análisis de Pavimento Asfáltico Modificado con Polímeros”.

La densidad máxima del asfalto convencional no es en la misma temperatura que el asfalto modificado esto es debido a que cada asfalto actúa diferente a la susceptibilidad térmica, el asfalto convencional tiene su densidad máxima a los 150°C y el modificado a los 160°C, es en esos puntos donde cada asfalto consigue su mejor proceso de elaboración de la mezcla.

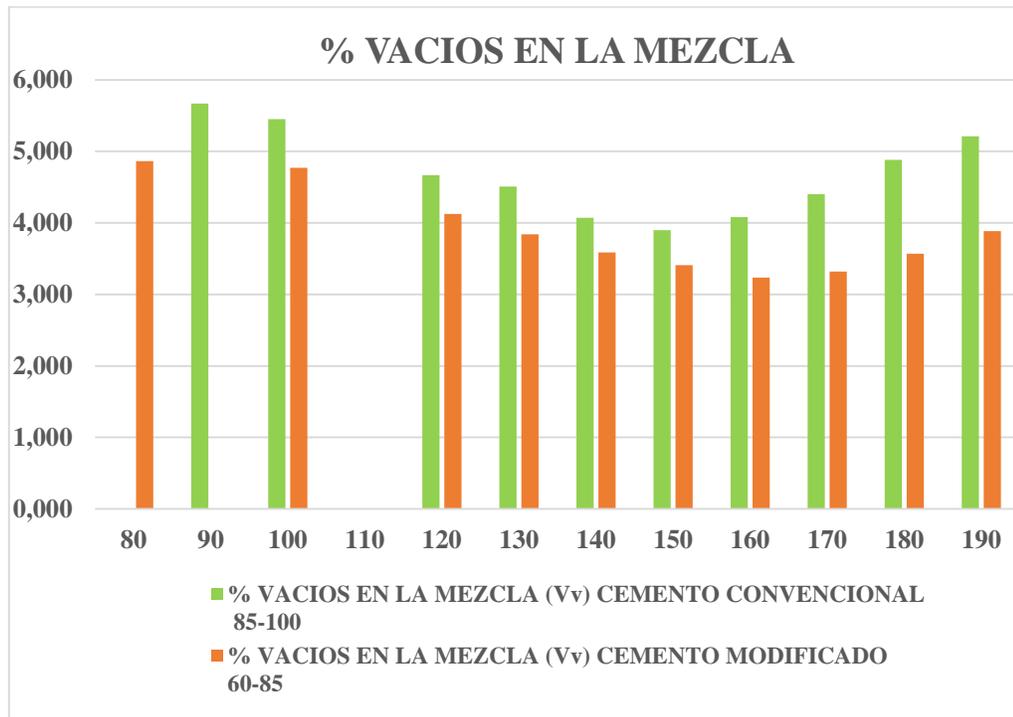
4.2.3.2. % vacíos en la mezcla (Vv).

Tabla N° 4.53: Resultados del % de vacíos en la mezcla del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	% Vacíos en la mezcla (Vv)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	4,866
90	5,670	-
100	5,450	4,769
110	-	-
120	4,670	4,124
130	4,510	3,839
140	4,070	3,587
150	3,900	3,407
160	4,080	3,234
170	4,400	3,319
180	4,880	3,570
190	5,210	3,885

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.21: Grafica comparativa del % de vacíos en la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de comparación presentados en la tabla 4.21 se puede observar que las briquetas elaboradas con cemento modificado tienen menos porcentaje de vacíos en las mezclas que las que se elaboraron con cemento convencional por lo tanto en todos los puntos cumple con las especificaciones técnicas de la Norma AASHTO y ABC que indica que los valores están entre 3 - 5 % y el valor mínimo de porcentaje de vacíos es a los 160°C es por eso que en ese punto se tiene una mejor mezcla porque se tendrá una mejor adherencia entre el agregado y el cemento.

Con este análisis de comparación se puede corroborar que las mezclas asfálticas modificadas son de mayor calidad que las mezclas asfálticas convencionales.

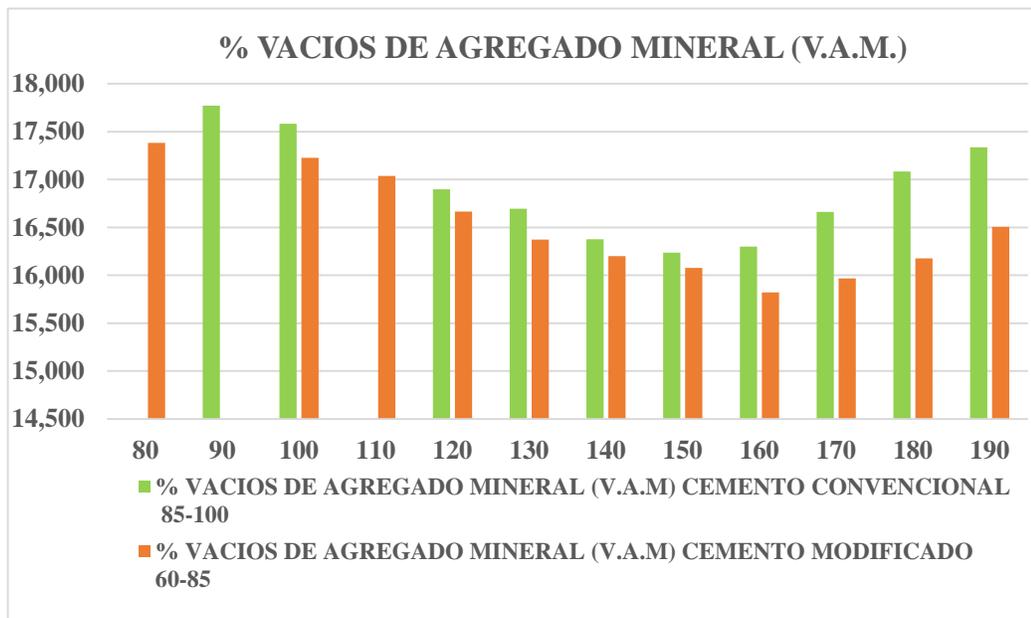
4.2.3.3. % vacíos de agregado mineral (V.A.M).

Tabla N° 4.54: Resultados del % de vacíos de agregado mineral del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	17,383
90	17,770	-
100	17,583	17,227
110	-	17,038
120	16,897	16,666
130	16,695	16,373
140	16,377	16,199
150	16,235	16,076
160	16,300	15,822
170	16,663	15,966
180	17,083	16,175
190	17,335	16,504

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.22: Grafica comparativa del % de vacíos del agregado mineral.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos del porcentaje de vacíos del agregado mineral se puede observar que el asfalto modificado tiene menor porcentaje de vacíos del agregado mineral comparando con los valores del asfalto convencional y al tener menor porcentaje nos garantiza que esta mezcla es mejor que la convencional porque el asfalto cubre más las partículas de agregado y por lo tanto la mezcla es más durable.

El porcentaje de vacíos del agregado mineral varia con respecto a la temperatura, en las máximas y mínimas el VAM es mayor y en temperaturas intermedias es donde ambos cementos obtienen su mejor valor, es decir el menor.

