

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático es una problemática planteada a nivel mundial, las emisiones de CO₂, las energías alternativas ante la posible disminución de las reservas de las energías fósiles, han hecho que desde los diferentes actores relacionados con la construcción y conservación de carreteras principalmente, se estén tomando medidas para que esta tecnología sea lo menos perjudicial con el medio ambiente, conllevando al mismo tiempo una reducción en el consumo energético.

Las mezclas asfálticas tibias o semicalientes surgen como respuesta al consumo elevado de energía de las mezclas convencionales; si bien las mezclas asfálticas en caliente cumplen con estándares ambientales, de salud y seguridad tradicionales, se ha demostrado que la reducción en las temperaturas de producción e instalación generaría beneficios ambientales.

Para lograr estas reducciones de temperatura se han realizado diferentes investigaciones en el mundo, siendo las más empleadas las modificaciones de asfaltos con diferentes agentes reductores de viscosidad, entre los cuales se encuentran la adición de zeolitas sintéticas, la espumación del betún y la adición de ceras o parafinas, sin embargo, todos estos procesos tienen un fundamento común, disminuir la viscosidad del betún para poder fabricar, transportar y poner en obra mezclas bituminosas a temperaturas más bajas, sin perder su manejabilidad ni prestaciones.

Se pretende disminuir las temperaturas de mezcla y compactación para el productor de mezcla caliente. El asfalto de mezcla tibia permitirá además distancias de transporte más largas ya que la mezcla a una menor temperatura mantendrá menor viscosidad y capacidad de trabajo cuando alcanza el sitio de construcción.

1.2.Justificación

Una de las actuaciones de mayor importancia dentro de la construcción ya que tiene la mayor influencia para asegurar el nivel de desarrollo, es la construcción de carreteras.

Esta actividad genera un consumo importante de energía y emisiones de CO₂, es por ello que la incesante búsqueda por ser amigables con el medio ambiente; ha promovido la aceptación a nivel mundial, de las mezclas asfálticas tibias con todo tipo de aditivo. La mezcla asfáltica tibia que pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmósfera, haciendo que la mezcla asfáltica en caliente, quede obsoleta en diversos países.

En la actualidad la producción de mezclas asfálticas en nuestro país, se limita únicamente a las mezclas asfálticas en caliente, por lo que se quiere introducir el uso de mezclas asfálticas tibias que es una técnica usada en varios países con el fin de aprovechar los asfaltos en la pavimentación de vías. Éste consiste en la adición de cera de soya a los asfaltos calientes con el fin de reducir la viscosidad del cemento asfáltico y de esta manera mejorar los procesos de elaboración, extendidos y compactados a temperaturas menores.

La investigación es conveniente desde el punto de vista técnico ya que el uso de estas mezclas asfálticas elaboradas a menores temperaturas contribuirá con el medio ambiente con las siguientes ventajas: menor esfuerzo de compactación, mayor facilidad de trabajo aún fuera de estación climática, mayor tiempo de almacenaje y transporte, menores riesgos para los trabajadores, menor desgaste de partes en la planta, menor envejecimiento del asfalto, menor endurecimiento físico del asfalto, mayor trabajabilidad de la mezcla, menor velocidad de enfriamiento, permite también acelerar la habilitación al tránsito.

1.3.Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problemática

El problema de la infraestructura vial generalmente radica en proyectos de pavimentos flexibles en caliente y frío. El tipo de diseño de mezcla asfáltica más utilizada ha sido la mezcla asfáltica en caliente, por lo que éste diseño ha originado problemas ambientales en la contaminación, debido a emisión de gases, consumo de combustible y aumento de energía en la elaboración de las mezclas. Por lo que, es importante contar con una nueva técnica que permita la elaboración y aplicación del diseño de mezcla asfáltica tibia con adición de cera de soya, y así lograr que sean más duraderas, económicas y disminuir los aspectos negativos de contaminación ambiental.

El problema que se presenta en los pavimentos, es debido a que las mezclas asfálticas no poseen un buen comportamiento mecánico, debido a que son sometidos a condiciones de trabajo tales como flexión, compresión, tracción, cortante y otras. Por lo que con la aplicación del diseño de mezcla asfáltica tibia con cera de soya para la construcción de pavimentos asfálticos; se busca el cumplimiento de la normatividad de las instituciones técnicas, tales como AASHTO, ASTM, Manual de Ensayos para la Construcción de Carreteras presentado por la ABC.

1.3.2. Problema

¿Influye la adición de cera de soya en el comportamiento del diseño de mezclas asfálticas tibias elaboradas para el beneficio ambiental?

1.4.Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento del diseño de la mezcla asfáltica tibia utilizando cera de soya como reductor de viscosidad de tal manera que la mezcla pueda ser producida y compactada a temperaturas inferiores que la mezcla asfáltica en caliente (convencional) para obtener beneficios ambientales y económicos.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Recopilar la información teórica.
- ✓ Realizar la caracterización de los materiales que se van a emplear para verificar si cumplen con las especificaciones de los ensayos desarrollados en el manual de la Administradora Boliviana de carretera.
- ✓ Analizar el comportamiento del cemento asfáltico con la incorporación de diferentes porcentajes de cera de soya.
- ✓ Diseñar en laboratorio mediante el método Marshall las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas diseñadas con asfalto modificado con los diferentes porcentajes de cera de soya, usando además cemento Portland como filler en la mezcla.
- ✓ Analizar el comportamiento de las propiedades Marshall y características especiales que se presentan en la nueva mezcla creada con asfalto modificado con cera de soya en relación a mezclas asfálticas convencionales.
- ✓ Determinar el porcentaje óptimo de cera de soya y la temperatura de diseño que mejore las propiedades de la mezcla asfáltica.
- ✓ Establecer el costo del pavimento asfáltico con cera de soya y el pavimento asfáltico tradicional.

1.5.Hipótesis

Al incorporar cera de soya al cemento asfáltico disminuirá su viscosidad permitiendo la producción de las mezclas a temperaturas inferiores y de esta manera comportarse igual que las mezclas asfálticas en caliente.

1.6.Definición de variables independientes y dependientes

1.6.1. Variable independiente

- Mezcla asfáltica

1.6.2. Variable dependiente

- Viscosidad
- Porcentaje de cera

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 1: Operacionalización de variables

Variable	Conceptualización	Indicador	Medición	Rango de variabilidad
<u>Variable independiente</u> Mezcla asfáltica	Determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento	Caracterización de las mezclas asfálticas	-	Metodología Marshall
<u>Variable dependiente</u> Viscosidad	Estado de fluidez de los asfaltos	Indicador cuantitativo de calidad	mm ² /s	Especificación de la norma AASTHO
% cera de soya	Cera orgánica	Cantidad	%	1-4

Fuente: Elaboración propia

1.7.Diseño metodológico

1.7.1. Componentes

1.7.1.1.Unidades de estudio y decisión muestral

Unidades de estudio: Mezclas asfálticas.

Población: Mezclas asfálticas semicalientes

Muestra: Mezclas asfálticas semicalientes diseñadas con asfalto modificado con cera de soya.

Muestreo: Se dispondrá de dos modelos de mezclas asfálticas para evaluar su comportamiento. La primera mezcla que será la mezcla convencional. La segunda mezcla, la cual estará sometida a estudio, es la que determinara el comportamiento de la mezcla asfáltica tibia elaboradas a diferentes temperaturas.

Para la investigación se disponen tres tipos de áridos:

Agregado grueso: Obtenido de la planta productora de agregados (Alcaldía municipal).

Agregado fino: Obtenido de la planta productora de agregados (Alcaldía municipal).

Filler: En el caso del filler, se usará cemento El Puente IP-30 ya que incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla y suficiente cohesión.

Así mismo se empleará un betún convencional para el desarrollo de la mezcla.

Para la modificación de la viscosidad del asfalto se empleará un material orgánico, tal es el caso de la cera de soya, adquirida mediante el pedido a un comercio dedicado a la producción de ceras ubicado en la ciudad de Cochabamba.

1.7.2. Métodos y técnicas empleadas

1.7.2.1.Método

Método inductivo: La inducción es un razonamiento que analiza una porción de un todo; parte de lo particular a lo general, es decir, va de lo individual a lo universal.

La característica de este método es que utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares, aceptados como válidos para llegar a conclusiones cuya aplicación es de carácter general. El método se inicia con la observación individual de los hechos, se analiza la conducta y características del fenómeno, se hacen comparaciones, experimentos, etc., y se llega a conclusiones universales para postularlas como leyes, principios o fundamentos.

Las reglas del método de inducción son:

Observar cómo ciertos fenómenos están asociados y por inducción intentar descubrir la ley o los principios que permiten dicha asociación.

A partir de la ley anterior, inducir una teoría más abstracta que sea aplicable a fenómenos distintos de los que se partió.

Deducir las consecuencias de la teoría con respecto a esos nuevos fenómenos.

Efectuar observaciones o experimentos para ver si las consecuencias son verificadas por los hechos.

Dicho método considera que entre mayor sea el número de experimentos realizados, mayores serán las probabilidades de que las leyes resulten verídicas.

Asimismo, el método inductivo se caracteriza por tener 4 etapas básicas:

- a) Observación y registro de todos los hechos.
- b) Análisis y clasificación de los hechos.
- c) Derivación inductiva de una generalización a partir de los hechos.
- d) Contrastación.

1.7.2.2.Técnicas

Se empleará la técnica de muestreo estratificado donde:

Tabla 2: Datos nivel de confianza 95%

Z (valor de nivel de confianza)	1,96
p (probabilidad de que ocurra el suceso)	0,5
q (no probabilidad de que ocurra el suceso)	0,5
e (error probable)	0,5

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 1: Población

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

Ecuación 2: Muestra

$$n = \frac{\sum Ni * pi * qi}{N \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n Ni * p * q}{N}}$$

Calculando N:

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2} = 948$$

Calculando n para la muestra estratificada:

$$n = \frac{\sum Ni * pi * qi}{N \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n Ni * p * q}{N}} = 237$$

Número de muestras para un nivel de confiabilidad del 95% y un error del 5%

Tabla 3: Planilla de muestreo

Ensayos	Cantidad (Ni)	p_i	q_i	$p_i * q_i$	$N_i * p_i * q_i$	w_i	n_i	Asumido
Granulometría de áridos	9,00	0,50	0,50	0,25	2,25	0,0095	2,60	3,00
Desgaste de los ángeles	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Densidad real, neta y absorción de agua en áridos	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Caras fracturadas	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Desgaste por sulfatos	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Equivalente de arena	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Caracterización de cemento asfáltico								
Viscosidad	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Penetración	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Ductilidad	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Punto de ablandamiento	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Punto de inflamación (°C)	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Peso específico	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Caracterización de la cera								
Punto de inflamación (°C)	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Penetración (d mm)	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,0032	0,87	1,00
Propiedades mecánicas								
Estabilidad	234,00	0,50	0,50	0,25	45,00	0,1899	51,90	53,00
Fluencia	234,00	0,50	0,50	0,25	45,00	0,1899	51,90	53,00
% de vacíos de aire	234,00	0,50	0,50	0,25	45,00	0,1899	51,90	53,00
% de VAM (Vacíos de agregado mineral)	234,00	0,50	0,50	0,25	45,00	0,1899	51,90	53,00
Peso específico	234,00	0,50	0,50	0,25	45,00	0,1899	51,90	53,00
TOTAL	948,00				237,00	1,00		281,00

Fuente: Elaboración propia

- Número total de ensayos a realizar en todo el estudio 281 ensayos.

En la siguiente tabla se detalla el plan de ensayos para la conformación de mezclas asfálticas de acuerdo al Manual de ensayos y materiales asfálticos elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.).

Tabla 4: Plan de ensayos en general

Plan de ensayos en general
Agregado grueso
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511
Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519
Método para determinar caras fracturadas.
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516
Agregado fino
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516

Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.
Filler (cemento)
Método para determinar la granulometría del filler. A0502
Cemento asfáltico
Método para determinar la viscosidad cinemática (ASTM D 2170 AASHTO T201-01). A0108
Método de ensaye de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97). A0103
Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00). A0105
Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96). A0106
Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96). A0110
Método para determinar la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T229-97). A0102
Cera de soya
Método de prueba estándar para detectar el punto de fusión de la cera (ASTM D 127-08)
Método de ensaye de penetración (ASTM D – 1321)
Diseño Marshall
Preparación de probetas (AASHTO T 245-97). A0608
Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas. A0606
Método de diseño Marshall. A0613

Fuente: Elaboración propia

1.7.2.3.Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Los instrumentos y equipos necesarios para la recolección de datos se describen a continuación, en función al procedimiento a ser desarrollado:

Para la recolección de los componentes de la mezcla asfáltica:

Bolsas de yute: Necesarios para la recolección de los agregados

Contenedores metálicos: Para el recogimiento del cemento asfáltico.

Para la ejecución de los diferentes ensayos de laboratorio:

Balanza: Diseñada para medir la masa, debe tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente de pesaje y una precisión de 0,1gr será usado en todos los ensayos de laboratorio.

Tamices: Utensilio que se usa para separar las partes finas de las gruesas y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida con abertura cuadrada, y sus tamaños nominales de abertura pertenecen a las series establecidas por norma. Se usará la serie de tamices establecida para los ensayos de: Granulometría de los agregados, desgaste mediante la máquina de Los Ángeles, equivalente de arena, granulometría del filler.

Horno: Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones de la prueba, diseñados para secar asfalto, suelo, roca, concreto, agregado o materiales similares. Será usado en los siguientes ensayos: Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles, determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos, granulometría del filler, densidad máxima de mezclas asfálticas, preparación de probetas.

Máquina de Los Ángeles:

- a) Tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar un motor. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para

introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegure la estanqueidad del material sobre tamiz N° 50 (0,3mm).

- b) Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada rígida y firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro, de modo que se proyecte radialmente hacia el interior en 90 ± 3 mm.

Esferas (carga abrasiva): Un juego de esferas de acero de aproximadamente 45 a 50mm de diámetro y de masas diferentes distribuidas en un rango entre 390 y 445gr usado en la prueba de desgaste mediante la máquina de Los Ángeles.

Matraz: Es un matraz aforado es un instrumento de vidrio de fondo plano, en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensaye. Debe llevar una marca de calibración que indique el volumen contenido con una precisión de $\pm 0,1$ ml. También puede emplearse un picnómetro. Usado para la determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Canastillo porta muestra: De alambre de acero inoxidable lo suficientemente resistente para soportar el peso de la muestra, con malla de abertura igual o inferior que 2mm y de capacidad igual o superior a 4l. Además, debe estar provisto de un dispositivo que permita suspenderlo del platillo de la balanza. Usado para la determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Molde y pisón: El molde es de forma tronco-cónica, de 40 ± 3 mm de altura, confeccionado con una plancha metálica. Es una varilla metálica con uno de sus extremos de sección plana y circular. Ambos utilizados para la determinación de la densidad real, la densidad neta, la absorción de agua en áridos finos, y el equivalente de arena.

Probeta graduada: De 30 ± 1 mm de diámetro interior y aproximadamente 400mm de alto, graduado en milímetros hasta una altura de 380mm que ayudará para la determinación del equivalente de arena.

Ductilímetro: Para traccionar las briquetas de material bituminoso se puede usar cualquier aparato construido de modo que la muestra se mantenga continuamente

sumergida en agua, al mismo tiempo que los clips se traccionan a una velocidad uniforme y sin vibraciones excesivas. Este aparato debe ser termo regulable para mantener la temperatura especificada en forma homogénea en toda la masa de agua. Usado para realizar el ensayo de ductilidad.

Penetrómetro: Cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1mm. El peso del vástago será de $47,5 \pm 0,05$ g. El peso total de la aguja y el vástago será de $50,0 \pm 0,05$ g. Para cargas totales de 100g y 200g, dependiendo de las condiciones es en que se aplique el ensaye, se estipulan pesas de $50,0 \pm 0,05$ g y $100,0 \pm 0,05$ g.

La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso. Usado en el ensayo de penetración del cemento asfáltico.

Manómetro de presión residual: Capaz de medir una presión residual igual o inferior a 30mm Hg, utilizado, asimismo, en la determinación de la densidad máxima en las mezclas asfálticas.

Moldes de compactación: Construidos por una placa, base y collar, el molde debe tener un diámetro interior de 101,6mm y una altura de 80mm, necesario para la preparación de probetas.

Extractor: Que sirva para sacar las probetas del molde.

Termómetros: Conforme a los requisitos para termómetros 47°C y 110°C respectivamente, según ASTM E1. Deben tener un rango entre 1°C a 100°C y de $133,5^\circ\text{C}$ a 360°C . Otro tipo de termómetros pueden utilizarse siempre que tengan una precisión, sensibilidad y seguridad igual o mayor que las prescritas en ASTM E1.

Martillo de compactación: Consiste en una cara circular de 100mm de diámetro con un peso de 4,515g y construido de modo de obtener la altura de caída 460mm.

Sujetador de molde: Consiste en un arco con resorte diseñado para mantener cerrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.

Máquina Marshall: Aparato eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensaye a una velocidad de deformación de 50mm/min.

Recipientes: Limpios de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensaye. Usados en todas las pruebas de laboratorio a ser ensayadas.

1.7.2.4.Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

Será un estudio experimental descriptivo:

Para desarrollar la investigación se realizará la recolección y preparación de los materiales necesarios para una mezcla asfáltica, como ser los agregados grueso y fino, el filler y el betún, además de la cera de soya. Luego se efectuarán los ensayos de laboratorio que es la caracterización de los agregados, cemento Portland usado como filler, y el cemento asfáltico a ser utilizado; dosificar la cantidad de cera para modificar la viscosidad del asfalto. Seguidamente se realizará la caracterización y verificación del comportamiento de los materiales, se procederá a realizar la conformación de las mezclas asfálticas tanto la convencional como la mezcla asfáltica semicaliente modificada con cera de soya. Para ello se debe considerar la distribución de los áridos, así como los contenidos óptimos de betún y filler a usar. En cuanto a la distribución de áridos la mezcla convencional y así también la mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico modificado con cera de soya estará constituida por el agregado grueso, agregado fino y filler. Finalmente, luego de establecer la distribución adecuada de los materiales se realizará la fabricación en laboratorio de las diferentes mezclas en base a los ensayos establecidos para la conformación del método de diseño Marshall.