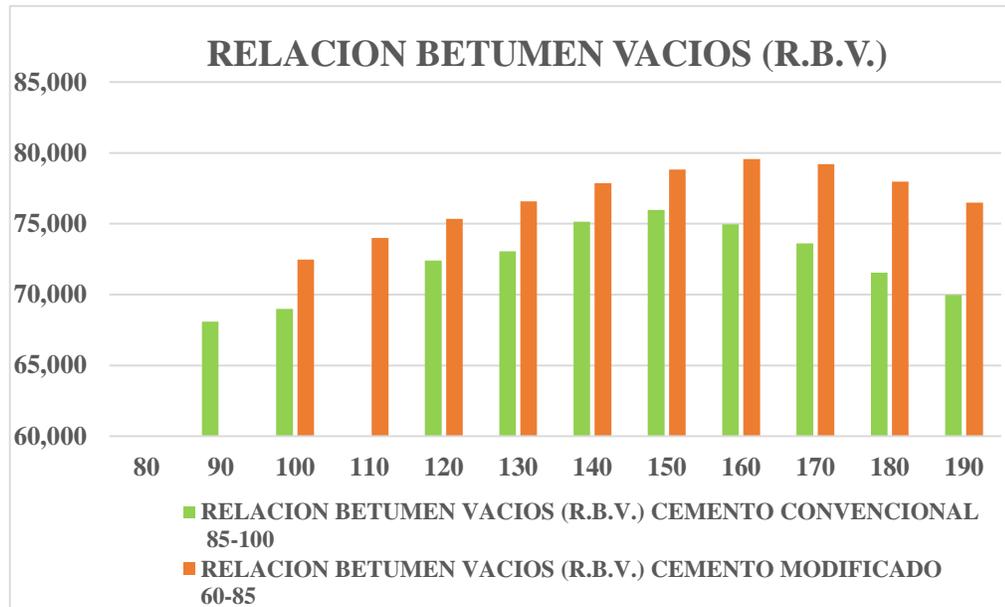
4.2.3.4. Relación betumen vacíos (R.B.V.).

Tabla N° 4.55: Resultados de la relación betumen vacíos del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	-
90	68,090	-
100	68,997	72,468
110	-	73,995
120	72,400	75,344
130	73,050	76,569
140	75,140	77,860
150	75,963	78,818
160	74,965	79,558
170	73,603	79,215
180	71,537	77,960
190	69,965	76,480

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.23: Grafica comparativa de la relación betumen vacíos.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede evidenciar que los valores de la relación betumen vacíos (R.B.V.) con respecto a las diferentes temperaturas tiene mejores características el cemento modificado comparando con el cemento convencional y en las temperaturas más altas tiene mejor adherencia entre asfalto y partículas del esqueleto mineral de la mezcla obteniendo su máximo valor a los 160°C.

Ambos cementos cumplen con las especificaciones técnicas de la Norma AASTHO pero el que tiene mejor desempeño en un pavimento es el cemento modificado.

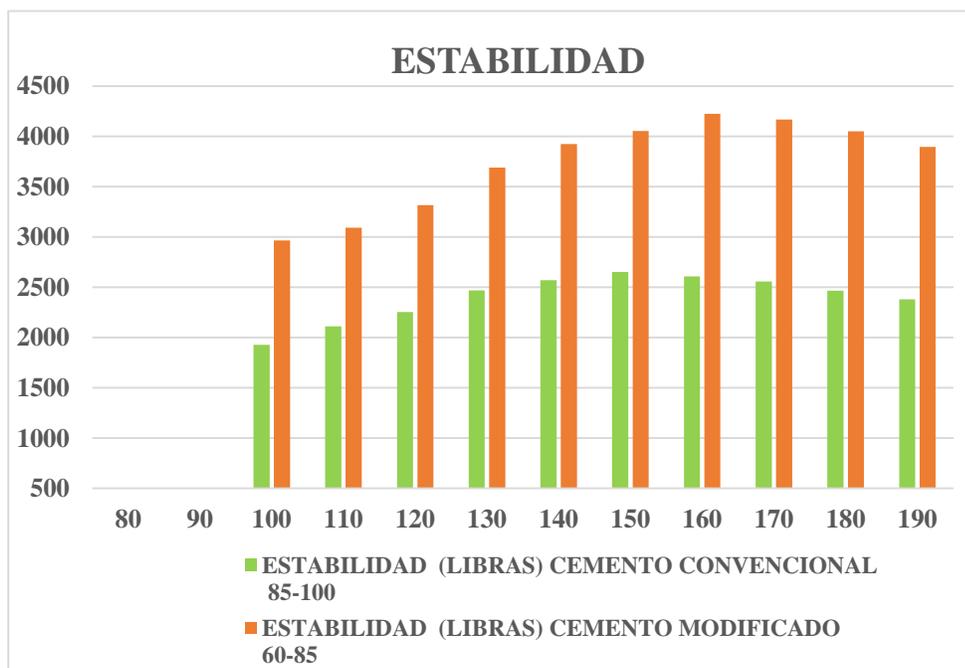
4.2.3.5. Estabilidad (libras).

Tabla N° 4.56: Resultados de la estabilidad del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	Estabilidad (libras)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	-
90	-	-
100	1928,310	2964,140
110	2111,900	3091,440
120	2253,590	3315,960
130	2470,300	3688,880
140	2570,830	3923,660
150	2651,870	4052,700
160	2609,710	4223,830
170	2556,140	4169,430
180	2465,090	4050,690
190	2381,310	3896,567

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.24: Grafica comparativa de la estabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados obtenidos de estabilidad queda demostrado que las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados son considerablemente mayores que las mezclas elaboradas con asfalto convencional, por lo tanto mejoraron su comportamiento ante las cargas del pavimento.

De acuerdo a que va aumentando la temperatura la estabilidad aumenta hasta llegar una máxima pero la mezcla modificada tiene una mejor resistencia a una temperatura mayor a la de la mezcla convencional esto se debe a que un asfalto modificado es más viscoso a temperaturas elevadas.

Como se observó en las pruebas del laboratorio realizadas a ambas mezclas, los asfaltos modificados debido a su alta estabilidad pueden ser sometidos a una carga máxima mayor que el asfalto convencional.

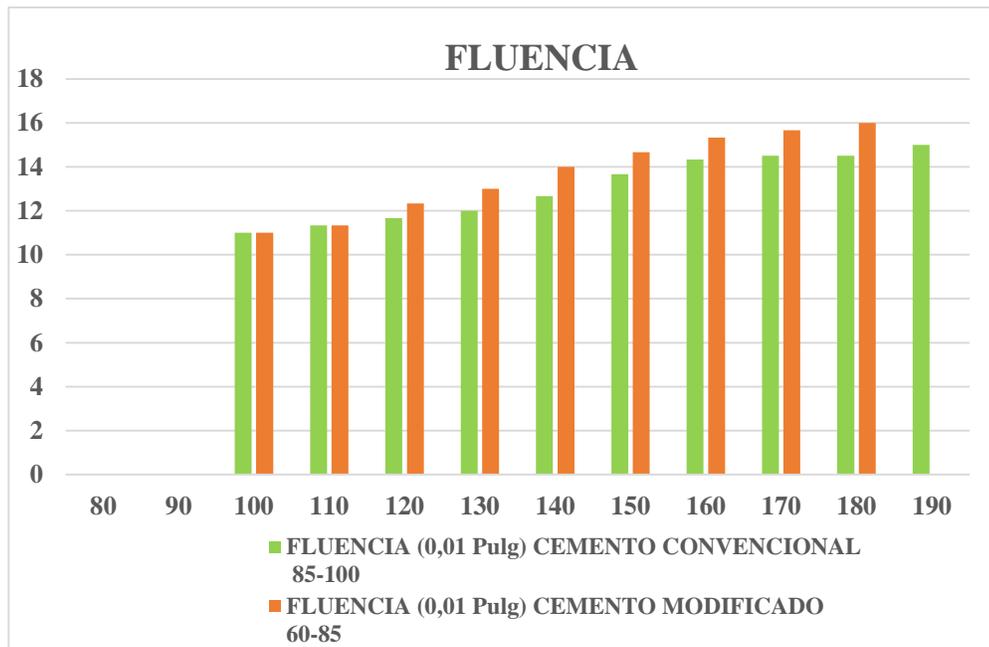
4.2.3.6. Fluencia (0,01 Pulg)