1.8. Alcance de la investigación

Para llevar a cabo la investigación se efectuará la recolección y caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica, incluyendo la cera de soya. En cuanto a la caracterización de los materiales, éstos comprenden el análisis del comportamiento ante los ensayos prescritos por la normativa, según el "Manual de ensayos para el diseño de carreteras" presentado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.).

A continuación, se lleva a cabo el diseño de la mezcla asfálticas con la incorporación de dichos componentes, para ello se realiza el diseño de fórmulas de trabajo, y se analiza el comportamiento de las mezclas fabricadas mediante el método de diseño Marshall, para realizar un correcto análisis del comportamiento y posterior comparación del pavimento asfáltico tradicional y pavimento asfáltico con cera, se elaborarán briquetas con 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% y 6,5% de cemento asfáltico conforme el método Marshall para diseño de mezclas asfálticas, siendo 3 briquetas por cada porcentaje de cemento asfáltico.

Para los pavimentos asfálticos semicalientes con asfalto modificado con cera de soya, se elaborará seis grupos de tres briquetas cada fórmula (18 briquetas) variando el porcentaje de la cera de soya en el peso del cemento asfáltico en un rango del 1% al 4%. Y serán elaboradas a diferentes temperaturas de 110°C 120°C Y 135°C

Finalmente se comparan los resultados obtenidos por las pruebas de laboratorio según el método Marshall: densidad, estabilidad, fluencia y vacíos, de la mezcla asfáltica modificada con la incorporación de diferentes porcentajes de cera de soya y la mezcla asfáltica convencional, para poder determinar si es factible en la construcción de carreteras.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica, también denominada aglomerado, en general es una combinación de un ligante hidrocarbonato y agregados minerales pétreos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso. Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta. Estas mezclas asfálticas pueden ser en caliente, lo más común, o en frío. Además, las mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor. Los procesos de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente implican calentar el ligante y los agregados y su puesta en obra se realizará a una temperatura muy superior al ambiente.¹

Imagen 1: Puesta en obra de la mezcla asfáltica



Fuente: CACHIBÍ. Mezclas asfálticas instaladas (2018). Recuperado de: CACHIBÍ © 2018

¹ Yepes, P. V. (2 de Septiembre de 2014). UNIVERSIDA POLITECNICA VALENCIA. Obtenido de <https://victoryepes.blog.upv.es/tag/mezcla-asfaltica/>

2.1.1. Funcionalidad de las mezclas asfálticas

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

La adherencia del neumático al firme.

Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.

El desgaste de los neumáticos.

El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.

La comodidad y estabilidad en marcha.

Las cargas dinámicas del tráfico.

La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).

El envejecimiento de los vehículos y las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento. Por ejemplo, son fácilmente asequibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad de los vehículos, en los métodos de diseño de pavimentos.²

² Padilla, R. A. (2004). Mezclas Asfálticas. (págs. 41-42). Universidad Olitécnica de Cataluña.

2.1.2. Propiedades de las mezclas asfálticas

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

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

Durabilidad: La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Impermeabilidad: La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

Trabajabilidad: La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquéllas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

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

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

Resistencia al deslizamiento: Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65km/hr (40mi/hr).³

³ Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. (2014). En Asphalt Institute MS-22 (pág. 59).

2.1.3. Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, entre ellos:

- a. Por fracciones del agregado pétreo en la mezcla

Masilla asfáltica: Polvo mineral más el ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

- b. Por la temperatura de la mezcla en la producción

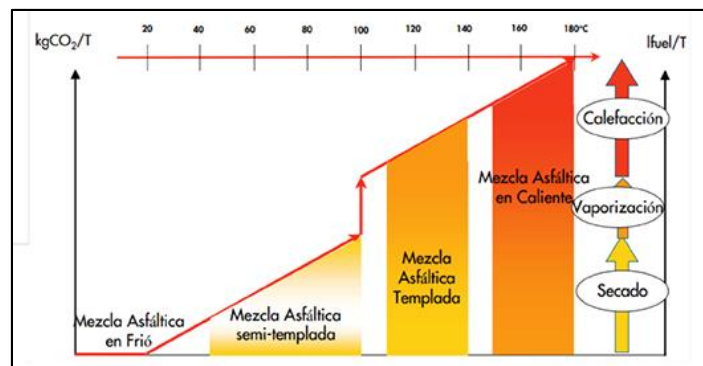
Mezclas asfálticas en frío (De 25°C a 60°C): Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.

Mezclas asfálticas semi-templadas (De 60°C a 100°C): Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados.

Mezclas asfálticas en tibio o semicaliente (De 100°C a 135°C): Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y colocación, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso.

Mezclas asfálticas en caliente (De 135°C a 180°C): Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Imagen 2: Clasificación de mezclas asfálticas por rango de temperaturas.



Fuente: Revista ingeniería de construcción. Mezclas asfálticas templadas (2017).

Recuperado de: SciELO Analytics

c. Por proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este aspecto es de importancia fundamental para que no aparezcan deformaciones plásticas con el paso de las cargas y por las variaciones térmicas.

Mezclas cerradas o densas: Con una proporción de vacíos no mayor al 6%.

Mezclas semi-cerradas o semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.

Mezclas abiertas: Con una proporción de vacíos mayor de 12%.

Mezclas porosas o drenantes: Con una proporción de vacíos superior al 20%.

d. Por el tamaño máximo del agregado pétreo

Mezclas gruesas: el tamaño máximo del árido es mayor a 10mm.

Mezclas finas: son microaglomerados o morteros asfálticos; éstas son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se extiende la mezcla (del doble al triple del tamaño máximo).

e. Por la estructura del agregado pétreo

Mezclas con esqueleto mineral: Provistas de un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f. Por granulometría

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

Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.⁴

Tabla 5: Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frio (25°C a 60°C)
	Semitemplada (60°C a 100°C)
	Tibio (100°C a 135°C)
	Caliente (135°C a 180°C)

⁴ Construmática. (s.f.). Obtenido de https://www.construmatica.com/construpedia/Clasificaci%C3%B3n_de_las_Mezclas_Asf%C3%A1lticas

Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h > 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h < 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Padilla Rodríguez, A. Clasificación de mezclas asfálticas (2004). Recuperado de: Mezclas asfálticas (págs. 47). España: Universidad Politécnica de Cataluña.

2.1.4. Diseño de las mezclas asfálticas

En una mezcla asfáltica de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen tres métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall, y método Hveem, y el método Superpave.

Los tres métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

2.1.4.1. Metodología

El método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ex ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Misisipi, el ensayo Marshall surgió de una investigación por el cuerpo de ingenieros el Ejercito de los Estado Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron

comparados y evaluados para desarrollar un método simple. El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que utilizan cementos asfálticos clasificados con viscosidad o penetración y que contengan agregados con un tamaño máximo de 25mm (1pulg) o menor.

2.1.4.2. Especificaciones de la metodología

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64mm. (2,5pulg.) de espesor por 102mm. (4pulg.) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica.

Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 6 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en el presente capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 7). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 6: Gradaciones propuestas para mezclas

Abertura de los tamices	Mezclas cerradas										
	Tamaño máximo nominal del agregado										
	2 pulg (50.0mm)	1 1/2 pulg (37.5mm)	1 pulg (25.0mm)	3/4 pulg (19.0mm)	1/2 pulg (12.5mm)	3/8 pulg (9.5mm)	No.4 (4.75mm)	No.8 (2.36mm)	No.16 (1.18mm)		
	Gradaciones para mezclas de agregados (Grueso, Fino y Filler)										
2 1/2 (63 mm)	100	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2" (50 mm)	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1 1/2 (37.5 mm)	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---	---
1" (25.0 mm)	60-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---
3/4" (19.0 mm)	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---
1/2" (12.5 mm)	35-65	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---
3/8" (9.5 mm)	---	---	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---
No.4 (4.75 mm)	14-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	---	---	---	---
No.8 (2.36 mm)	10-36	15-41	15-45	23-49	28-58	32-67	65-100	---	---	---	100
No.16 (1.18 mm)	---	---	---	---	---	---	40-80	---	---	---	95-100
No.30 (600 μm)	---	---	---	---	---	---	35-65	---	---	---	70-95
No.50 (300 μm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	---	---	---	45-75
No.100 (150 μm)	---	---	---	---	---	---	3-20	---	---	---	20-40
No.200 (75 μm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	---	---	---	9-20
	Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla.										
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12		

Fuente: ASTM D3515 Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures

Tabla 7: Criterios del Instituto de asfalto para diseño Marshall

Criterios para mezcla del método Marshall	Tránsito liviano Carpeta y base		Tránsito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N (lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo 0.25mm (0.01 pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver tabla 8					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, Asphalt Institute

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideran satisfactorias si cumplen los criterios cuando ensayen a 38°C, si se colocan a 100mm o más por debajo de la superficie.

² Condiciones de tránsito

Liviano: Condiciones de tránsito resultan en un ESAL de diseño < 104

Mediano: Condiciones de tránsito en un ESAL de diseño entre 104 y 106

Pesado: Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

Tabla 8: Porcentaje mínimo de VMA

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de diseño, por ciento ³		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, Asphalt Institute

NOTAS

¹ Especificación norma para tamaño de tamices usados en pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

2.1.4.3.Descripción del método Marshall

Diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma le pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

Agregado grueso

Este material debe consistir en grava y/o gravilla de buena calidad triturada (Retenidos en la malla de 4,75mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a

uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos generales siguientes.

Tabla 9: Requisitos en agregado grueso

Ensayo	Normativa
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles. (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511	< 40%
Caras fracturadas en agregados gruesos. A0508	> 75%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración. (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	< 12%

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

Agregado fino:

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4,75mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según ASTM D3515 (Tabla 6), y que llene además los requisitos generales siguientes.

Tabla 10: Requisitos en agregado grueso

Ensayo	Normativa
Equivalente de arena. (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509	> 45%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	< 12%

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

- Secando el Agregado

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

- Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

- Determinación del peso específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua.

El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua.

El cálculo del peso específico de la muestra seca del agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

Preparación de las muestras de ensayo

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

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- a. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- b. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de

compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

- c. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Imagen 3: Diseño de las briquetas según método Marshall



Fuente: Cueva del ingeniero civil. Elaboración para núcleos de prueba (Método Marshall).

Recuperado de: BLOG ROLL

Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Éstos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

Determinación del peso específico-total (AASHTO T 166): El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos.

Ensayo de estabilidad y fluencia: El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60°C (140°F). Esta temperatura representa, 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 de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta 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.
 - a. Valor de estabilidad Marshall: El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall. Debido a que la estabilidad Marshall 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 será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

- b. Valor de fluencia Marshall: La fluencia Marshall, 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 muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

- c. Análisis de densidad y vacíos: Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.⁵

2.2.Las mezclas asfálticas tibias

Las mezclas tibias se describen como aquéllas que se producen y colocan a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

⁵ Homes, L. &. (2013). *Metodo Marshall*. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales.⁶

2.2.1. Beneficios de la mezcla tibia

Consumo de energía

La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta.

Imagen 4: Prueba de comparación de MAC y MAT



Fuente: Proceso de mezcla con los agregados pétreos (2015). Recuperado de: amaac.org

⁶ Román Chamba, R. (Septiembre de 2017). Fabricación de hormigones asfálticos Tibios en el Ecuador . Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja

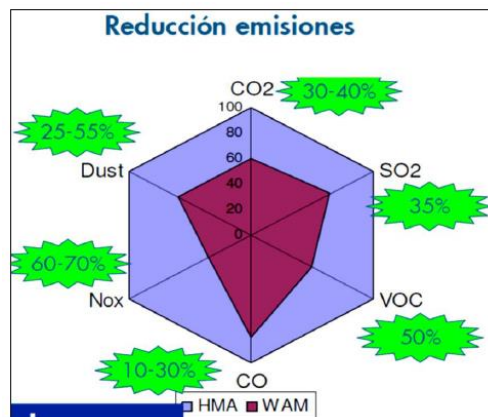
Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación.

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste de la planta de asfalto.

Emisiones

Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones debido a la reducida temperatura de producción. De acuerdo a la literatura, la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Imagen 5: Reducción de emisiones en la producción de mezcla en planta



Fuente: Reunión del asfalto Rosario (2008). Recuperado de: EFE Verde

Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud

de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

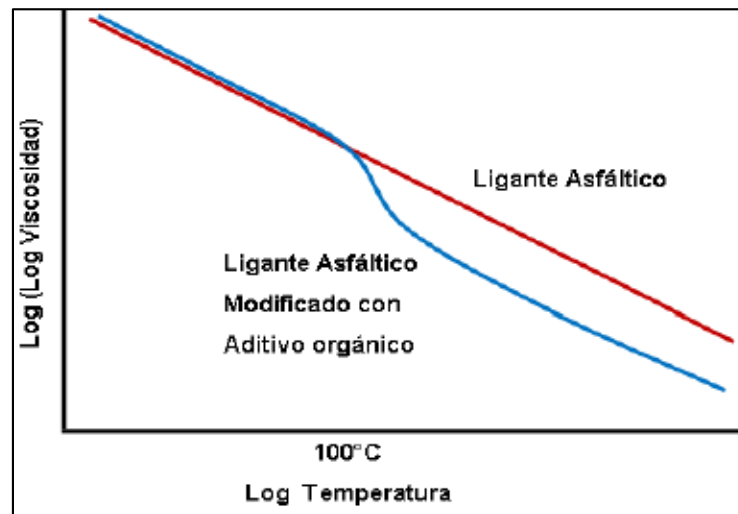
Viscosidad

La funcionalidad de las tecnologías de las Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto.

La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

Imagen 6: Reducción de la viscosidad utilizando aditivos orgánicos



Fuente: Mezclas Asfálticas Tibias (MAT). Ulloa Calderón, A. Recuperado de: SciELO

Técnicos

Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto, se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

Entre otros beneficios potenciales de las MAT, es posible citar:

Las temperaturas de producción y colocación significativamente menores.

Disminución de las emisiones y olores en la planta durante las etapas de mezclado y colocación.

Permite mayores distancias de acarreo de la mezcla (debido a la menor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla).

Menor velocidad de enfriamiento desde la temperatura máxima hasta lograr la temperatura de compactación.

Mejora de las condiciones de trabajo de la planta y el equipo de pavimentación.

Imagen 7: Reducción de las temperaturas de colocación y compactación



Fuente: Mezclas Asfálticas Tibias. Ulloa Calderón, A. (2017). Recuperado de: SHARE

De seguridad

Mejores condiciones de trabajo, seguridad y salud laboral y ausencia/disminución de partículas en suspensión.

2.2.2. Estudio de las mezclas semicalientes en el laboratorio

Los ensayos para el diseño de esta mezcla en el laboratorio serán los mismos que los utilizados para las mezclas convencionales.

Habrá que tener en cuenta a la hora de fabricar las probetas la temperatura recomendada de fabricación y compactación para acercarse lo más posible a las especificaciones de las mezclas convencionales.

Los resultados deben ser, como mínimo, similares a los obtenidos con los betunes convencionales a las temperaturas habituales, 160 °C, de fabricación. En especial se debe tener en cuenta que las menores temperaturas de fabricación hacen que el betún sufra un menor envejecimiento.

Este tipo de mezclas y como consecuencia de la variación de la viscosidad, en algunos casos, del betún aditivado y, por tanto, de su manejabilidad de las probetas Marshall deben fabricarse a diferentes temperaturas de mezclado y compactado.

2.2.3. Recomendaciones para utilizar mezclas semicalientes

En climas fríos o sometido a cargas de tráfico lentas, ya que el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso, dejando que el agregado soporte las cargas cíclicas. Esto permite que las mezclas puedan ser transportadas a mayores distancias.

2.2.4. Estado mundial y tendencias futuras

La tecnología MAT (mezclas asfálticas tibias) a nivel mundial cuenta con organizaciones que apuestan por su desarrollo y su implementación en diversos tipos de infraestructuras.

En la actualidad, la institución que lidera y reúne a las diversas tecnologías de producción de las mezclas asfálticas tibias es el GTT WMA (Warm Mix Asphalt Technical Working Group).

Además, dentro de sus usos adicionales, las mezclas asfálticas tibias están siendo aplicadas no sólo en infraestructuras como carreteras, sino también en sistemas aeroportuarios. La ACI (Airport Council International) presenta un reporte sobre el Aeropuerto Internacional de Boston-Logan y la aplicación de WMA para su reconstrucción. Siendo la primera aplicación de esta tecnología en sistemas aeroportuarios.

2.2.5. Métodos para producir mezclas tibias

Existen diversas técnicas para conseguir la reducción de la temperatura de fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas, que podemos agrupar de la manera siguiente:

Aditivos orgánicos

Estas tecnologías se basan en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos fundidos solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante, análogo a los materiales reforzados con fibras. Es necesario seleccionar cuidadosamente el tipo de cera a utilizar, de manera que se eviten posibles problemas con las temperaturas. Es decir, si el punto de fusión de las ceras es más bajo que las temperaturas que se prevén en servicio del asfalto, pueden aparecer complicaciones, convirtiéndose entonces el asfalto en un material frágil a bajas temperaturas. Por lo tanto, hay que intentar que se encuentren en estado sólido a temperaturas de servicio.

Aditivos químicos

El último tipo de tecnologías que se va a considerar son los aditivos químicos. Estos productos no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación. En lugar de eso,

estos productos generalmente incluyen una combinación de agente emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la envuelta, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado.

Formación de espuma de asfalto (asfaltos espumados)

- Zeolita sintética
- Low Energy Asphalt bitumen (LEAB)⁷

2.3.Cera de soya

La cera de soya es una cera vegetal que proviene del aceite de los granos de la soya que es un valioso vegetal del grupo de las leguminosas, dentro de las que se incluyen los garbanzos, las lentejas y todos sus similares. Aunque la planta es originaria de China, su nombre proviene del Japón. Muchos países, al igual que Bolivia, siembran el grano de soya en grandes extensiones de terrenos, pero es Estados Unidos el país que, actualmente, produce mayor cantidad de soya.

Las grandes ventajas de la cera de soya es que es una fuente ilimitada, renovable y biodegradable. Mientras las reservas mundiales de petróleo se reducen y el precio de la parafina aumenta, el único límite de la oferta de cera de soya es cuánto la dejaremos crecer la planta de soya.

⁷ Turpo, V. W., & Mendoza, C. A. (2014). Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca. Peru, Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

Imagen 8: Fruto de soya



Fuente: Cera de soya, Lorena Ponce (2017). Recuperado de: Holadoctor

2.3.1. Proceso agroindustrial de la cera de soya

Primero se procesan las semillas de soya (también llamados granos o porotos), para obtener el aceite de soya, un aceite vegetal de muy alta calidad, seguidamente el aceite de soya es procesado para obtener la cera de soya. El proceso utilizado se llama "hidrogenación" proceso que convierte el aceite en grasa sólida. Por su procedencia esta cera se considera ambientalmente amigable o "eco amigable", proviene de una fuente renovable y es biodegradable. Haciendo de la cera de soya un producto sostenible.

Imagen 9: Proceso agroindustrial de la cera de soya



Fuente: Proceso de velas, Edwin Daniel (2014). Recuperado de: Ingeniería industrial

2.3.2. Usos de la cera de soya

Uso cosmético: compatible con una amplia gama de aceites y aditivos, es un agente hidratante de la piel, también usada en adición de bálsamos y crema de masaje.

Uso en la elaboración de velas naturales y respetuosas con el medio ambiente.

2.3.3. Propiedades de la cera de soya

En la siguiente tabla se presentan las propiedades que presentan la cera de soya:

Tabla 11: Propiedades de la cera de soya

CARACTERÍSTICAS	LIMITES
Punto de fusión	50 - 60°C
Punto de congelación	30 - 40°C
Viscosidad	8 – 12cps
Color	Blanco

Fuente: Proceso de velas, Edwin Daniel (2014). Recuperado de: Ingeniería industrial

2.4. Carreteras ecológicas

Desde hace varios años, las consideraciones de orden ambiental y de sostenibilidad se incorporan cada vez más con mayor relevancia en el desarrollo de los proyectos de infraestructura y construcción a nivel mundial. En el globo se realizan destacables esfuerzos desde los ámbitos técnicos, académicos y hasta comerciales, para lograr que lo que construimos sea respetuoso del cada vez más frágil entorno en que vivimos. De estos postulados han nacido las carreteras ecológicas, que, si bien aún tienen discrepancias en su definición y especificaciones, ya son una naciente realidad en algunas partes del planeta.

Imagen 10: Carreteras ecológicas



Fuente: Carreteras verdes o ecológicas, webmaster (2012).

Recuperado de: Revista maquinaria pesada

El concepto de carretera ecológica, se base en los métodos constructivos, así como en los materiales, impactos y demás situaciones que impliquen la afectación del medio ambiente, en su construcción y operación. En la actualidad, empieza a crecer la conciencia de los actores implicados en el desarrollo de la infraestructura vial de los países, principalmente en el primer mundo, en cuanto a la responsabilidad de que los futuros proyectos estén articulados con la preservación del medio ambiente.

En términos generales, una carretera se puede considerar ecológica (existen diferentes grados), si incorpora los siguientes 4 principios fundamentales: Conservación del ecosistema, que se aplica, por ejemplo, al de trazar un recorrido con un mínimo impacto en el entorno natural y la incorporación de un adecuado paisajismo. En segundo lugar, el de reciclaje o reúso, que se evidencia muy claramente en la utilización del caucho proveniente de llantas recicladas, reduciendo el uso de asfalto y evitando que las llantas vayan a la disposición final. El manejo de aguas es otro principio para darle a las carreteras ecológicas un tratamiento, uso o preservación; lo anterior tanto de las aguas lluvias que caen sobre éstas o la de los posibles ríos, lagos e incluso aguas marítimas que pueda circundar.

Finalmente, el principio de aprovechamiento energético, que consiste en que las carreteras sean tanto conservadoras en el uso de energía durante su construcción, como fuentes importantes de generación cuando están en operación.⁸

2.4.1. Crean asfalto ecológico para la construcción de carreteras

El estudio, publicado en la revista del CSIC 'Materiales de Construcción', revela que "es posible reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas hasta unos 30 grados, manteniendo un buen comportamiento mecánico", señala la UPM en un comunicado.

El asfalto desarrollado por la investigadora Ana María Rodríguez-Alloza podría considerarse "doblemente ecológico", ya que incorpora polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso y permite ahorrar betún y la energía que conlleva producirlo.

Con ello, se da salida a los neumáticos usados que, aunque reciclables, suponen un grave problema medioambiental ya que solo en España se generan al año unas 300.000 toneladas, al tiempo que se reduce la producción de betún, un recurso natural procedente del crudo.

Por otro lado, este nuevo asfalto ecológico incorpora una serie de ceras orgánicas que al llegar a su punto de fusión son capaces disminuir la viscosidad del ligante de la mezcla logrando, en consecuencia, que se pueda disminuir también la temperatura de fabricación en la planta.

Combinando la incorporación de un material reciclable y la disminución de temperatura de fabricación de las mezclas se logra "un material idóneo desde el punto de vista medioambiental además de una serie de ventajas económicas y sociales".

⁸ Webmaster. (1 de Abril de 2012). *Revista maquinaria pesada*. Obtenido de <http://revistamakinariapesada.com/carreteras-verdes-o-ecologicas/>

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Elección del tipo de mezcla y forma de trabajo

Para el desarrollo experimental fue seleccionada la mezcla asfáltica de granulometría densa en caliente, que se utiliza comúnmente en carreteras de tránsito pesado.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico de manera que el porcentaje de vacíos de la mezcla no supere el 6%. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Para desarrollar la investigación y llevar a cabo un análisis detallado del comportamiento de las mezclas asfálticas tibias elaboradas a diferentes temperaturas (100°C, 120°C y 135°C) se diseñaron cuatro fórmulas de trabajo en las que se hicieron variar los porcentajes de soya añadidas al cemento asfáltico con el objetivo de modificar su viscosidad (1%, 2%, 3% y 4%).

Asimismo, con el objeto de comparar los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas en tibio con las mezclas asfálticas de referencia se desarrolló otra forma de trabajo que está constituida de materiales convencionales en todas las fracciones.

3.2. Materiales empleados en el estudio

Los materiales a utilizarse para la elaboración de las mezclas asfálticas en estudio deben cumplir ciertas especificaciones según las normas ASTM, AASHTO y ABC.

Los materiales pétreos, al igual que el cemento asfáltico que se utilizó provienen del banco de materiales que se encuentra en las instalaciones de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija, ubicado en la avenida Panamericana y calle Guadalquivir, el cual cuenta con acopios de áridos que son empleados en la construcción de obras desarrolladas en la ciudad.

Imagen 11: Ubicación, Secretaría de Obras y Servicios Públicos – Alcaldía Municipal de Tarija

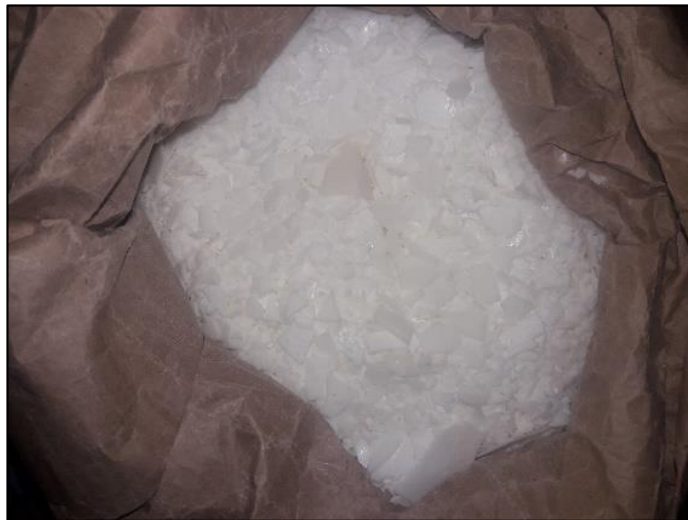


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la obtención de la cera de soya utilizada en la investigación se realizó la adquisición de la cera mediante un pedido especial por la inexistencia de este aditivo en nuestro medio. El pedido se lo realizó mediante la empresa comercializadora de ceras “GRAN VELADA” ubicada en la ciudad de Cochabamba.

La ficha técnica y el recibo proporcionado por la empresa se adjunta en los anexos.

Imagen 12: Cera de soya



Fuente: Elaboración propia

3.3. Caracterización de los materiales usados en el estudio

3.3.1. Caracterización de agregados y filler

Después de la obtención de los agregados a utilizar en la investigación se realiza la caracterización de cada uno de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas. Los ensayos de laboratorio para la caracterización se desarrollan de acuerdo a las disposiciones establecidas por el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.), para determinar entre otros: granulometría, equivalente de arena, peso específico, etc.

Los ensayos desarrollados para la caracterización de los agregados y el filler, se los realizo en el Laboratorio de Hormigones y Resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Los ensayos realizados de describen a continuación:

Tabla 12: Caracterización de los agregados

Agregado grueso (Grava y Gravilla)
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511
Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519
Método para determinar caras fracturadas.
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516

Agregado fino (Arena)
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516
Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.
Filler (Cemento)
Método para determinar la granulometría del filler. A0502

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1. Granulometría (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506

Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores. Este método se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos que serán utilizados como agregados. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables y para suministrar los datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que contengan agregados. Los datos pueden también servir para el desarrollo de las relaciones referentes a la porosidad y en el desarrollo de relaciones concernientes posteriores ensayos.

Granulometría del agregado grueso

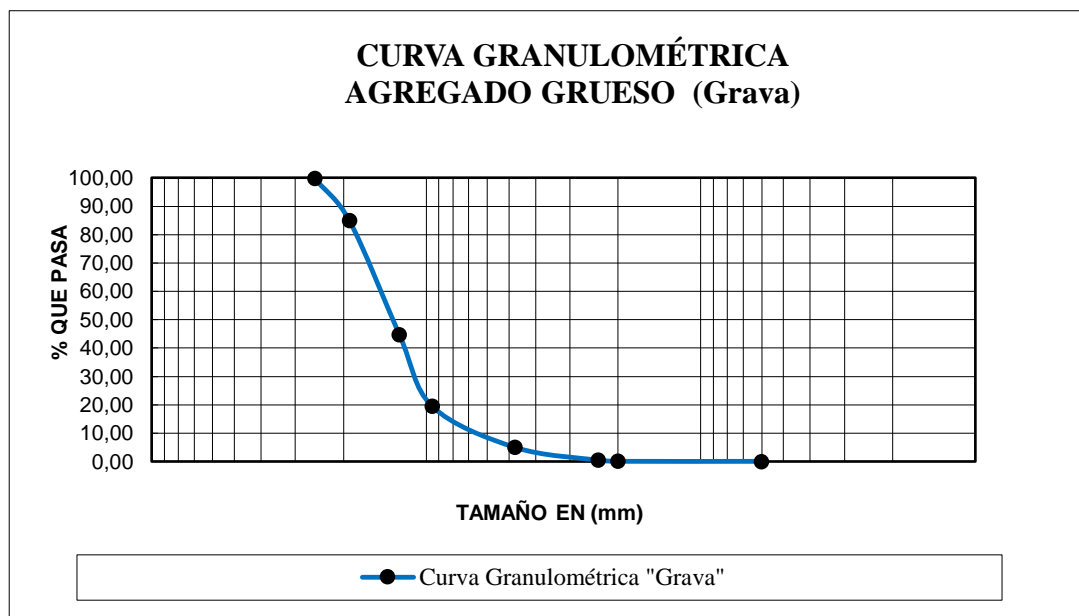
Procedencia: Banco de materiales que se encuentra en las instalaciones de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija

Tabla 13: Granulometría – agregado grueso

Peso Total (gr.)		5000,2			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	11,05	11,05	0,22	99,78
3/4"	19,00	743,74	754,79	15,10	84,90
1/2"	12,50	2015,09	2769,88	55,40	44,60
3/8"	9,50	1259,63	4029,51	80,59	19,41
Nº4	4,75	723,60	4753,11	95,06	4,94
Nº8	2,36	225,67	4978,78	99,57	0,43
Nº10	2,00	19,67	4998,45	99,97	0,03
Nº30	0,60	0,70	4999,15	99,98	0,02
BASE	-				
	SUMA	4999,2			
	PÉRDIDAS	1,05			

Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Curva granulométrica – agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Granulometría del agregado fino

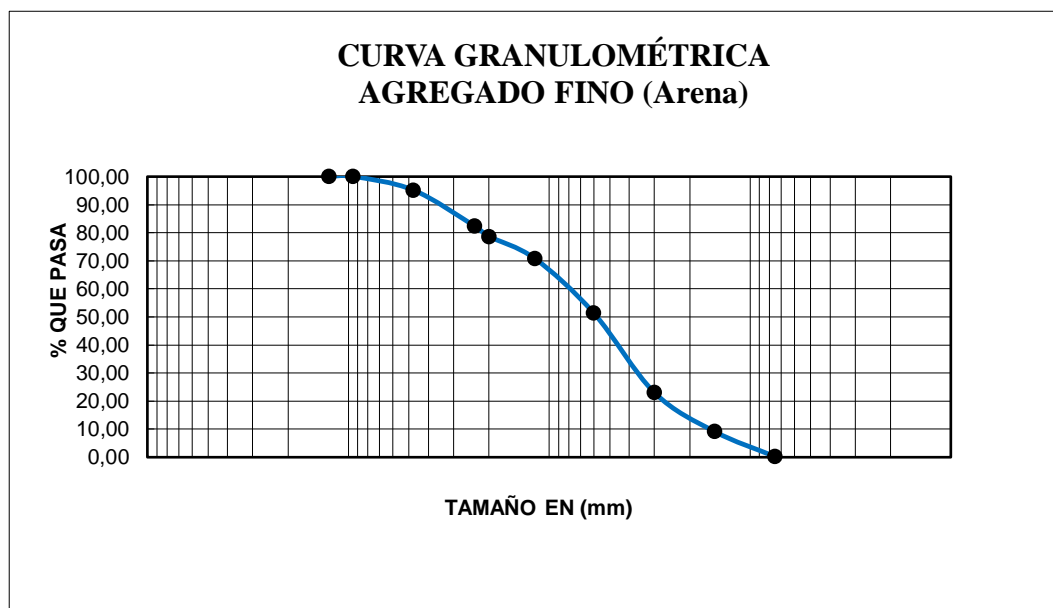
Procedencia: Banco de materiales que se encuentra en las instalaciones de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija

Tabla 14: Granulometría – agregado fino (arena)

Peso Total (gr.)		500			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total
1/2	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	24,20	24,20	4,84	95,16
N°8	2,36	63,90	88,10	17,62	82,38
N°10	2,00	18,60	106,70	21,34	78,66
N°16	1,18	39,40	146,10	29,22	70,78
N°30	0,60	97,20	243,30	48,66	51,34
N°50	0,30	141,30	384,60	76,92	23,08
N°100	0,15	69,63	454,23	90,85	9,15
N°200	0,075	44,60	498,83	99,77	0,23
BASE	-	1,00	499,83	99,97	0,03
SUMA		499,8			
PÉRDIDAS		0,2			

Fuente: Elaboración propia

Figura 2: Curva granulométrica – agregado fino (arena)



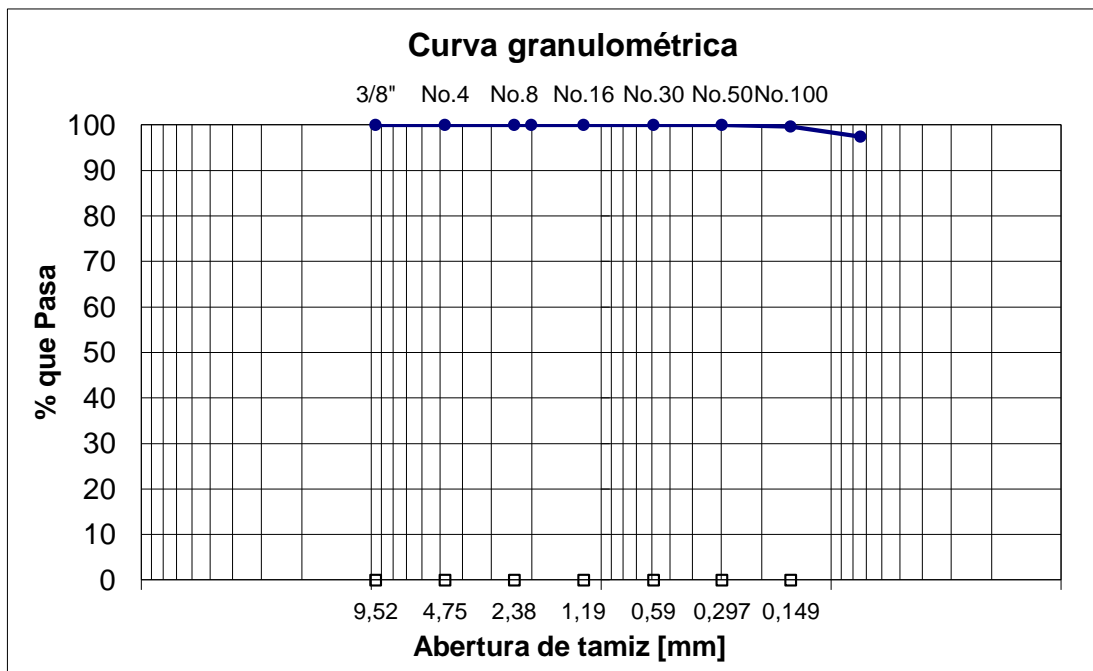
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Granulometría – filler cemento

Peso Total (gr.)		50			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
N°8	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
N°16	1,18	0,00	0,00	0,00	100,00
N°30	0,60	0,00	0,00	0,00	100,00
N°50	0,30	0,00	0,00	0,00	100,00
N°100	0,15	0,30	0,30	0,60	99,40
N°200	0,075	1,20	1,50	3,00	97,00
BASE	-	48,20	49,70	99,40	0,60
	SUMA	49,7			
	PÉRDIDAS	0,3			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Granulometría – filler cemento



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Peso específico y absorción de los agregados

Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519

Los agregados que serán estudiados deben de ser tamizados de tal manera que se elimine las partículas inferiores a 4,75, esta muestra es sumergida en agua a temperatura ambiente durante 24 ± 4 h. Se deben efectuar diferentes pesajes a la muestra de ensaye: peso superficialmente seco, peso sumergido y finalmente la muestra debe ser secada en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y pesadas por tercera vez.