Tabla N° 4.57: Resultados de la fluencia del cemento convencional y modificado.

Temperatura °C	Fluencia (0,01 Pulg)	
	Cemento convencional 85-100	Cemento modificado 60-85
80	-	-
90	-	-
100	11,000	11,000
110	11,330	11,330
120	11,670	12,330
130	12,000	13,000
140	12,670	14,000
150	13,670	14,670
160	14,330	15,330
170	14,500	15,670
180	14,500	16,000
190	15,000	-

Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.25: Grafica comparativa de la fluencia.



Fuente: Elaboración propia.

Por la ubicación de los puntos, se puede ver que se obtuvieron valores de deformación más altos para las probetas elaboradas con cemento asfáltico modificado pero la diferencia con el cemento convencional es muy poca.

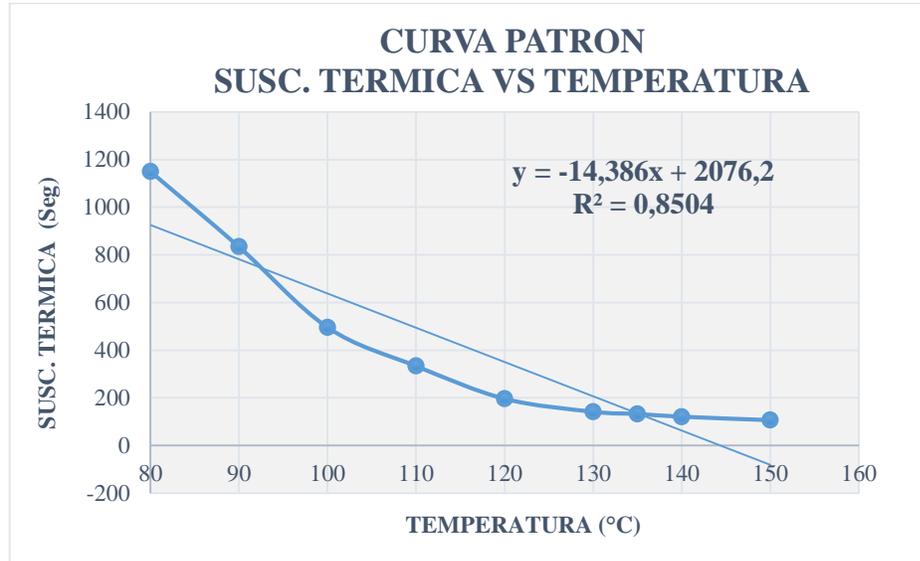
En la gráfica 4.25 se aprecia que la fluencia Marshall de las briquetas realizadas con ambos cementos se comportan directamente proporcional a la temperatura, a mayor temperatura de compactación mayor es la fluencia de la mezcla. Según las especificaciones de la Norma AASHTO y la ABC los valores obtenidos de la fluencia del cemento modificado están dentro de los parámetros de aceptabilidad ya que los valores están entre el rango de 8-16 pulg, en cambio en el cemento convencional tenemos valores que cumple con las especificaciones donde el flujo ideal estaría entre 8-14 pulg pero a partir de los 160°C ya no cumple sobrepasa de los 14 esto es debido que en esas temperaturas el asfalto es demasiado plástico y tienden a deformarse bajo las cargas del tránsito.

Se puede evidenciar que una mezcla modificada tiene mejores condiciones de fluencia a comparación de una mezcla convencional.

4.2.4. ANALISIS ESTADISTICO DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA

4.2.4.1. CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL

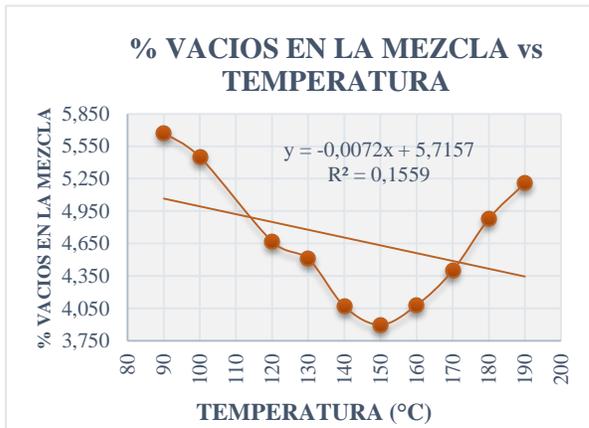
Grafica N° 4.26: Curva de Susceptibilidad térmica VS temperatura.



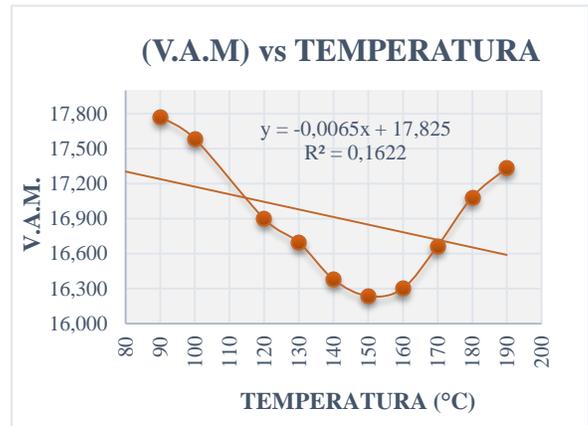
Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.27: Vv VS temperatura

Grafica N° 4.28: (V.A.M) VS temperatura



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación de la curva patrón (La susceptibilidad térmica) con las curvas de las variables dependientes pude observar que tiene la misma tendencia con la curva de % de vacíos de la mezcla y % de vacíos del agregado mineral. Con los valores de estas graficas se hará un análisis estadístico descriptivo e inferencial posteriormente se hará la prueba de la hipótesis.

4.2.4.1.1. Estadística descriptiva e inferencial.

Se trabajara con los siguientes datos:

Tabla N° 4.58: Datos de T, Susc. Térmica, % Vv y % VAM

T (°)	Suscep térmica	% Vv	% VAM
80	1150,19	-	-
90	833,78	5,670	17,770
100	495,59	5,450	17,583
110	333,10	-	-
120	195,84	4,670	16,897
1303	141,36	4,510	16,695
140	132,00	4,070	16,377
150	120,45	3,900	16,235

Fuente: Elaboración propia.

PRUEBA DE NORMALIDAD:

Tabla N° 4.59: Resultados de la prueba de normalidad.

Descriptivos				
			Estadístico	Desv. Error
T (°)	Media		121,670	9,458
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	97,360	
		Límite superior	145,980	
	Media recortada al 5%		121,850	
	Mediana		125,000	
	Varianza		536,667	
	Desv. Desviación		23,166	

	Mínimo		90,000	
	Máximo		150,000	
	Rango		60,000	
	Rango intercuartil		45,000	
	Asimetría		-0,300	0,845
	Curtosis		-1,418	1,741
Susc. térmica	Media		319,837	117,940
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	16,662	
		Límite superior	623,011	
	Media recortada al 5%		302,361	
	Mediana		168,600	
	Varianza		83458,747	
	Desv. Desviación		288,892	
	Mínimo		120,450	
	Máximo		833,780	
	Rango		713,330	
	Rango intercuartil		451,020	
	Asimetría		1,481	0,845
	Curtosis		1,267	1,741
%Vv	Media		4,712	0,293
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,958	
		Límite superior	5,465	
	Media recortada al 5%		4,704	
	Mediana		4,590	
	Varianza		0,515	
	Desv. Desviación		0,718	
	Mínimo		3,900	
	Máximo		5,670	
	Rango		1,770	
	Rango intercuartil		1,480	
	Asimetría		0,386	0,845
	Curtosis		-1,648	1,741
%VAM	Media		16,926	0,257
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	16,266	
		Límite superior	17,586	
	Media recortada al 5%		16,918	
	Mediana		16,796	
	Varianza		0,395	
Desv. Desviación		0,629		

	Mínimo	16,240	
	Máximo	17,770	
	Rango	1,540	
	Rango intercuartil	1,290	
	Asimetría	0,454	0,845
	Curtosis	-1,705	1,741

Fuente: Elaboración propia.

En la prueba de normalidad se puede verificar a través de los valores de significancia, todos los valores son mayores a 0,05 por tanto se puede indicar que todas las variables son normales en la prueba de Shapiro-Wilk que se usa para datos que son menores a 30 excepto Susc. Térmica que tiene un valor menor a 0,05:

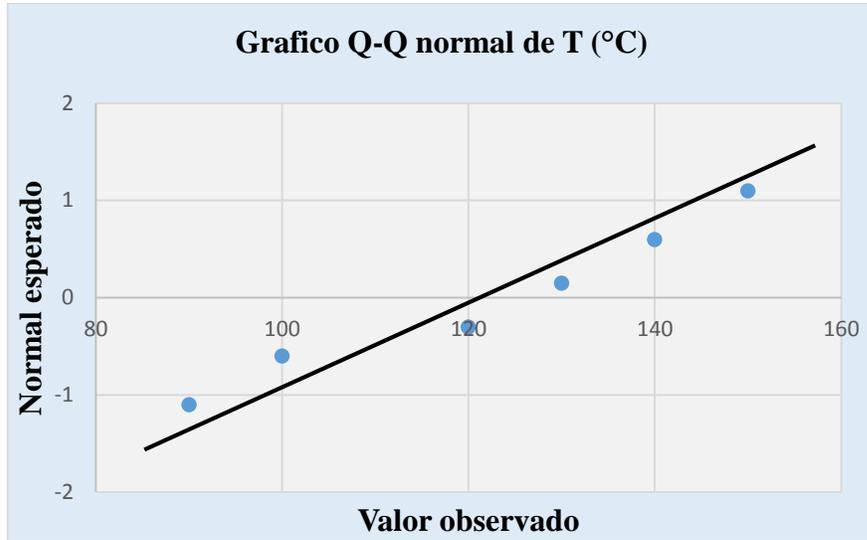
Tabla N° 4.60: Prueba de Kolmogorov y Shapiro.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T (°)	0,159	6,000	0,200*	0,958	6,000	0,801
S. termi	0,333	6,000	0,037	0,766	6,000	0,029
%V_v	0,190	6,000	0,200*	0,920	6,000	0,505
%V_{AM}	0,185	6,000	0,200*	0,913	6,000	0,455
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Fuente: Elaboración propia.

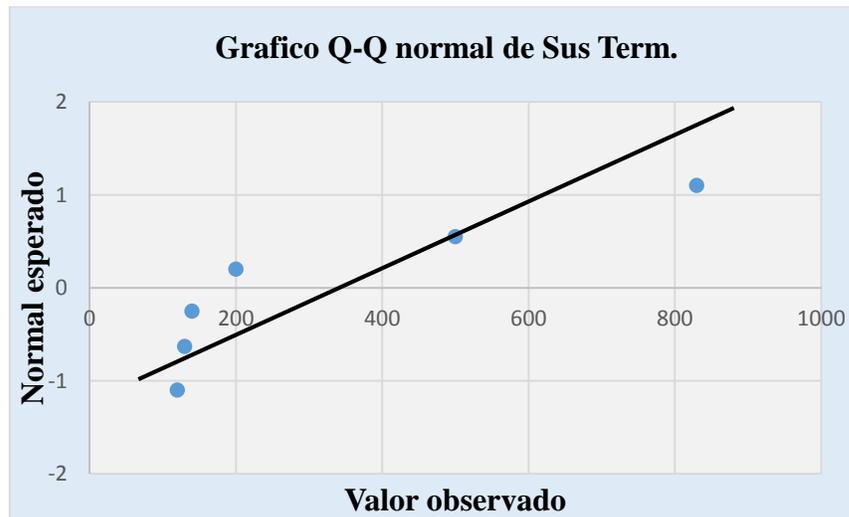
Gráficos para observar la normalidad:

Grafica N° 4.29: Grafico Q-Q normal de T(°).



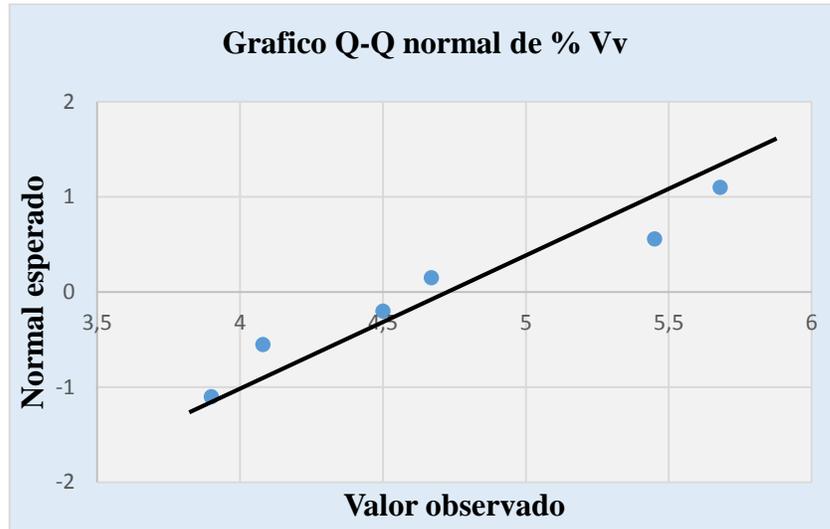
Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.30: Grafico Q-Q normal de Susc Térmica.