Usando los pesos obtenidos y las fórmulas del método se calcula los tres tipos de gravedad específica y la absorción de agua en la muestra.

Tabla 16: Peso específico del agregado grueso

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Grava	Peso específico seco (PBS)	2,602
	Peso específico aparente (PEA)	2,674
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,629
	% de absorción	1,045%

Fuente: Elaboración propia

Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520

La muestra a ser ensayada debe estar sumergida en agua a temperatura ambiente para asegurar su saturación en un periodo de 24 ± 4 h. Pasado el periodo se debe eliminar el exceso de agua hasta llevarla a su condición suelta, para verificar que la muestra está superficialmente seca se la debe introducir en un molde cónico y apisonar 25 veces dejando caer el pistón de una altura de 1 cm aproximadamente, se debe retirar el molde y si la muestra se deja caer es porque alcanzo una condición saturada con superficie seca.

Se procede a tomar una muestra de 500 gramos del agregado superficialmente seco para envasarla en el picnómetro llenándolo con agua a 20°C hasta más o menos 250cm³, luego se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles. Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor.

Al término de este paso, se embaza la muestra en tazas para ser dejadas en el horno por espacio de 24 horas. Y, por último, al día siguiente se llevaron las muestras a la balanza y su cuantifico su valor.

Tabla 17: Peso específico del agregado fino (arena)

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena	Peso específico seco (PBS)	2,484
	Peso específico aparente (PEA)	2,611
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,533
	% de absorción	1,334 %

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3.Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511

Mediante este método se pretende conocer el coeficiente de desgaste de los agregados gruesos con la máquina de los ángeles en base al procedimiento de la norma. Consiste en determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas, el método consiste en analizar granulométricamente un árido grueso, preparar una muestra de ensayo que se somete a abrasión en la máquina de Los Ángeles donde se procede a colocar la muestra con la carga abrasiva, la cual consiste en esferas de acero, de un diámetro aproximado de 46,8mm y una masa comprendida entre 390g y 445g. Ya colocada la muestra con la carga abrasiva correspondiente en la máquina de los ángeles, se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208rad/minuto (30 y 33r.p.m) hasta completas 500 revoluciones. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente

constante. Una vez cumplido el número de vueltas, se retiran las cargas de la muestra y se procede a tamizar la muestra ensayada para medir el desgaste como un porcentaje de pérdida.

Tabla 18: Grados de ensaye (Definidos por sus rangos de tamaño, en mm)

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
Masa (gr)		5000±25	4584 ±25	330±25	2500±15
N°de revoluciones		500	500	500	500

Fuente: Manual de ensayos de suelos y asfaltos

Tabla 19: Desgaste de Los Ángeles – agregado grueso

Ensayo desgaste de Los Ángeles					
Gradación	Total (gr)	Retenido Tamiz N° 12	Diferencia (gr)	Desgaste %	Especificación máxima (%)
B	5000	3615,20	1384,80	27,70	35

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Caras fracturadas de agregado grueso

Este método describe la determinación del porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso que presenta una, dos o más caras fracturadas que cumplen los requisitos especificados.

Se lava el material sobre el tamiz designado para la determinación de las partículas fracturadas, con el fin de remover cualquier residuo de material fino y se seca a masa constante. Se debe determinar la masa de la muestra y cualquier determinación de masa

posterior con una aproximación del 0,1% de la masa seca original de la muestra. Se debe esparcir la muestra seca en una superficie suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula. Para verificar que una partícula cumple el criterio de fractura, se sostiene la partícula de agregado de tal manera que la cara pueda ser observada directamente. Si la cara constituye al menos un cuarto de la mayor sección transversal de la partícula, se debe considerar como una cara fracturada.

Tabla 20: Caras fracturadas – agregado grueso

Ensayo de caras fracturadas				
Peso de la muestra (gr)	Peso de caras fracturadas (gr)	Peso de caras sanas (gr)	Porcentaje de caras fracturadas (%)	Especificaciones mínimo (%)
1000	959,50	40,50	95,95	75

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5. Durabilidad de agregados mediante el método de sulfatos (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516

Este método cubre los procedimientos a seguirse en ensayos de agregados para determinar su resistencia a la desintegración por saturación en soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Esto es hecho por la inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguido por secado en horno para una deshidratación parcial o completa de la sal precipitada, en espacios permeables de los poros. La fuerza interna expansiva, derivada de la rehidratación de la sal en la reinmersión, simula la expansión de agua en el congelamiento.

Este método provee información que ayuda a juzgar la resistencia de los agregados sujetos a la elección climática, particularmente si es que no existe información estadística de los materiales sujetos a las actuales condiciones climáticas.

Se llama la atención al factor que resulta del ensayo de las sales que difieren considerablemente y se debe tener mucho cuidado en fijar límites apropiados en cualquier especificación, la cual puede incluir requerimiento para estos ensayos.

Durabilidad del agregado grueso

Tabla 21: Durabilidad mediante método de sulfatos – grava

Granulometría				Peso Materiales		Pérdida por Diferencia	% Pasa Tamiz más fino	%Pérdida Respecto Tamiz	% Pérdidas Respecto Muestra Total
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después				
N°	Pasa	Ret.			(gr)	(gr)	(gr)		
2"	2"	1"	100	0,00	0,00				
1 "	1 "	3/4"	92,11	500,00	487,30	12,70	54,21	2,54	1,38
3/4"	3/4"	1/2"	37,90	664,30	640,50	23,80	22,88	3,58	0,82
1/2"	1/2"	3/8"	15,02	333,80	313,10	20,70	14,57	6,20	0,90
3/8"	3/8"	N° 4	0,45	310,30	269,90	40,40	0,45	13,02	0,06
TOTAL % PÉRDIDA DE PESO									3,16
MÁXIMO									12,00

Fuente: Elaboración propia

Durabilidad del agregado fino

Tabla 22: Durabilidad mediante método de sulfatos – arena

Granulometría				Peso Materiales		Pérdida por Diferencia	% Pasa Tamiz más fino	%Pérdida Respecto Tamiz	% Pérdidas Respecto Muestra Total
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después				
N°	Pasa	Ret.			(gr)	(gr)	(gr)		
3/8"	3/8"	N° 4	93,70	100,0	89,8	10,2	13,65	10,20	1,39
N° 4	N° 4	N° 8	80,05	100,0	97,8	2,2	12,01	2,20	0,26
N° 8	N° 8	N° 16	68,04	100,0	97,4	2,6	21,46	2,60	0,56
N° 16	N° 16	N° 30	46,58	100,0	94,2	5,8	28,38	5,80	1,65
N° 30	N° 30	N° 50	18,20	100,0	89,3	10,7	18,20	10,70	1,95
TOTAL % PÉRDIDA DE PESO									5,81
MÁXIMO									12,00

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.6. Equivalente de arena

El objetivo de este método es realizar una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados. A un volumen determinado de suelo o agregado fino se le adiciona una

pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro de plástico graduado y agitándolos para que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa. La muestra es entonces irrigada, usando una cantidad adicional de solución floculante, para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena.

Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Tabla 23: Equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10,40	10,70	97,20
2	11,10	11,60	95,69
3	10,40	10,80	96,30
		Promedio	96,39

Fuente: Elaboración propia

El resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los agregados se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 24: Resumen de resultados obtenidos de la caracterización de los agregados

Ensayo	Resultado	Especificación ASTM
Agregado grueso		
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	*	-
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles. (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511	29,70%	< 35%
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519	*	-

Caras fracturadas en agregados gruesos. A0508	95,95%	> 75%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración. (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	3,16%	< 12%
Agregado fino		
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	*	-
Equivalente de arena. (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509	96,39 %	> 45%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	5,81 %	< 12%
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.	*	-
Filler		
Método para determinar la granulometría del filler. A0502	Cemento Portland	*
		-

* Datos expuestos en tablas anteriores

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Caracterización del cemento asfáltico

Previamente se realizó el ensayo de viscosidad, para generar una curva viscosidad vs temperatura para determinar hasta que porcentajes de cera de soya disminuirá la viscosidad del asfalto.

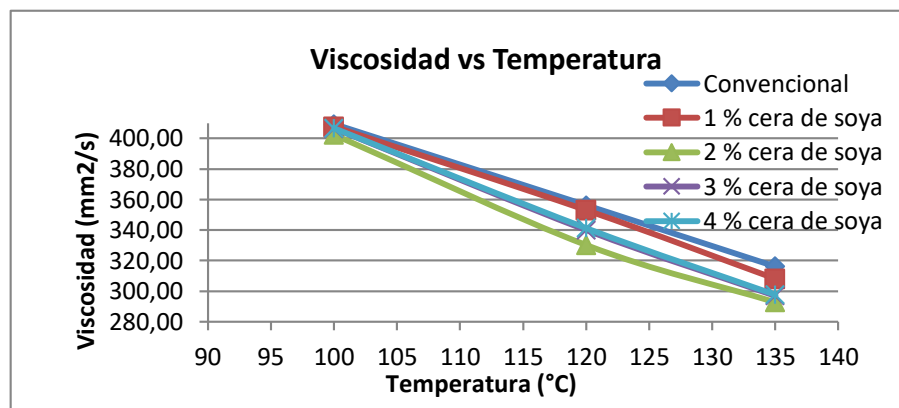
Tabla 25: Viscosidad según la temperatura y porcentaje de cera

Temperatura	Muestra				
	C-A Natural	C-A (1% Soya)	C-A (2% Soya)	C-A (3% Soya)	C-A (4% Soya)
100°C	409,32	407,56	402,5	406,46	406,68
120°C	356,29	352,99	330,32	340	341,32
135°C	316,23	308,09	292,9	297,09	297,75

Viscosidad cinemática mm²/s

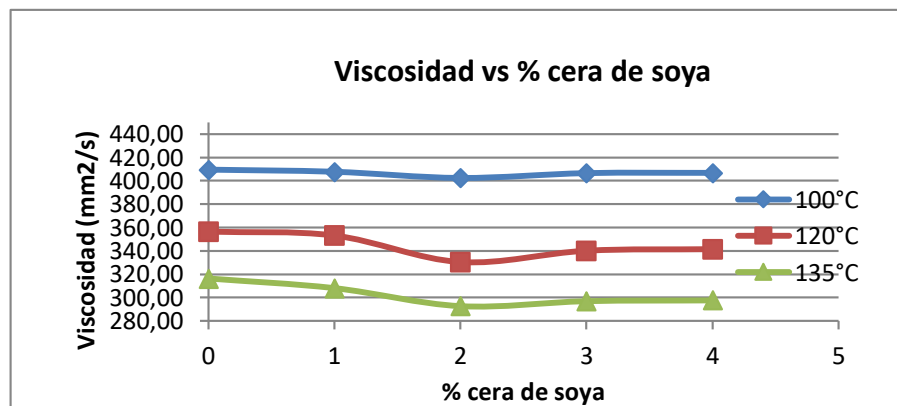
Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Temperatura – Viscosidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Viscosidad - % cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Porcentajes de cera de soya para la modificación del asfalto

Según la figura 4 y figura 5 se puede utilizar porcentajes en un rango de 1 a 4% de cera de soya siendo el porcentaje de 2% con menor viscosidad en las diferentes temperaturas

Ensayos de caracterización para el cemento asfáltico

Los ensayos realizados para la caracterización del cemento asfáltico convencional y para el cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes de cera de soya se hicieron de acuerdo a la disposición de los equipos en el laboratorio de Asfaltos en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, estos ensayos fueron basados en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.)

Los ensayos se describen a continuación:

Tabla 26: Caracterización del cemento asfáltico

Cemento asfáltico
Método para determinar la viscosidad cinemática (ASTM D 2170 AASHTO T201-01). A0108
Método para determinar el peso específico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97). A0102
Método de ensaye de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97). A0103
Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00). A0105
Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96). A0106
Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96). A0110

Fuente: Elaboración propia

Procedencia: PROBISA (Productos Bituminosos S.A.)

Tabla 27: Caracterización del cemento asfáltico 85/100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	32,9	34,1	36,9			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	83,5	85,7	88,3			
Peso picnómetro + muestra	gr.	55,5	55,9	56,9			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	83,8	86,0	88,7		.	
Peso específico	gr/cm ³	1,010	1,009	1,017	1,012	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	278	280	275	278	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	106	99	107	104	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	87	84	98			
	Lectura N° 2	82	90	89			
	Lectura N° 3	89	89	96			
	Promedio	mm	86	88	94	89	85
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170	mm ² /s	316	316	316	316	250	
Ensayo de la mancha		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina standart		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32mm, 163°C, 5hrs.		No se realizó					
* Pérdida en masa	%	No se realizó					
* Penetración del residuo, penetración original	%	No se realizó				47	
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó				-1	1
Punto de ablandamiento	°C	46,5	47,0	43,0	46,0	43,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

Ensayos adicionales de caracterización

Tabla 28: Caracterización del cemento asfáltico modificado
(1% cera de soya)

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	33,1	32,7	34,9			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	83,4	82,9	85,3			
Peso picnómetro + muestra	gr.	55,5	55,9	56,9			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	83,8	83,4	85,5		.	
Peso específico	gr/cm ³	1,015	1,019	1,006	1,013	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	260	271	274	268	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	102	103	100	102	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	87	84	98			
	Lectura N° 2	82	90	89			
	Lectura N° 3	89	89	96			
	Promedio	mm	87	91	94	91	85
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170	mm ² /s	308	308	308	308	250	
Ensayo de la mancha		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina standart		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32mm, 163°C, 5hrs.		No se realizó					
* Pérdida en masa	%	No se realizó					
* Penetración del residuo, penetración original	%	No se realizó				47	
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó				-1	1
Punto de ablandamiento	°C	45,0	45,5	44,0	45,0	43,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Caracterización del cemento asfáltico modificado
(2% cera de soya)

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	35,8	36,6	34,6			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	86,4	87,9	86,3			
Peso picnómetro + muestra	gr.	56,4	57,3	56,4			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	86,7	88,1	86,9		.	
Peso específico	gr/cm ³	1,012	1,007	1,025	1,015	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	250	245	251	249	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	104	99	98	100	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	87	83	100			
	Lectura N° 2	85	95	102			
	Lectura N° 3	91	96	104			
	Promedio	mm	88	91	102	94	85
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170	mm ² /s	293	293	293	293	250	-
Ensayo de la mancha		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina standart		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32mm, 163°C, 5hrs.		No se realizó					
* Pérdida en masa	%	No se realizó					
* Penetración del residuo, penetración original	%	No se realizó				47	
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó				-1	1
Punto de ablandamiento	°C	44,5	44,0	43,0	44,0	43,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Caracterización del cemento asfáltico modificado
(3% cera de soya)

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	33,9	34,1	36,9			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	84,5	85,7	87,3			
Peso picnómetro + muestra	gr.	56,5	55,9	56,9			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	85,1	86,0	87,7		.	
Peso específico	gr/cm ³	1,024	1,009	1,017	1,017	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	251	242	247	247	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	90	104	103	99	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	100	93	105			
	Lectura N° 2	105	102	110			
	Lectura N° 3	105	98	115			
	Promedio	mm	102	98	110	103	85
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170	mm ² /s	297	297	297	297	250	
Ensayo de la mancha		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina standart		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32mm, 163°C, 5hrs.		No se realizó					
* Pérdida en masa	%	No se realizó					
* Penetración del residuo, penetración original	%	No se realizó				47	
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó				-1	1
Punto de ablandamiento	°C	42,5	43,0	40,0	42,0	43,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Caracterización del cemento asfáltico modificado
(4% cera de soya)

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	35,2	34,5	35,5			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	85,4	85,3	82,1			
Peso picnómetro + muestra	gr.	56,8	57,9	56,2			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	85,9	85,5	82,6		.	
Peso específico	gr/cm ³	1,021	1,006	1,022	1,016	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	235	245	240	240	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	75	82	86	81	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1		105	112	120		
	Lectura N° 2		110	110	125		
	Lectura N° 3		115	120	115		
	Promedio	mm	110	114	120	115	85
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170	mm ² /s	298	298	298	298	250	
Ensayo de la mancha		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina standart		No se realizó				Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó				Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 32mm, 163°C, 5 hrs.		No se realizó					
* Pérdida en masa	%	No se realizó					
* Penetración del residuo, penetración original	%	No se realizó				47	
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó				-1	1
Punto de ablandamiento	°C	42,5	41,0	40,5	41,0	43,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

El resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 32: Resumen de los resultados obtenidos de la caracterización del cemento asfáltico convencional y modificado con cera de soya

	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones	
						Min.	Max.
Peso específico (gr.)	1,012	1,013	1,015	1,017	1,016	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48 (°C)	278	268	249	247	240	>232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 (cm)	104	102	100	99	81	>100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49 (mm)	89	91	94	103	115	85	100
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-2170 (mm ² /s)	316	308	293	297	298	250	-
Punto de ablandamiento (°C)	46	45	44	42	41	43	53

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Caracterización de la cera de soya

Los ensayos realizados para la caracterización de la cera de soya se hicieron de acuerdo a la disposición de los equipos en el laboratorio de Asfaltos en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho de la ciudad de Tarija, estos ensayos fueron basados en la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) utilizando los métodos de prueba para detectar el punto de fusión y penetración de la cera de petróleo por su gran similitud en las propiedades físicas con la cera de soya

Los ensayos se describen a continuación:

Tabla 33: Caracterización de la cera de soya

Cera de soya
Método de prueba estándar para detectar el punto de fusión de la cera (ASTM D127-08)
Método de ensaye de penetración (ASTM D -1321)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34: Caracterización de la cera de soya

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom	Especificaciones ASTM		Especificaciones Técnicas de la cera de soya
						Mín.	Máx.	
Punto de fusión ASTM D127-08	°C	57	55	56	56	50	60	55
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) ASTM D-1321	Lectura N° 1	27	27	28				-
	Lectura N° 2	25	25	24				-
	Lectura N° 3	24	26	24				-
	Promedio	mm	25	26	25	26	25	-

Fuente: Elaboración propia

3.4. Diseño Marshall de las mezclas asfálticas

El diseño de las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas tibias se desarrolló en el laboratorio, para evaluar el desempeño de la mezcla tibia con cera de soya, para ello se realizaron probetas con la misma granulometría y porcentaje de asfalto de la mezcla patrón, utilizando asfalto modificado con 1,0; 2,0; 3,0 y 4% de cera de soya, para determinar el porcentaje de cera que logre reducir considerablemente la temperatura de mezclado y compactado sin afectar el desempeño de la mezcla. Los resultados obtenidos pondrán de manifiesto la posibilidad de fabricar mezclas asfálticas

tibias modificadas con cera de soya, capaz de cumplir con las exigencias por la normativa de para mezclas de capa de rodadura.