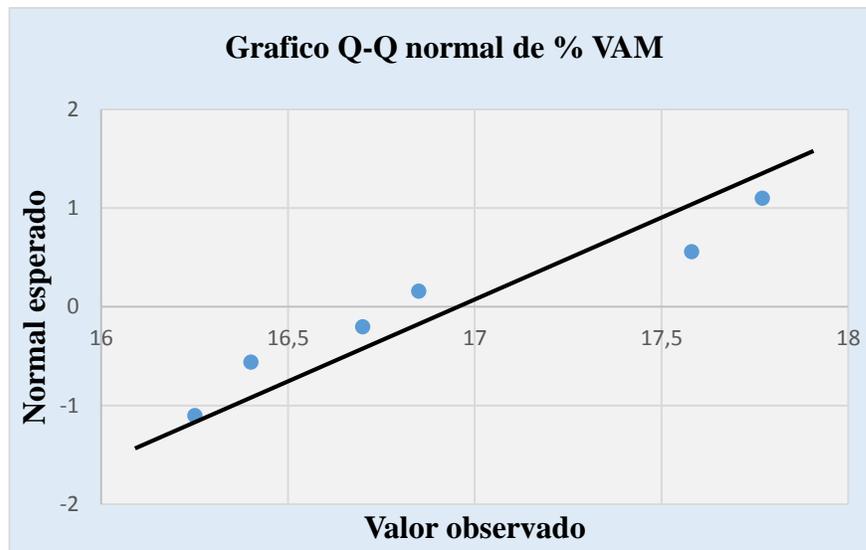
Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.31: Grafico Q-Q normal de % de Vv.



Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.32: Grafico Q-Q normal de % de VAM.



Fuente: Elaboración propia.

REGRESION MULTIPLE:

Tabla N° 4.61: Datos de la estadística descriptiva.

Estadísticos descriptivos			
	Media	Desv. Desviación	N
T (°)	121,670	23,166	6,000
Sus. térmica	319,837	288,892	6,000
%Vv	4,712	0,718	6,000
%VAM	16,926	0,628	6,000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.62: Tabla de correlaciones.

Correlaciones					
		T	Sus. term	%Vv	%VAM
Correlación de Pearson	T (°C)	1,000	-0,910	-0,995	-0,995
	Sus. term	-0,910	1,000	0,912	0,919
	%Vv	-0,995	0,912	1,000	0,999
	%VAM	-0,995	0,919	0,999	1,000
Sig. (unilateral)	T (°C)	.	0,006	0,000	0,000
	Sus. term	0,006	.	0,006	0,005
	%Vv	0,000	0,006	.	0,000
	%VAM	0,000	0,005	0,000	.
N	T (°C)	6,000	6,000	6,000	6,000
	Sus. term	6,000	6,000	6,000	6,000
	%Vv	6,000	6,000	6,000	6,000
	%VAM	6,000	6,000	6,000	6,000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la temperatura tiene una correlación inversa alta con todas las variables analizadas.

Tabla N° 4.63: Tabla de resumen del modelo^b.

Resumen del modelo ^b										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl 1	gl 2	Sig. Cambio en F	
1	0,995 ^a	0,991	0,976	3,563	0,991	69,776	3,000	2,00	0,014	2,999

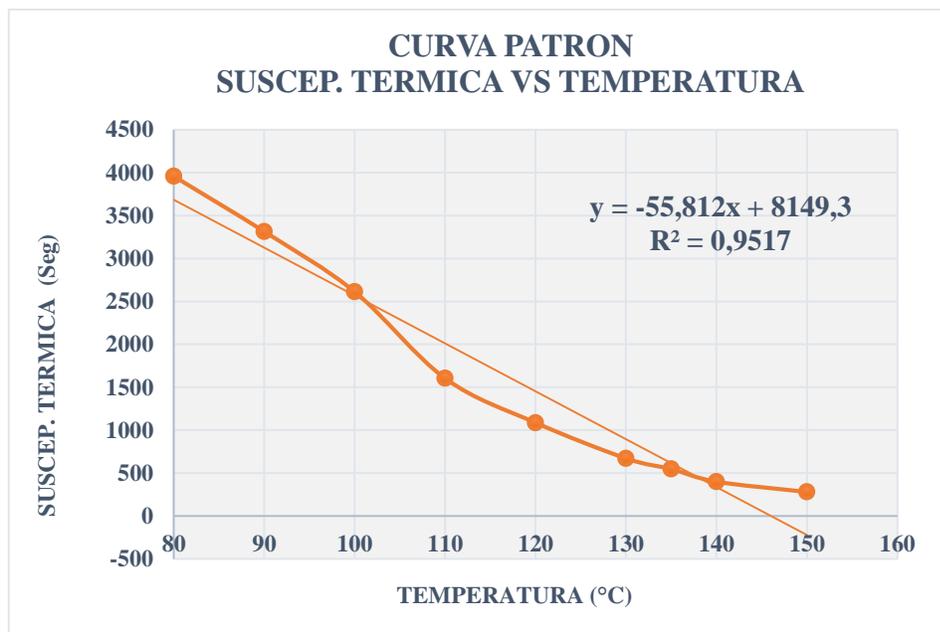
a. Predictores: (Constante), % VAM, Susc térmica, % Vv

b. Variable dependiente: t

Fuente: Elaboración propia.

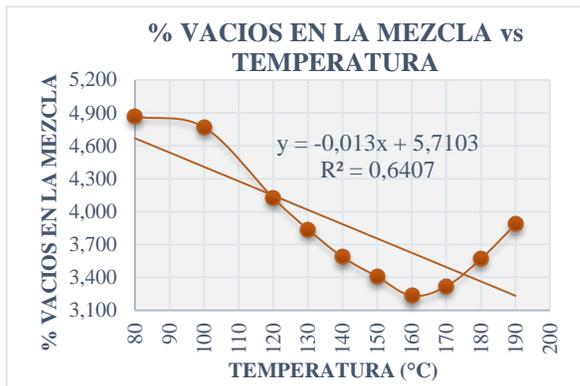
4.2.4.2.CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO

Grafica N° 4.33: Curva de Suscep. Térmica VS temperatura.

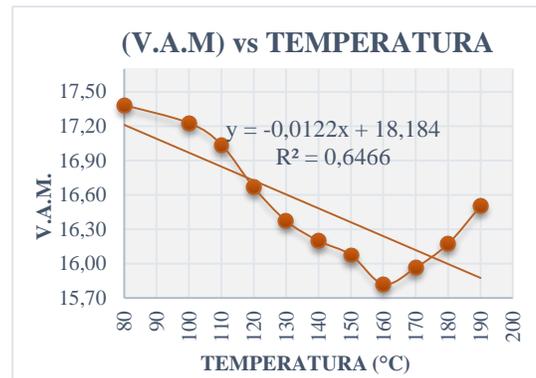


Fuente: Elaboración propia.

Grafica N° 4.34: % Vv. VS temperatura



Grafica N° 4.35: % VAM VS temperatura



Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación de la curva patrón (La susceptibilidad térmica) con las curvas de las variables dependientes pude observar que tiene la misma tendencia con la curva de % de vacíos de la mezcla y % de vacíos del agregado mineral. Con los valores de estas graficas se hará un análisis estadístico descriptivo e inferencial posteriormente se hará la prueba de la hipótesis.

Se trabajara con los siguientes datos:

Tabla N° 4.64: Datos de T, Suscep. Térmica, % Vv y % VAM

T (°)	Suscep térmica	% Vv	% VAM
80	3954,530	4,866	17,380
90	3310,350	-	-
100	2610,350	4,769	17,227
110	1602,190	-	17,038
120	1086,000	4,124	16,666
130	670,720	3,839	16,373
140	399,640	3,587	16,199
150	280,000	3,407	16,076
160	280,000	3,234	15,822

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA DE NORMALIDAD

Tabla N° 4.65: Resultados de la prueba de normalidad.

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Suscept. térmica	Media		1009,342	423,524
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-166,548	
		Límite superior	2185,232	
	Media recortada al 5%		960,916	
	Mediana		670,720	
	Varianza		896861,051	
	Desv. Desviación		947,027	
	Mínimo		280,000	
	Máximo		2610,350	
	Rango		2330,350	
	Rango intercuartil		1508,360	
	Asimetría		1,693	0,913
	Curtosis		2,885	2,000
T (°C)	Media		128,000	8,602
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	104,120	
		Límite superior	151,880	
	Media recortada al 5%		128,330	
	Mediana		130,000	
	Varianza		370,000	
	Desv. Desviación		19,235	
	Mínimo		100,000	
	Máximo		150,000	
	Rango		50,000	
	Rango intercuartil		35,000	
	Asimetría		-0,590	0,913
	Curtosis		-0,022	2,000
%Vv	Media		4,564	0,310
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,703	
		Límite superior	5,425	
	Media recortada al 5%		4,539	
	Mediana		4,510	

	Varianza		0,481	
	Desv. Desviación		0,693	
	Mínimo		3,900	
	Máximo		5,670	
	Rango		1,770	
	Rango intercuartil		1,180	
	Asimetría		1,176	0,913
	Curtosis		1,474	2,000
%VAM	Media		16,757	0,237
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	16,100	
		Límite superior	17,415	
	Media recortada al 5%		16,741	
	Mediana		16,695	
	Varianza		0,281	
	Desv. Desviación		0,530	
	Mínimo		16,240	
	Máximo		17,580	
	Rango		1,350	
	Rango intercuartil		0,930	
	Asimetría		1,030	0,913
	Curtosis		0,894	2,000

Fuente: Elaboración propia

La prueba de normalidad se puede verificar a través de los valores de significancia, todos los valores son mayores a 0,05 por tanto se puede indicar que todas las variables son normales en la prueba de Shapiro-Wilk que se usa para datos que son menores a 30.

Tabla N° 4.66: Prueba de Kolmogorov y Shapiro.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T(°)	0,167	6,000	0,200*	0,960	6,000	0,817
S. Termi	0,278	6,000	0,164	0,843	6,000	0,138
% Vv	0,198	6,000	0,908	6,000	0,425	-

% VAM	0,197	6,000	0,901	6,000	0,380	-
-------	-------	-------	-------	-------	-------	---

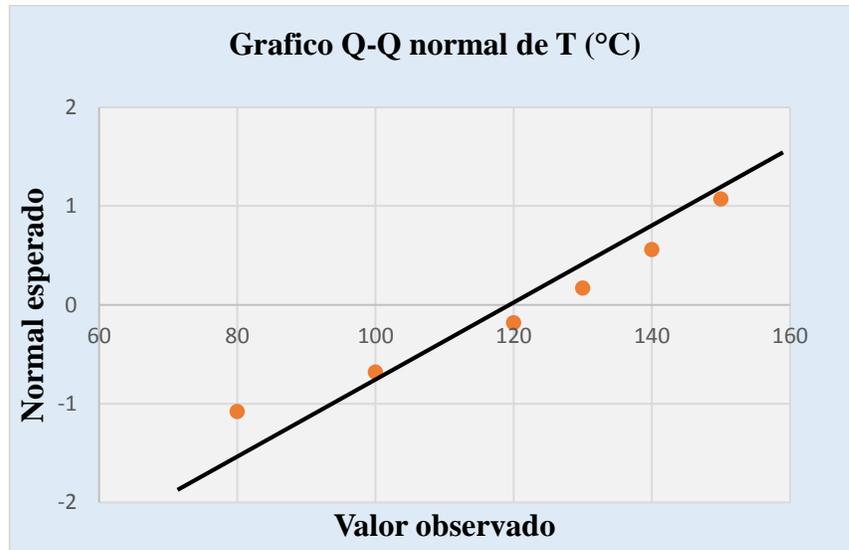
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia

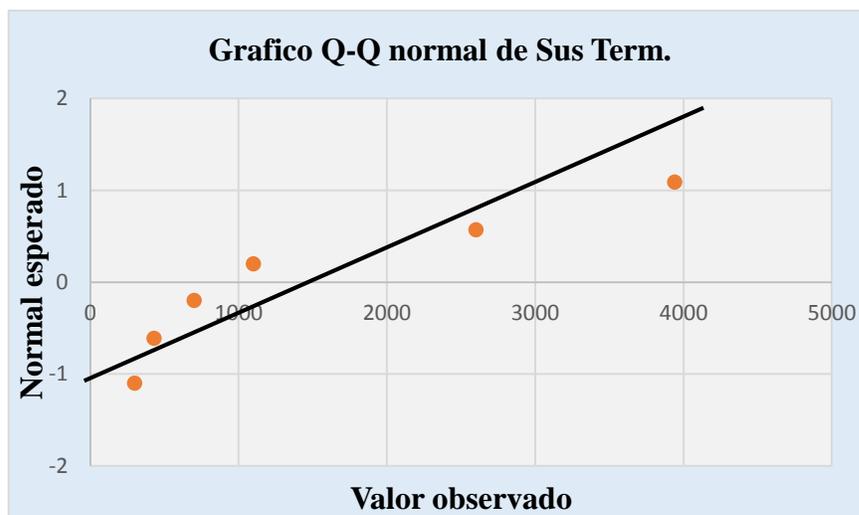
Gráficos para observar la normalidad:

Grafica N° 4.36: Grafico Q-Q normal de T (°C).



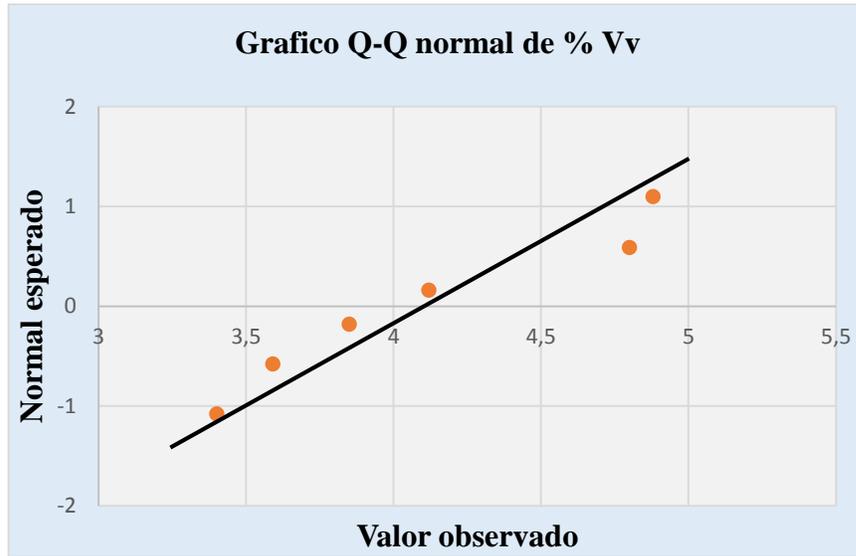
Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 4.37: Grafico Q-Q normal de Sus Térmica.