Como partida de los trabajos de laboratorio, se determinaron las granulometrías y porcentajes óptimos de betún a emplear en cada fórmula de trabajo, en base a las características recogidas para este tipo de mezclas. Para poder establecer un análisis más explícito de los resultados obtenidos durante el diseño de éstas, se recogerán cada una de ellas por separado. Se comenzará por el análisis de la mezcla convencional de referencia, y posteriormente se pasará a las mezclas tibias.

3.4.1. Mezcla convencional

Dosificación de agregados

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos, dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es muy fácil elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados

Método analítico: La fórmula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = Gxa + Fxb + Mxc \dots etc.$$

Donde:

P = es el porcentaje de material que pasa un tamiz dado para la combinación de agregados, G, F, M, etc...

G, F, M, etc...= porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados G, F, M, etc...

a, b, c, etc...= proporciones de agregados G, F, M, etc. Usadas en la combinación y cuyo total es 1.

La primera mezcla diseñada fue la convencional de forma que los resultados obtenidos en ésta pudieran servir de referencia para las otras mezclas a estudiar. En base a las granulometrías de los áridos y el cemento para el filler, se realizó el ajuste granulométrico de la fórmula de trabajo de la mezcla para que cumpliera con el uso establecido para la mezcla. El encaje se realizó en peso, y los porcentajes a añadir de cada material fueron un 50% de agregado grueso, un 45% de arena y 5% de cemento Portland.

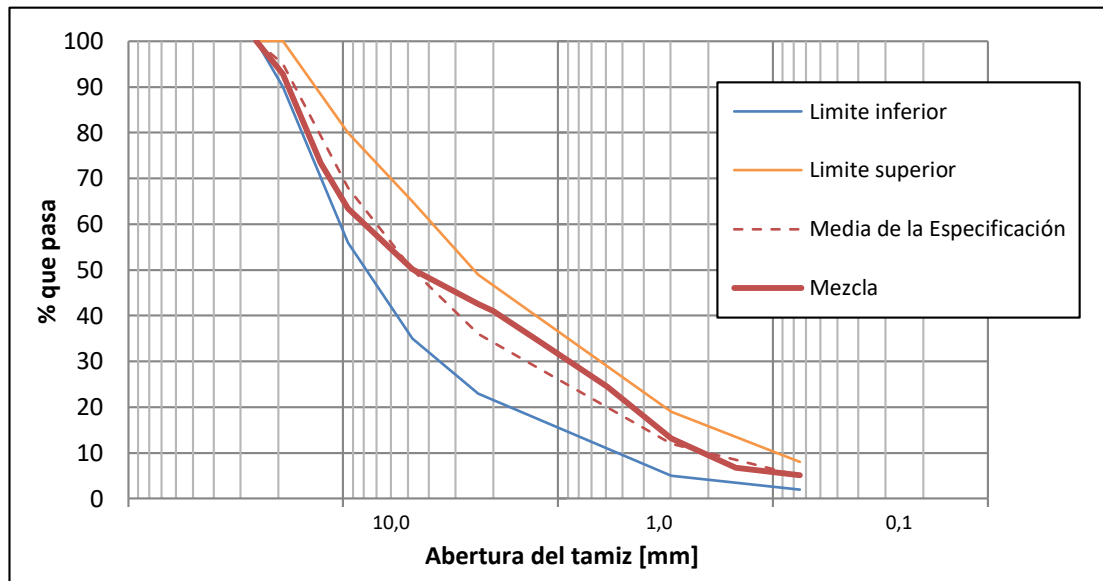
La curva granulométrica resultante es la siguiente:

Tabla 35: Granulometría mezcla convencional

Tamiz N°	Grava % Pasa	Arena % Pasa	Filler % Pasa	Abertura Tamiz mm	Mezcla	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")		
						Mínimo	Máximo	Media
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	38,1	100	100		100
1"	100,00	100,00	100,00	25,4	100	100		100
3/4"	84,97	100,00	100,00	19,1	92,49	90	100	95
1/2"	44,39	100,00	100,00	12,7	72,2	-		-
3/8"	17,59	100,00	100,00	9,5	58,8	56	80	68
N° 4	6,63	93,18	100,00	4,8	50,25	35	65	50
N° 8	0,15	79,68	100,00	2,4	40,93	23	49	36
N° 10	0,04	76,65	100,00	2,0	39,51	-		-
N° 16	0,00	68,04	100,00	1,2	35,62	-		-
N° 30	0,00	45,68	100,00	0,59	25,56	-		-
N° 50	0,00	17,46	100,00	0,297	12,86	5	19	12
N° 100	0,00	3,56	99,60	0,149	6,58	-		-
N° 200	0,00	0,40	97,40	0,075	5,05	2	8	5
	50%	45%	5%	- Porcentajes usados en la mezcla -				

Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Curva granulométrica – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Materiales para el diseño Marshall

Tabla 36: Materiales para el diseño Marshall

Materiales	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de total agregado (%)	96,0	95,5	95,0	94,5	94,0	93,5
Peso del cemento asfáltico (gr)	48,00	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de grava (gr)	576,00	573,00	570,00	567,00	564,00	561,00
Peso de arena (gr)	518,40	515,70	513,00	510,30	507,60	504,90
Peso de filler (gr)	57,60	57,30	57,00	56,70	56,40	56,10
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el contenido óptimo de ligante a añadir a la mezcla, se realizó el ensayo Marshall con seis series de tres probetas, variando los contenidos de cada serie entre 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% y 6,5% sobre el peso de los áridos. Las características principales del ensayo fueron las siguientes:

Tabla 37: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – mezcla convencional

Dosificación	Grava	Arena	Filler
% de agregados	50%	45%	5%

Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

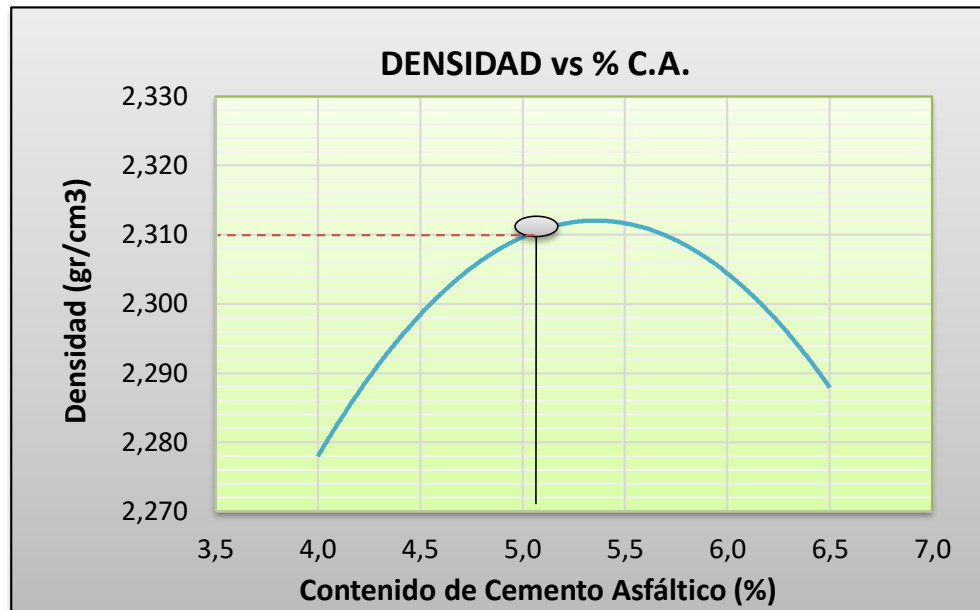
Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especific.
Densidad (gr/cm ³)	2,28	2,30	2,31	2,31	2,31	2,29	-
Estabilidad (lb)	1925,10	2186,10	2342,40	2195,10	1889,10	1601,00	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,00	4,58	3,37	2,51	2,18	2,23	3 – 5
VAM (%)	15,01	14,80	14,78	15,058	15,84	16,92	>13
RBV (%)	60,02	69,03	77,18	83,37	86,24	86,84	75 – 82
Flujo (1/100")	8,33	8,00	9,00	10,33	12,33	15,33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características

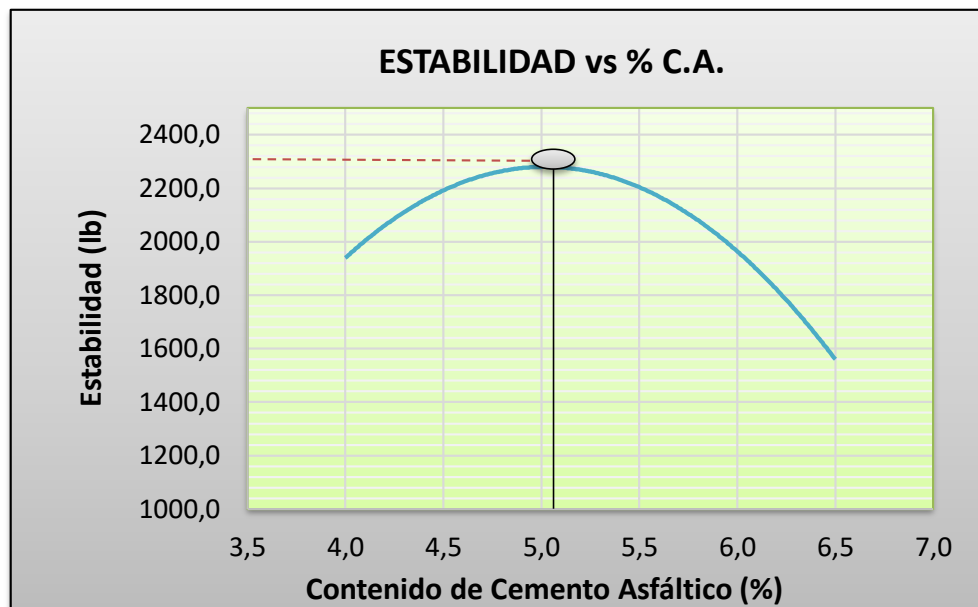
particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 7: Curva densidad Marshall – mezcla convencional



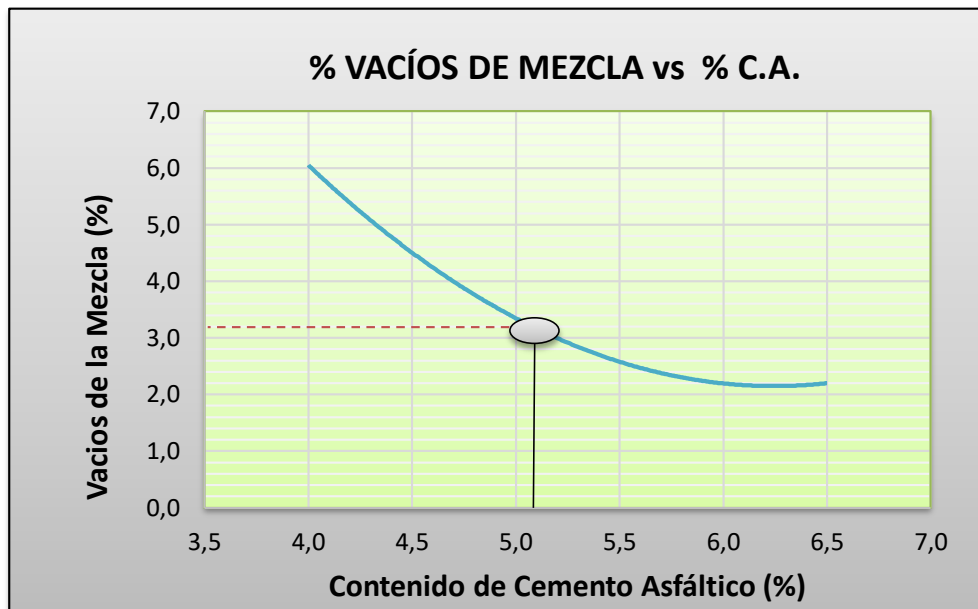
Fuente: Elaboración propia

Figura 8: Curva estabilidad Marshall – mezcla convencional



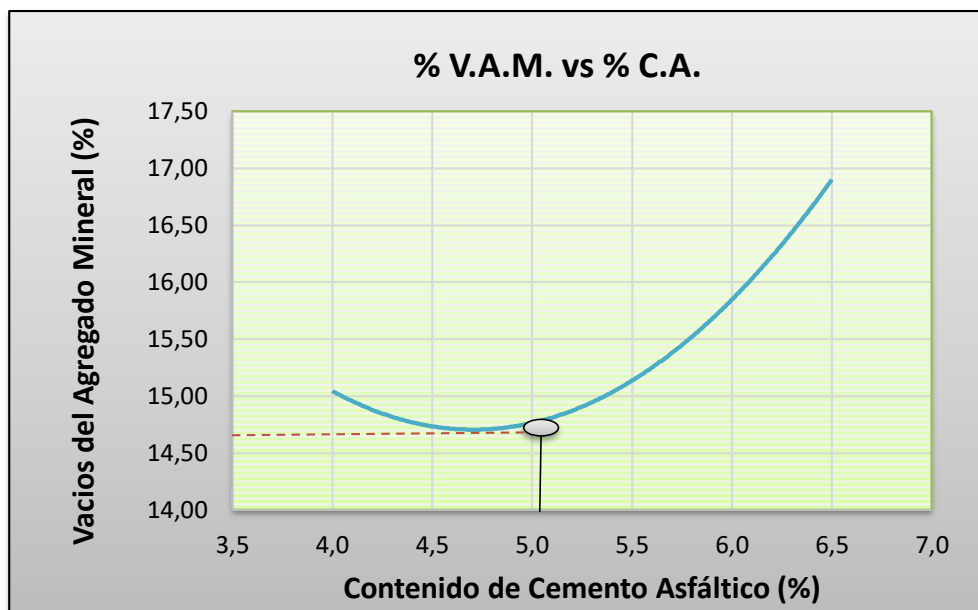
Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Vacíos de la mezcla – mezcla convencional



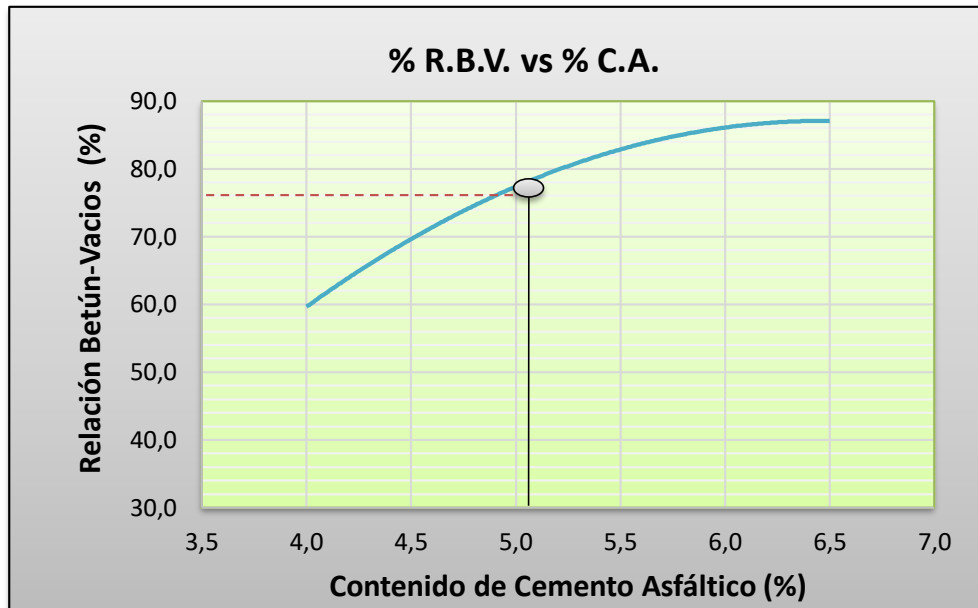
Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla convencional



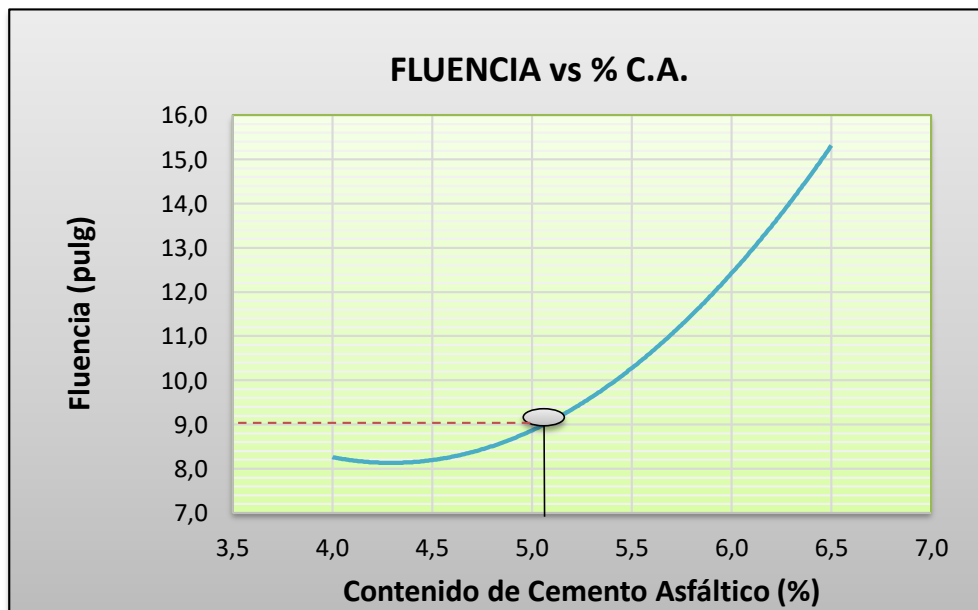
Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Relación betún vacíos – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Figura 12: Curva de fluencia – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Tabla 38: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla convencional

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2280,12	5,02
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,31	5,36
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,70
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla convencional

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,02	2,31	-----	-----
% Vacíos	5,02	3,30	3	5
R.B.V. (%)	5,02	77,69	75	82
V.A.M (%)	5,02	14,78	>13	
Estabilidad (lb)	5,02	2280	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,02	8,92	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,02	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de ligante que mejor satisface las condiciones es el 5,02%, que es por tanto el contenido óptimo de ligante con el que se fabricará la mezcla convencional.