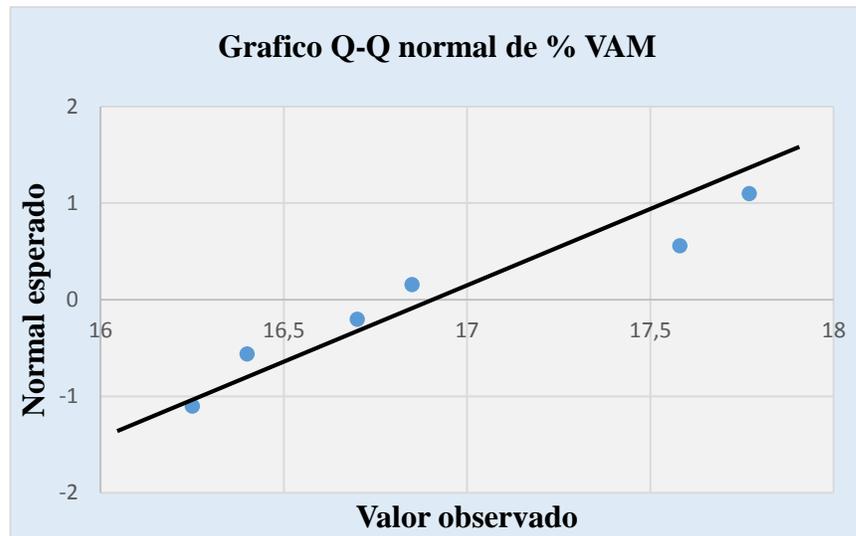
Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 4.38: Grafico Q-Q normal de % Vv .



Fuente: Elaboración propia

Grafica N° 4.39: Grafico Q-Q normal de % VAM.



Fuente: Elaboración propia

REGRESION MULTIPLE

Tabla N° 4.67: Tabla de correlaciones.

Correlaciones					
		T	S. Term	%Vv	%VAM
Correlación de Pearson	T	1,000	-0,977	-0,980	-0,985
	S. Term	-0,977	1,000	0,949	0,965
	%Vv	-0,980	0,949	1,000	0,998
	%VAM	-0,985	0,965	0,998	1,000
Sig. (unilateral)	T	.	0,000	0,000	0,000
	S. Term	0,000	.	0,002	0,001
	%Vv	0,000	0,002	.	0,000
	%VAM	0,000	0,001	0,000	.
N	T	6,000	6,000	6,000	6,000
	S. Term	6,000	6,000	6,000	6,000
	%Vv	6,000	6,000	6,000	6,000
	%VAM	6,000	6,000	6,000	6,000

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la temperatura tiene una correlación inversa alta con todas las variables analizadas.

Tabla N° 4.68: Tabla de Resumen del modelo^b.

Resumen del modelo ^b									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	0,998 ^a	0,995	0,981	2,650	0,995	69,915	3	1	0,088

a. Predictores: (Constante), % VAM, Susc termica, % Vv

b. Variable dependiente: T

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.3. PRUEBA DE LA HIPOTESIS PARA LA MEDIA V_v .

Tabla N° 4.69: Datos de % de vacíos de la mezcla para la prueba de la hipótesis.

T (°C)	% V_v
80	-
90	5,670
100	5,450
110	-
120	4,670
130	4,510
140	4,070
150	3,900

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento que utiliza SPSS es la *Prueba T para una muestra* que contrasta si la media de una población difiere de una constante especificada.

$H_0: \mu=4,5$

$H_1: \mu \neq 4,5$

Tabla N° 4.70: Tabla de la estadística para una prueba.

Estadísticas para una muestra				
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
V_v	6,000	4,712	0,718	0,293

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.71: Tabla de la prueba de una muestra.

Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 4.5					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Vv	0,722	5,000	0,502	0,212	-0,542	0,965

Fuente: Elaboración propia.

Esta salida muestra los resultados del contraste de la *t de Student* con un intervalo de confianza para la diferencia entre el valor observado y el valor teórico (contrastado). Cada una de las columnas de la tabla muestra:

t = 0,722: El valor experimental del estadístico de contraste

gl = 5: Los grados de libertad

Sig. = 0,502: El p-valor o nivel crítico del contraste

Diferencia de medias = 0,212: Es la diferencia entre la media teórica (4,5) y la media observada (4,7117)

95% Intervalo de confianza = (-0,542, 0,965): Es el intervalo de confianza para la diferencia entre la media teórica y la media observada al nivel de confianza del 95%.

En conclusión podemos afirmar que se acepta la hipótesis nula, es decir que el promedio de 4,7 de la muestra es muy cercana al valor de 4,5 que tenemos como hipótesis, es decir que el comportamiento de Vv está dentro del parámetro teórico y muy cercano al máximo permitido en la especificación técnica.

4.2.5. Precio unitario.

a) Materiales

Para obtener los costos para una carpeta de concreto asfáltico convencional y modificado, se debe tomar en cuenta varios parámetros como el costo unitario de los agregados pétreos que se valorizan en m³ que forman parte de las capas de las carpetas asfálticas, el costo del asfalto convencional y el asfalto modificado con polímeros.

Para el proceso de la elaboración de la carpeta asfáltica consiste en una serie de ensayos de laboratorio para determinar las cantidades del ligante asfáltico y el agregado pétreo ambos materiales deben cumplir con las especificaciones técnicas establecidas, de acuerdo a las normas de los ensayos realizados para su caracterización en laboratorio.

Los materiales para la carpeta asfáltica debe cumplir con las especificaciones establecidas en la norma AASTHO y ASTM para el asfalto:

1. Debe ser lo suficientemente fluido para una aplicación uniforme.
2. Debe tener una viscosidad adecuada para permitir una adhesión rápida entre el ligante y el agregado.
3. Prevenir el desprendimiento de las partículas pétreas.
4. La temperatura adecuada para su trabajabilidad.
5. Se debe dosificar con la cantidad adecuada para evitar la exudación y el desprendimiento del agregado.

Para los agregados pétreos las características más importantes son las siguientes:

1. La forma de los agregados que es una característica importante.
2. La limpieza de los agregados que es un factor muy importante para la adhesividad del agregado con el ligante asfáltico.
3. Deben ser resistentes al paso de los vehículos una vez expuestos en obra.

b) Mano de obra y equipo mecánico

Se debe tomar en cuenta el costo de la mano de obra del tratamiento, el personal necesario para operar los equipos que se utilizan en el tratamiento superficial teniendo conocimiento del costo horario de los equipos necesarios, así como de los operarios de estos.

Los costos de unitarios por concepto de mano de obra han sido referidos a la siguiente categorización de operario, oficial, peón.

El detalle del costo horario de cada una de las categorías que conforman la mano de obra, para el equipo mecánico se ha elaborado un listado de los equipos que interfieren en las diferentes partidas de la obra, determinando así el pago de los costos directos, señalando las tarifas necesarias correspondientes a las maquinas operadas.