3.4.2. Mezclas elaboradas con asfalto modificado

Para la elaboración de las mezclas asfálticas tibias se utilizó la misma dosificación de agregados y cemento asfáltico ya que sólo se hizo variar el peso de la cera en el peso total del betún antes de que este sea mezclado con los agregados. Se elaboraron las probetas a diferentes temperaturas 110°C, 120°C y 135°C.

3.4.2.1. Mezclas asfálticas tibias elaboradas a 110°C

Mezclas asfálticas tibias con adición de 1% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 120°C y compactadas a 110°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

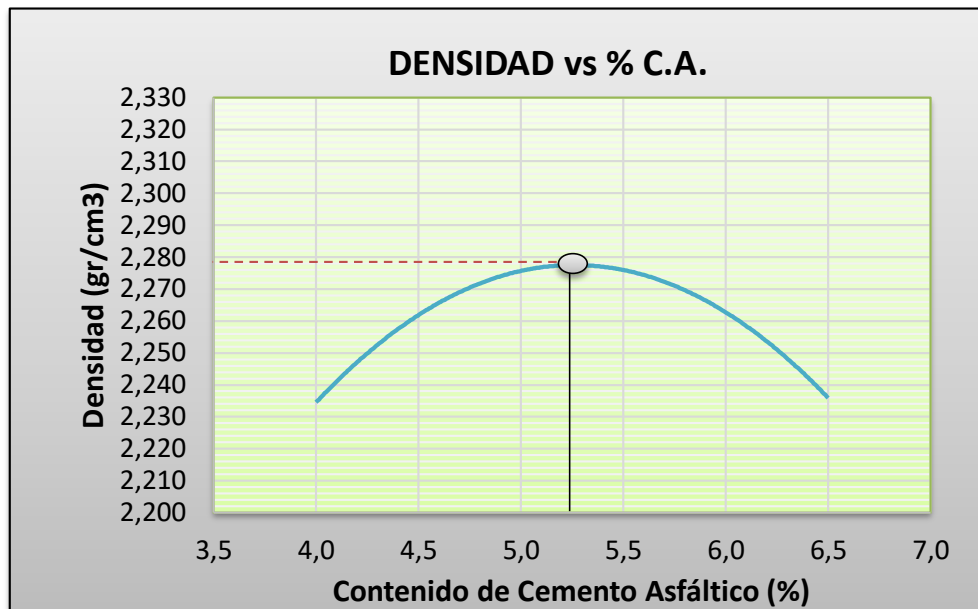
Tabla 40: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,24	2,26	2,27	2,28	2,27	2,23	-
Estabilidad (lb)	1689,10	1788,10	1790,50	1719,20	1662,10	1585,60	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7,66	6,28	4,97	3,93	3,68	4,65	3 – 5
VAM (%)	16,50	16,30	16,18	16,31	17,12	18,96	>13
RBV (%)	53,58	61,48	69,27	75,88	78,53	75,49	75 - 82
Flujo (1/100")	8,00	8,33	8,67	9,67	11,00	13,67	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

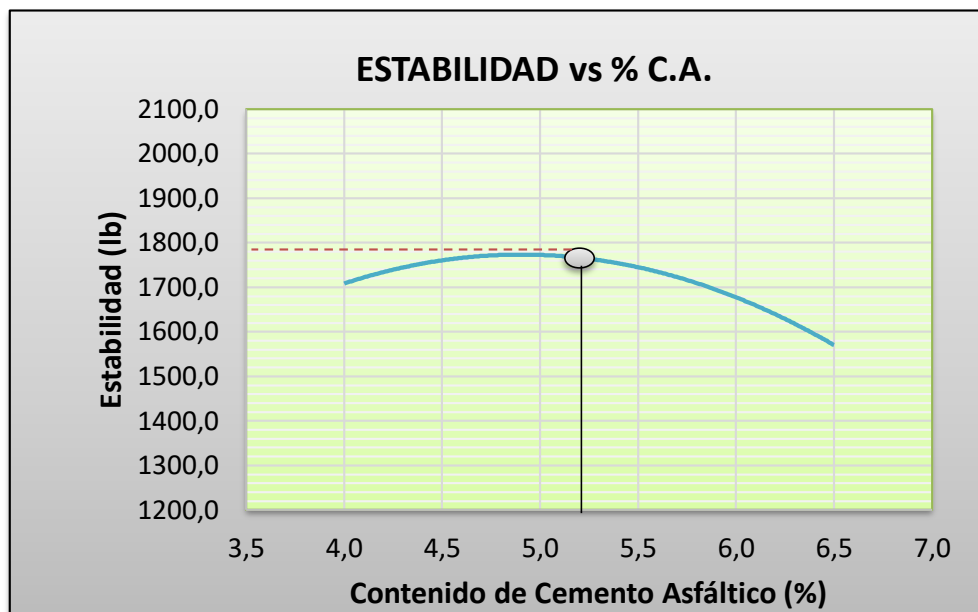
Igualmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 13: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



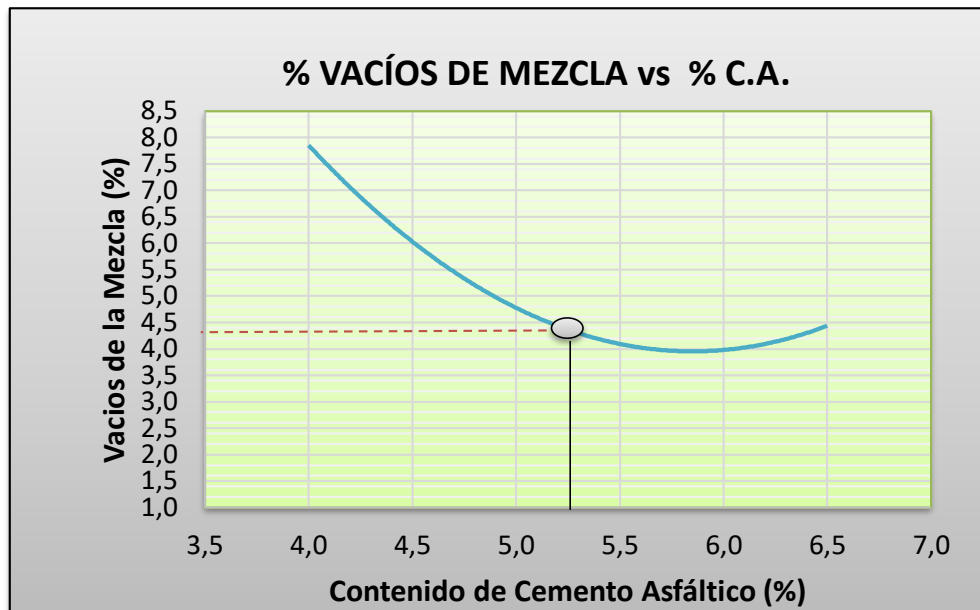
Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



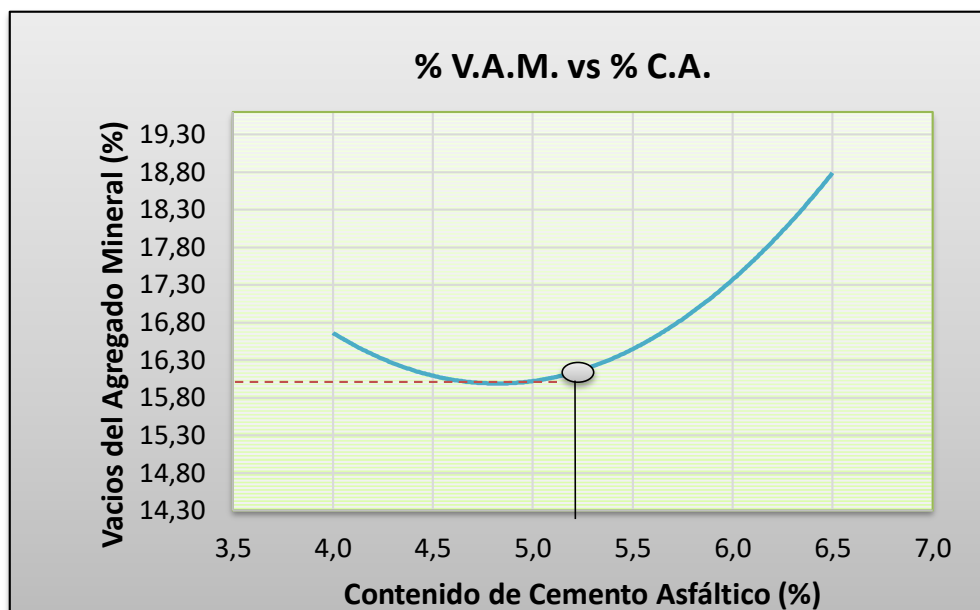
Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



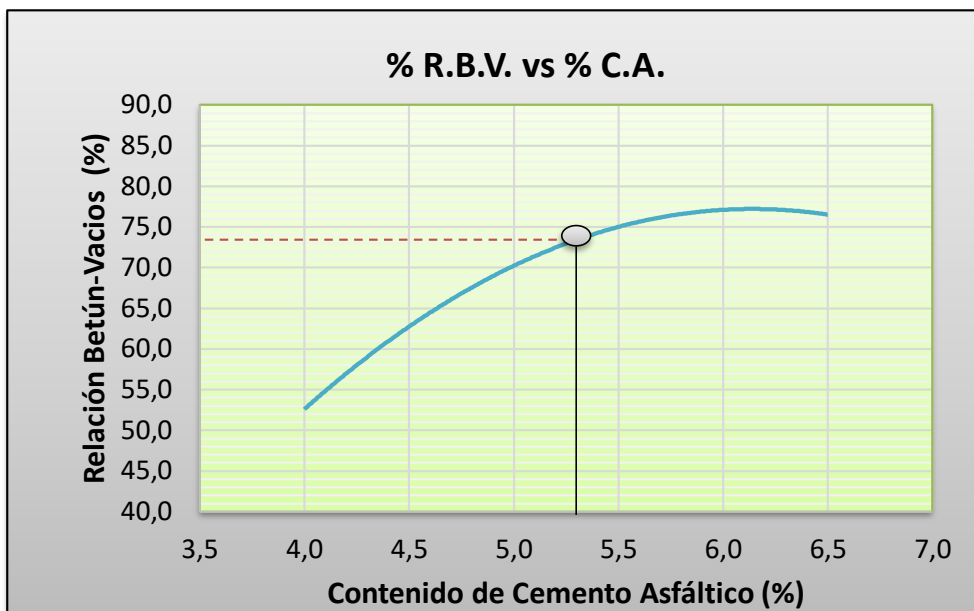
Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



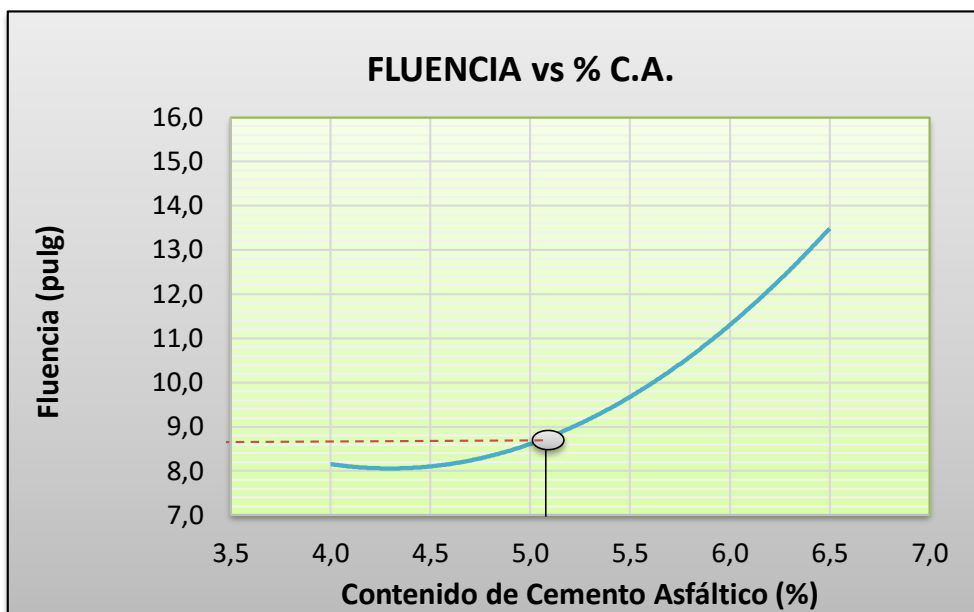
Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1773,40	4,90
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,28	5,25
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,66
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,27	2,28	-----	-----
% Vacíos	5,27	4,34	3	5
R.B.V. (%)	5,27	73,15	75	82
V.A.M (%)	5,27	16,19	> 13	
Estabilidad (lb)	5,27	1763	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,27	8,12	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5,27	

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos de estabilidad y vacíos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue de 5,27%.

Mezclas asfálticas tibias con adición de 2% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 120°C y compactadas a 110°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

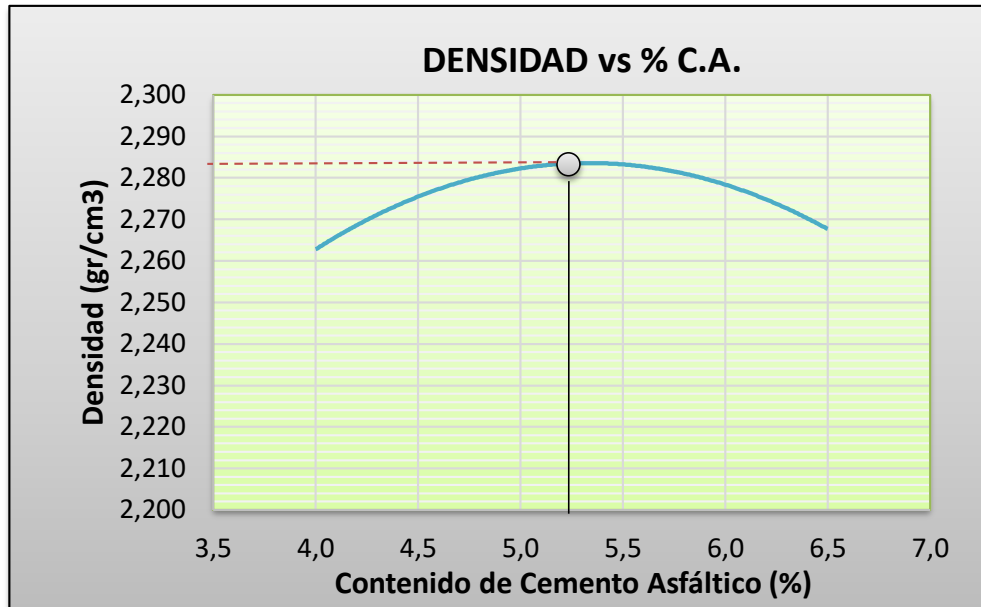
Tabla 43: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,26	2,28	2,28	2,28	2,28	2,27	-
Estabilidad (lb)	1856,60	1811,20	1818,10	1826,20	1730,50	1600,10	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,65	5,53	4,63	3,74	3,25	3,17	3 – 5
VAM (%)	15,57	15,61	15,86	16,12	16,73	17,69	>13
RBV (%)	57,28	64,60	70,80	76,78	80,58	82,06	75 – 82
Flujo (1/100")	8,00	8,33	9,00	9,33	10,00	11,33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

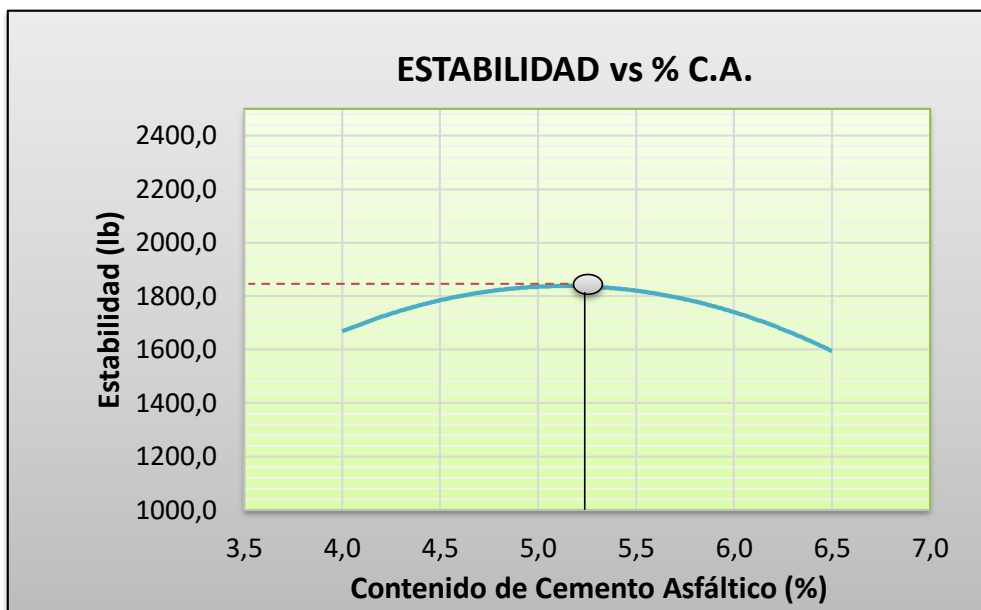
Con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 19: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



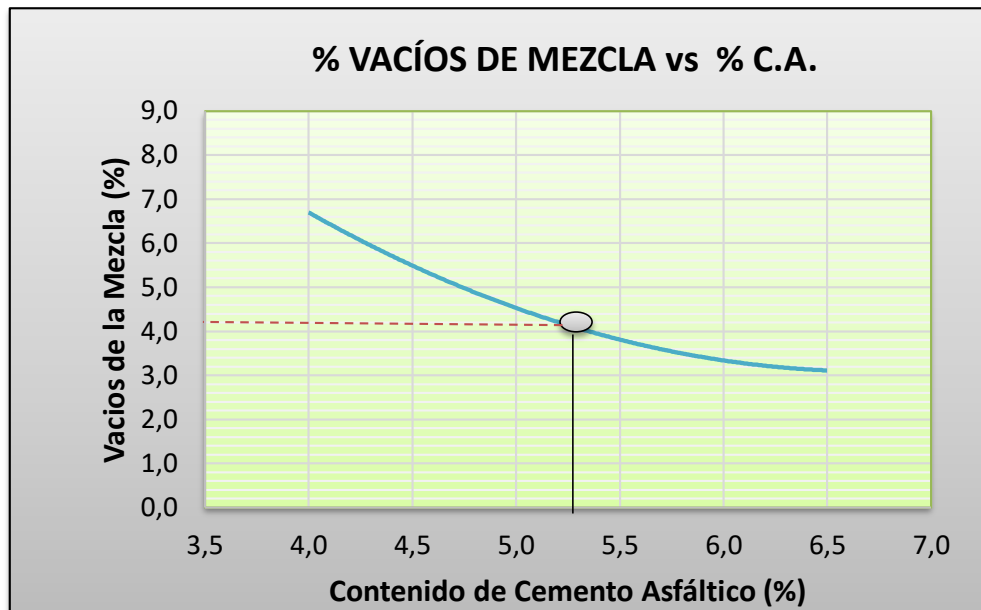
Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



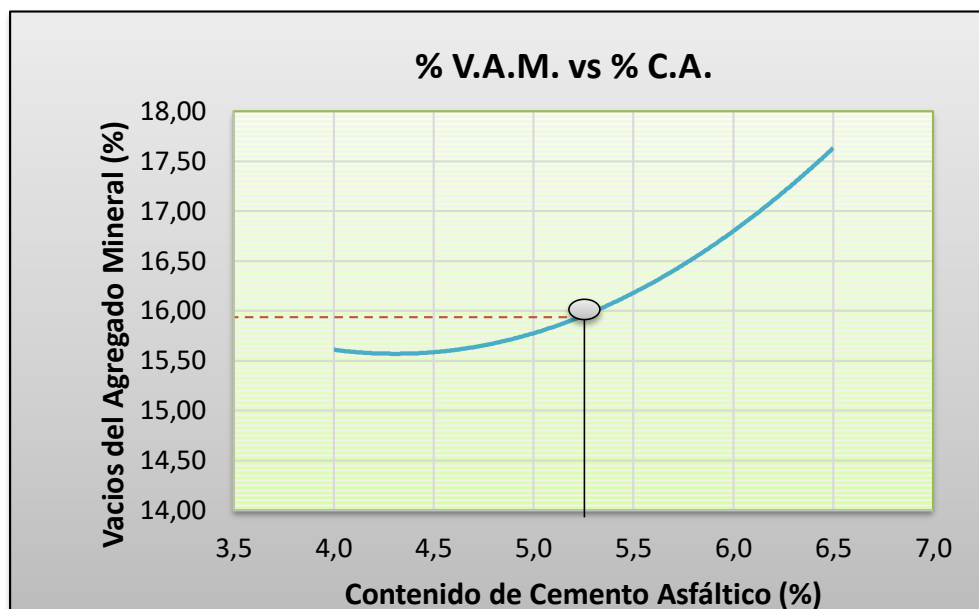
Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



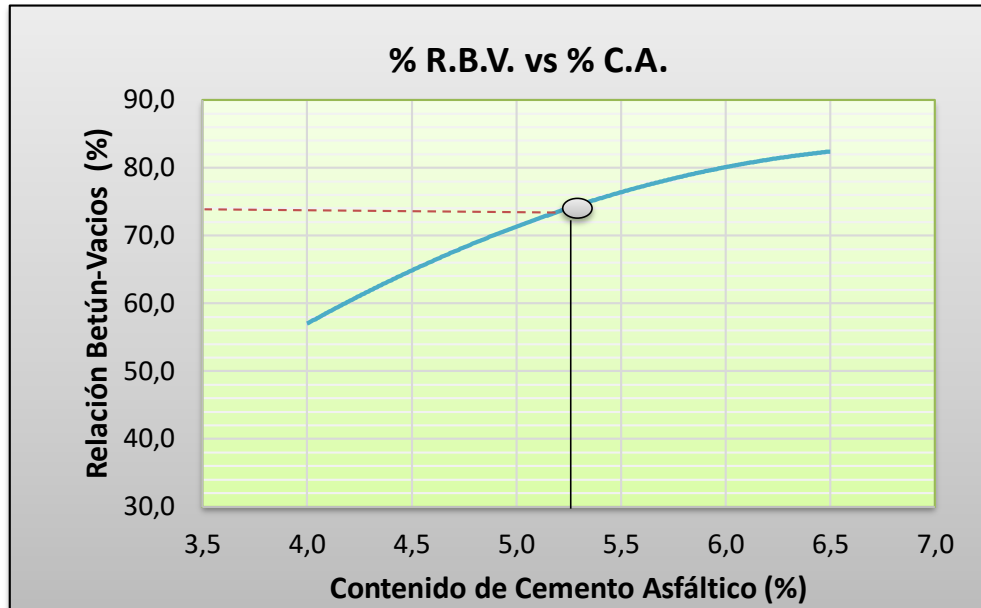
Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



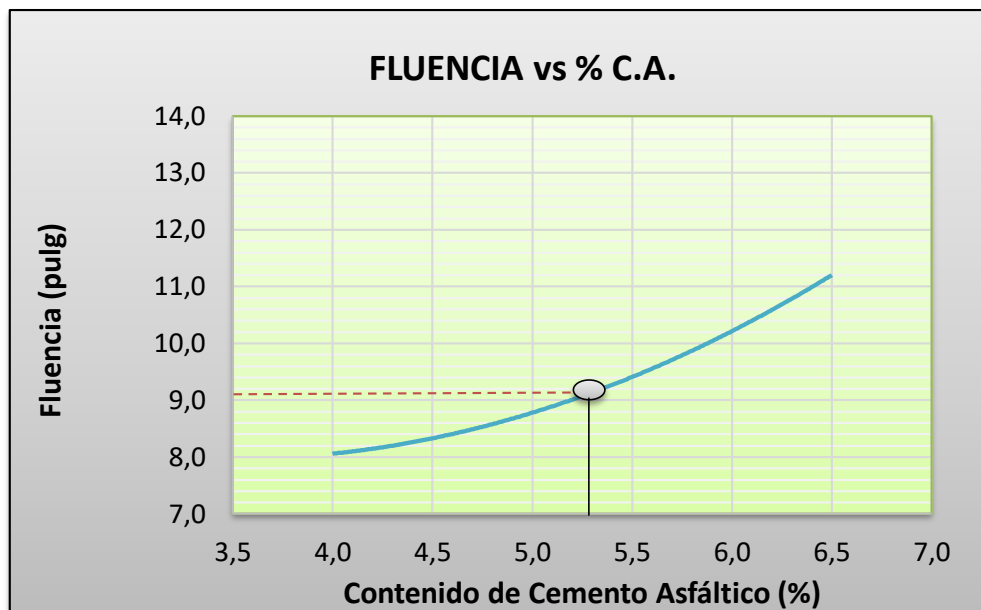
Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1837,57	5,14
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,28	5,32
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,35
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,27	2,28	-----	-----
% Vacíos	5,27	4,11	3	5
R.B.V. (%)	5,27	74,23	75	82
V.A.M (%)	5,27	15,97	>13	
Estabilidad (lb)	5,27	1835	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,27	9,10	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,27	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,27%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 3% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 120°C y compactadas a 110°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

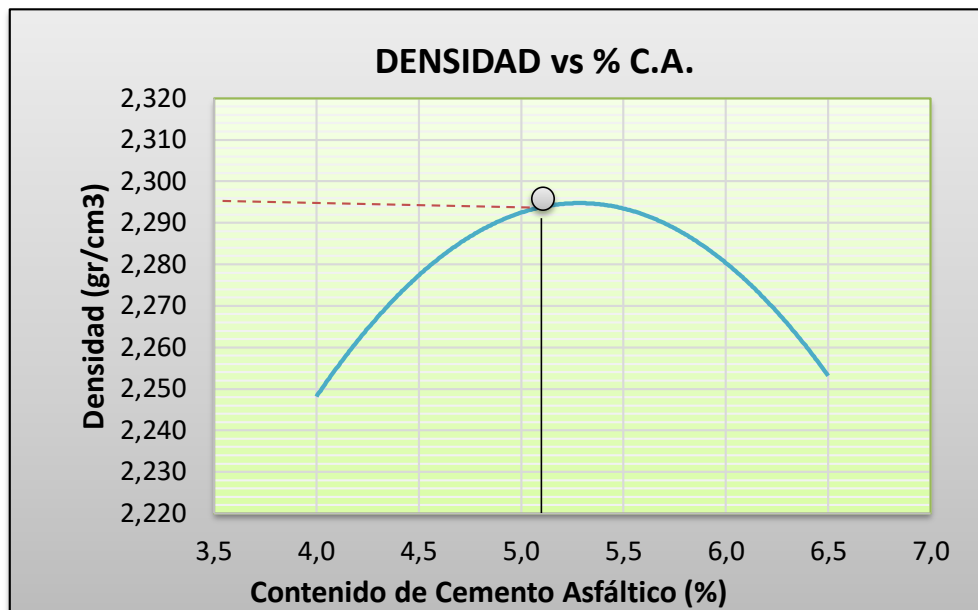
Tabla 46: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,25	2,28	2,29	2,29	2,28	2,25	-
Estabilidad (lb)	1666,50	1776,40	1815,30	1804,10	1708,10	1564,04	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7,29	5,50	4,13	3,34	3,32	3,76	3 – 5
VAM (%)	16,13	15,57	15,40	15,75	16,76	18,16	>13
RBV (%)	5,482	64,68	73,19	78,82	80,22	79,30	75 – 82
Flujo (1/100")	8,00	7,67	8,33	10,33	11,33	13,67	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

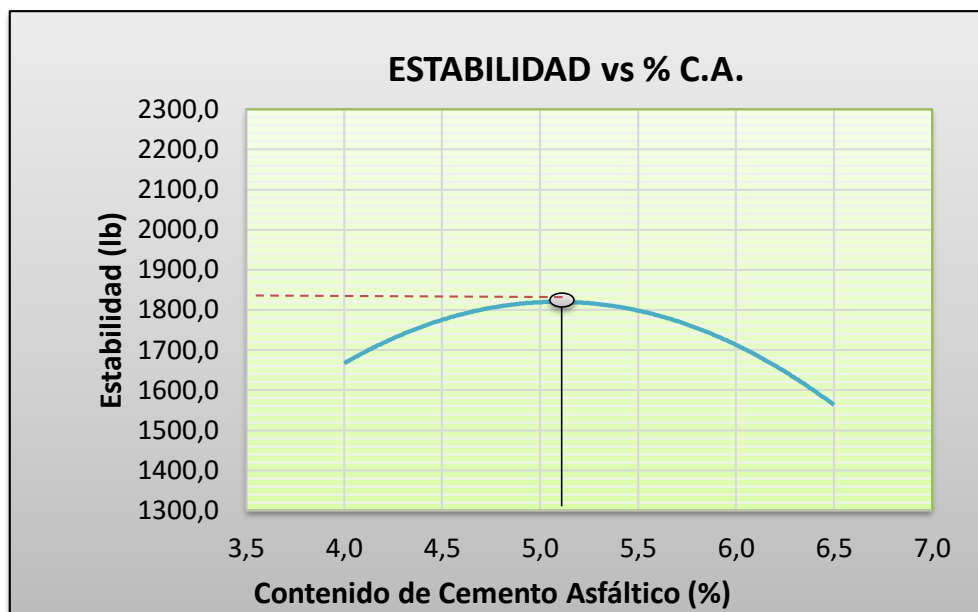
De la misma forma que en los anteriores casos, con los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 25: Densidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



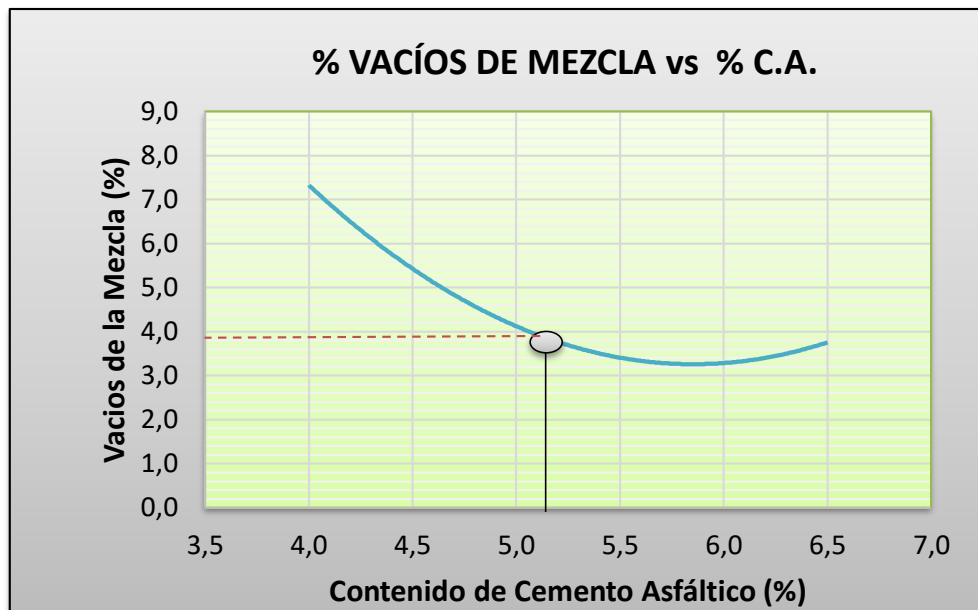
Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Estabilidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



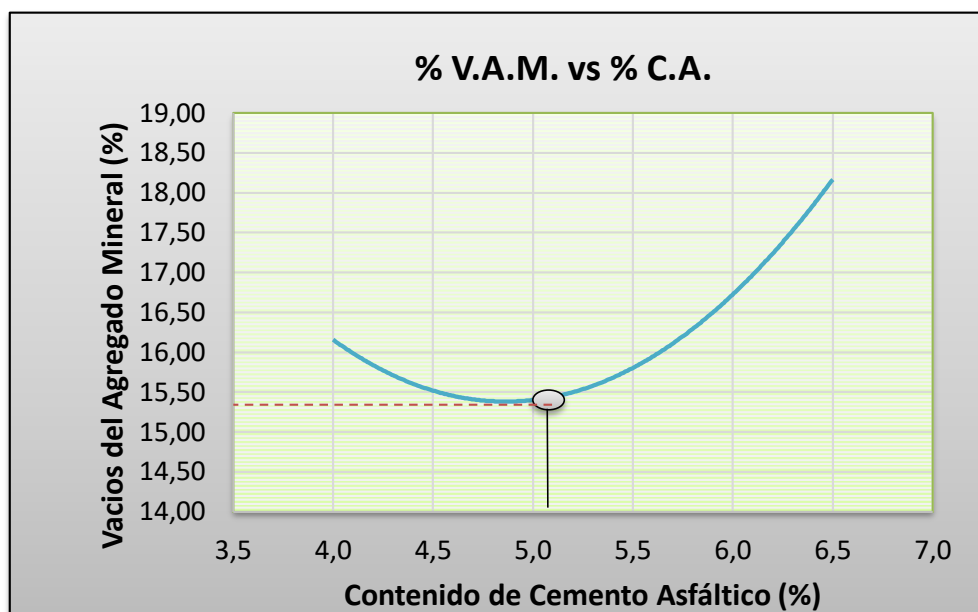
Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Vacíos de la mezcla - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



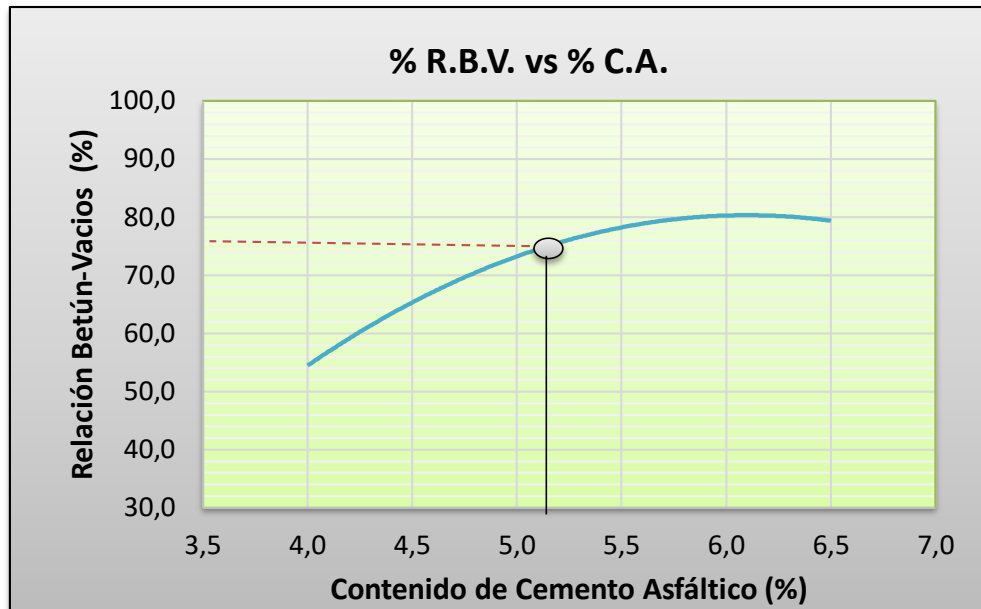
Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