Los costos directos de cada partida toman en cuenta los rendimientos de los equipos, el costo horario entre otros parámetros como los costos de posesión, de operación y en los costos indirectos que conforman el presupuesto de la obra que son analizados según la necesidad de la misma como los gastos administrativos entre otros.

Finalmente, tomando en cuenta todos los parámetros necesarios como los impuestos el IVA y el IT con sus respectivos % de descarga al mismo tiempo sus utilidades y beneficios sociales.

En el ANEXO 5 se determinó el costo de la carpeta asfáltica para un m^3 , con asfalto convencional con un costo de 2296,10 bs por m^3 y el costo con asfalto modificado con polímeros es de 2749,88 bs por m^3 siendo más costoso la carpeta asfáltica con asfalto modificado con un porcentaje de 19,50 % esto se presenta por el costo del asfalto modificado con polímeros que es más costoso económicamente y porque tiene un mayor porcentaje de contenido optimo, pero analizando de forma diferente el costo de la carpeta asfáltica con asfalto modificado con polímeros a la larga tiene bajo costo en el mantenimiento y menos trabajo de conservación de una carretera que es más económico debido a las propiedades del asfalto modificado con polímero son más resistente a los agentes atmosféricos, presentan menos fallas, proporcionando buenos resultados comparado con una carpeta asfáltica realizada con asfalto convencional. Las tablas con resultados se pueden ver en el anexo 5.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

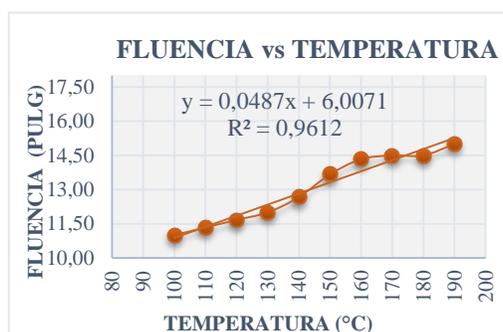
- En el presente trabajo de investigación se han cumplido con los objetivos planteados debido a que se logra obtener resultados que nos permite comprobar que la susceptibilidad térmica si afecta a las propiedades de las mezclas asfálticas con asfalto convencional y modificado.
- Se realizó ensayos de caracterización de los agregados, del asfalto convencional 85-100 y modificado con polímetro SBS 60-85, se puede verificar que los agregados y asfaltos cumplen con las especificaciones técnicas.
- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional a diferentes temperaturas, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades y se realizó el mismo procedimiento con briquetas de mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS.

Se obtuvieron los siguientes resultados para ambas mezclas:

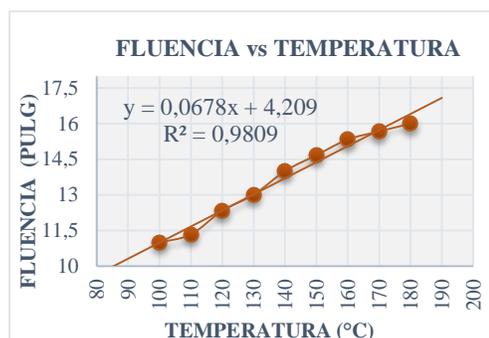
- La densidad máxima del asfalto convencional no es en la misma temperatura que el asfalto modificado esto es debido a que cada asfalto actúa diferente a la susceptibilidad térmica, el asfalto convencional tiene una densidad máxima de $2,374 \text{ gr/cm}^3$ a los 150°C y la densidad máxima del modificado es de $2,390 \text{ gr/cm}^3$ a los 160°C , es en esos puntos donde cada asfalto consigue su mejor proceso de elaboración de la mezcla.
- De acuerdo a los resultados obtenidos del porcentaje de vacíos de las mezclas el cemento modificado tiene menor porcentaje de vacíos del comparando con los valores del cemento convencional y al tener menor porcentaje nos garantiza que esta mezcla es mejor que la convencional porque el asfalto cubre más las partículas de agregado y por lo tanto la mezcla es más durable.

- Se aprecia que los resultados obtenidos de la estabilidad máxima del asfalto convencional es 2651,870 libras, utilizando el asfalto modificado con polímeros se obtiene un valor de 4223,830 libras. Analizando esta comparación se observa que los resultados que se obtienen con el asfalto modificado con polímeros es mayor al del obtenido con el asfalto convencional, con una diferencia porcentual de 37,220 %.
- Se demostró que la fluencia de ambos asfaltos se comportan directamente proporcional a la temperatura, a mayor temperatura de compactación mayor es la fluencia de la mezcla.

Fluencia del asfalto convencional



Fluencia del asfalto modificado



Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

- Con el ensayo de viscosidad Saybolt Furol se determinó valores de la susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas. Una vez obtenidos los resultados, se observa que a medida que se aumenta la temperatura la susceptibilidad térmica disminuye.
- Después de obtener los resultados se llega a verificar la hipótesis de este trabajo de investigación, efectivamente la susceptibilidad térmica aplicada en asfaltos, es de igual tendencia cuando se aplica a las mezclas asfálticas pero solo en dos variables dependientes que son el % de vacíos de la mezcla y el % de vacíos de agregado mineral porque estas variables se comporta de igual manera que la susceptibilidad térmica.

5.2. Recomendaciones.

- El desarrollo de los ensayos debe realizarse de acuerdo a las indicaciones de las normas ASTM y AASHTON y se debe procurar en lo posible contar con equipos de excelente desempeño, que garanticen la calidad de los resultados.
- Se recomienda realizar varias mediciones de temperaturas durante el proceso de las mezclas asfálticas para saber si estas se encuentran en la temperatura requerida.
- Se recomienda que al trabajar con mezclas asfálticas a temperaturas altas se utilice el equipo necesario de seguridad para su manipuleo: guantes de cuero o lona, ropa adecuada de y mascarillas como el barbijo para evitar la inhalación de gases u otras sustancias.
- Se recomienda que la compactación de las probetas para el ensayo MARSHALL, sea realizada por una misma persona con el fin de evitar cambios en la energía aplicada y variar los resultados del ensayo.
- Se recomienda utilizar el asfalto modificado con polímeros debido a que mejora considerablemente la resistencia a agrietamiento ocasionado por bajas temperaturas y/o elevados gradientes térmicos.

BIBLIOGRAFIA

Arenas Lozano, Hugo León. (2006). Tecnología del cemento asfáltico. Ediciones Popoyán. Colombia.

Agnusdey, Jorge y Iosco, Ornar. (1991). Durabilidad de mezclas asfálticas con ligante modificados con polímeros. Comisión de investigación científica. Buenos Aires, Argentina.

Guerrero Raga, Edwin Alirio. (2017). Influencia de la Temperatura y el tiempo de Mezclado en la Modificación de un Cemento Asfáltico” Universidad Santo Tomás. Bogotá.

Ing. Minaya, Silena e Ing. Ordoñez, Abel. (2003). Superpave y el diseño de mezclas asfálticas. Instituto de investigaciones-UNI. Lima Perú.

Instituto Nacional de vías. (2007). Especificaciones generales de Construcción de Carreteras. Bogotá.

Manual técnico de carreteras de la ABC. (2008). Ensayos de Suelos y Materiales, Asfalto volumen 4.

The Asphalt Institute. (1982). Serie de manuales N°22 MS-22. Estados Unidos.