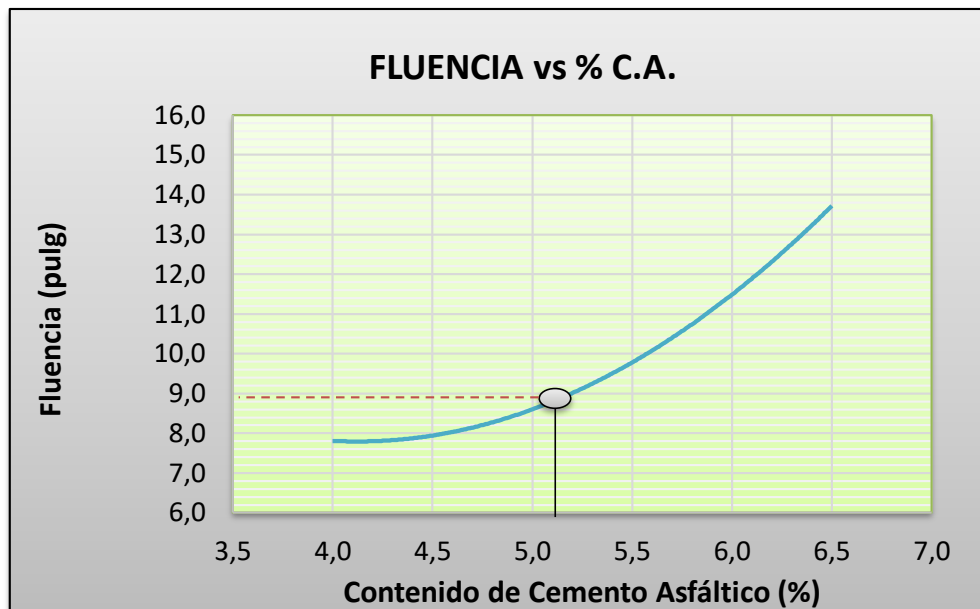
Fuente: Elaboración propia

Figura 29: Relación betún y vacíos - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Curva de fluencia - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 47: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1820,39	5,09
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,30	5,29
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,06
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con cemento modificado 3% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,15	2,30	-----	-----
% Vacíos	5,15	3,85	3	5
R.B.V. (%)	5,15	75,05	75	82
V.A.M (%)	5,15	14,87	>13	
Estabilidad (lb)	5,15	1820	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,15	8,89	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,15	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,15%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 4% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 120°C y compactadas a 110°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

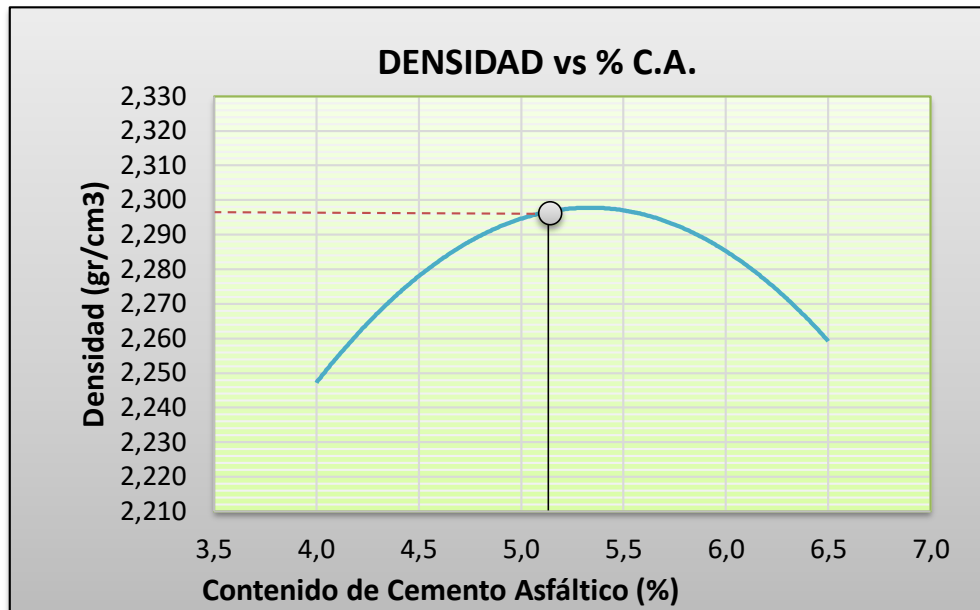
Tabla 49: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,25	2,27	2,29	2,30	2,29	2,26	-
Estabilidad (lb)	1394,30	1625,60	1633,80	1555,90	1353,90	1155,10	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7,22	5,61	4,04	3,24	2,82	3,63	3 – 5
VAM (%)	16,08	15,68	15,33	15,68	16,35	18,06	> 13
RBV (%)	55,09	64,22	73,67	79,31	82,73	79,92	65 – 75
Flujo (1/100")	7,33	7,33	7,67	9,67	10,67	13,00	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

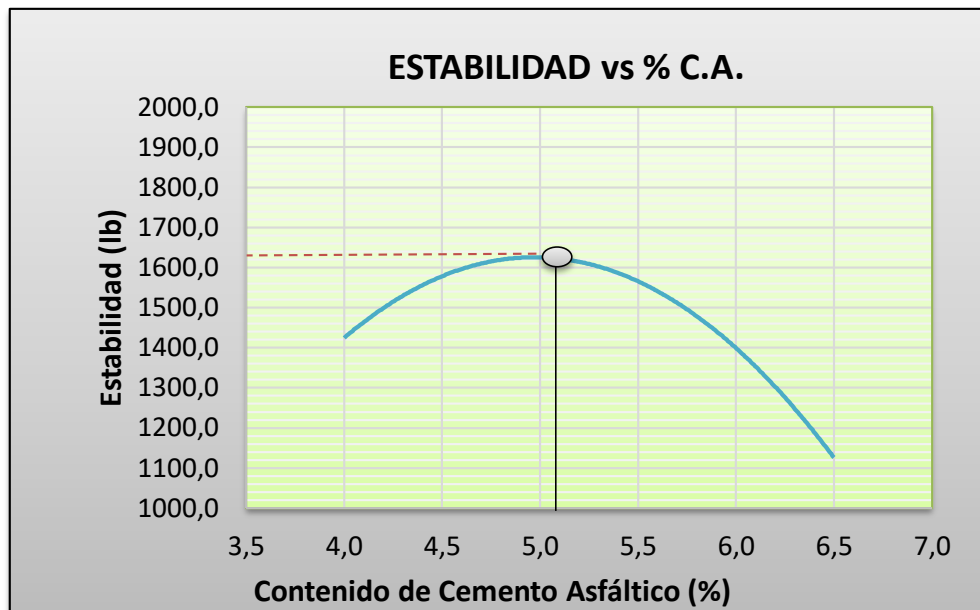
Igualmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 31: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



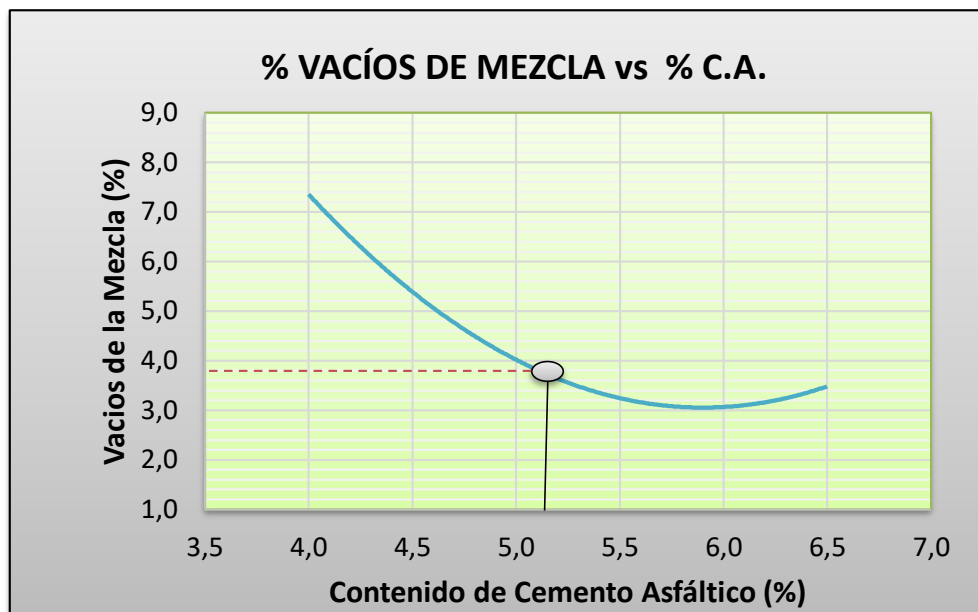
Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



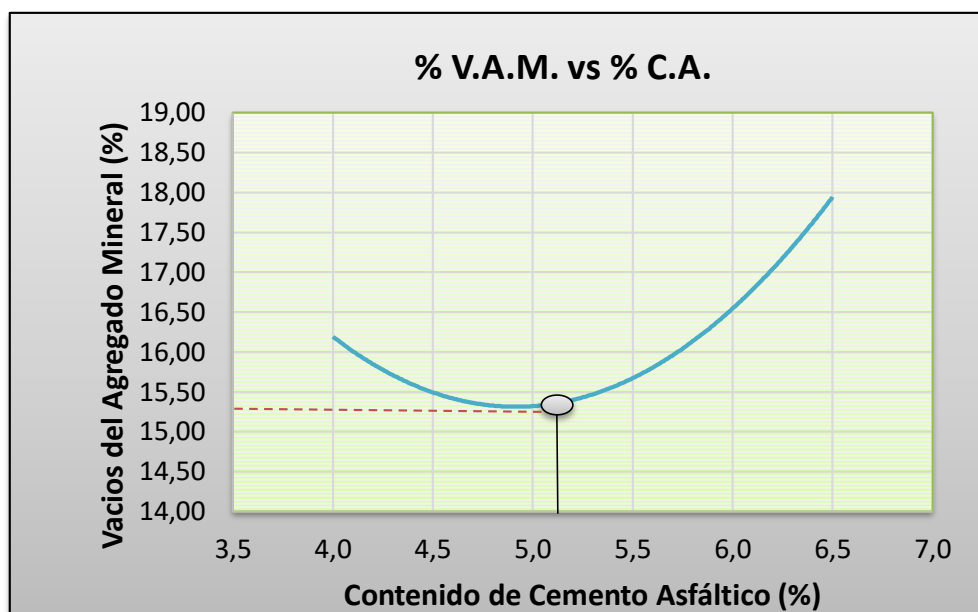
Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



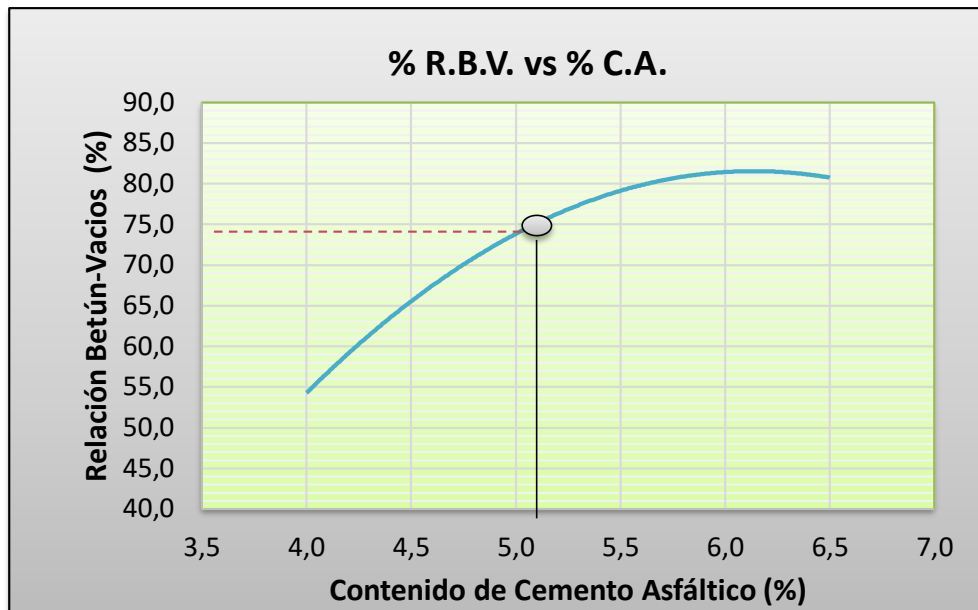
Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 4 % de cera de soya



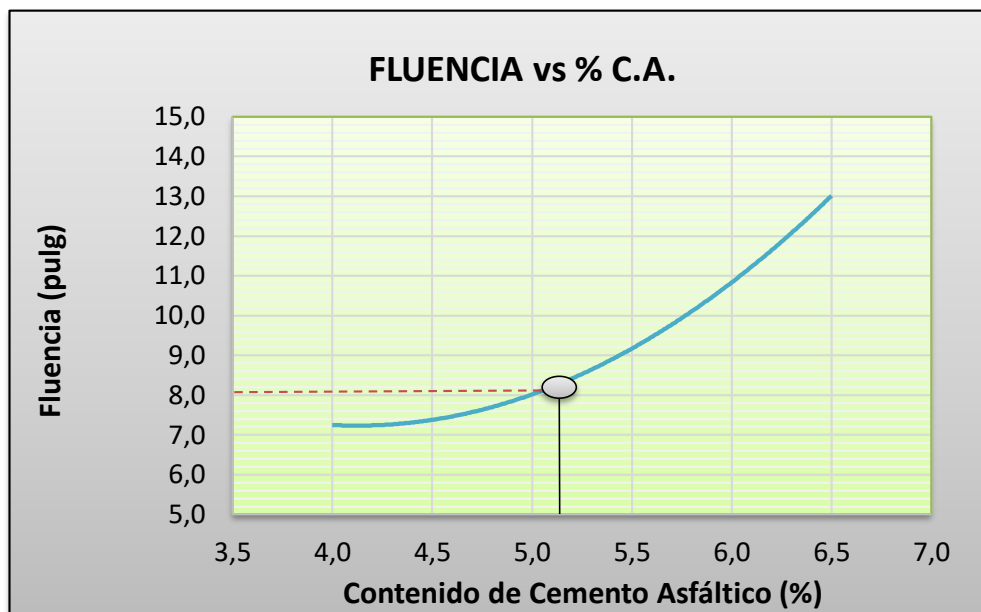
Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 50: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1625,88	4,97
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,30	5,34
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,01
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,11	2,30	-----	-----
% Vacíos	5,11	3,80	3	5
R.B.V. (%)	5,11	75,21	75	82
V.A.M (%)	5,11	15,35	>13	
Estabilidad (lb)	5,11	1622	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,11	8,22	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5,11	

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos de estabilidad y vacíos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue de 5,11%.

3.4.2.2. Mezclas asfálticas tibias elaboradas a 120°C

Mezclas asfálticas tibias con adición de 1% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 130°C y compactadas a 120°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

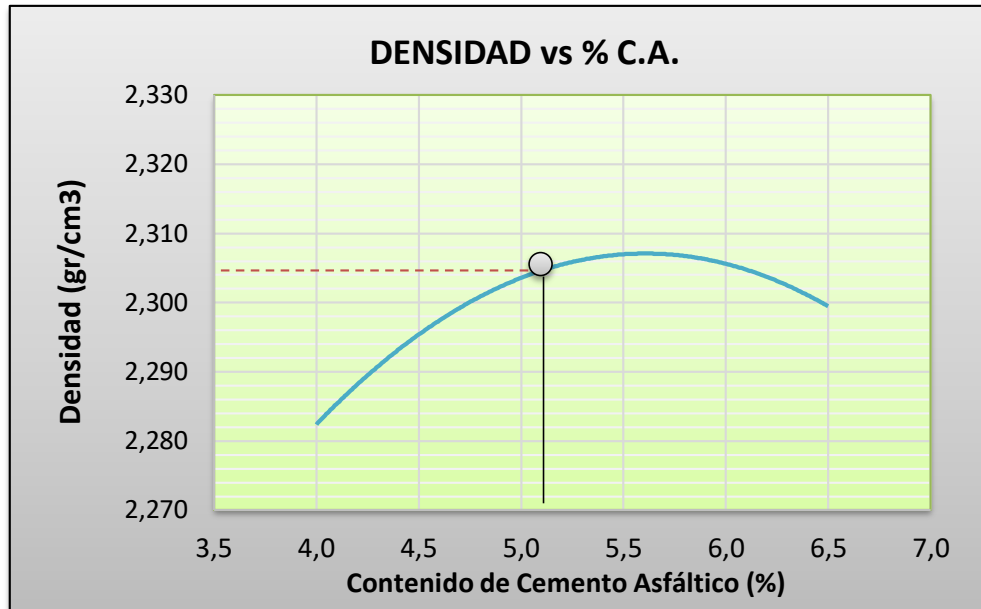
Tabla 52: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especific.
Densidad (gr/cm ³)	2,28	2,30	2,30	2,31	2,30	2,30	-
Estabilidad (lb)	1938,00	2136,40	2342,60	2190,80	1897,70	1616,70	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,04	4,38	3,58	2,80	2,45	1,54	3 – 5
VAM (%)	15,03	14,60	14,96	15,33	16,06	16,32	> 13
RBV (%)	59,84	70,02	76,05	81,70	84,75	90,55	75 – 82
Flujo (1/100")	8,33	8,33	8,67	10,67	12,00	13,67	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

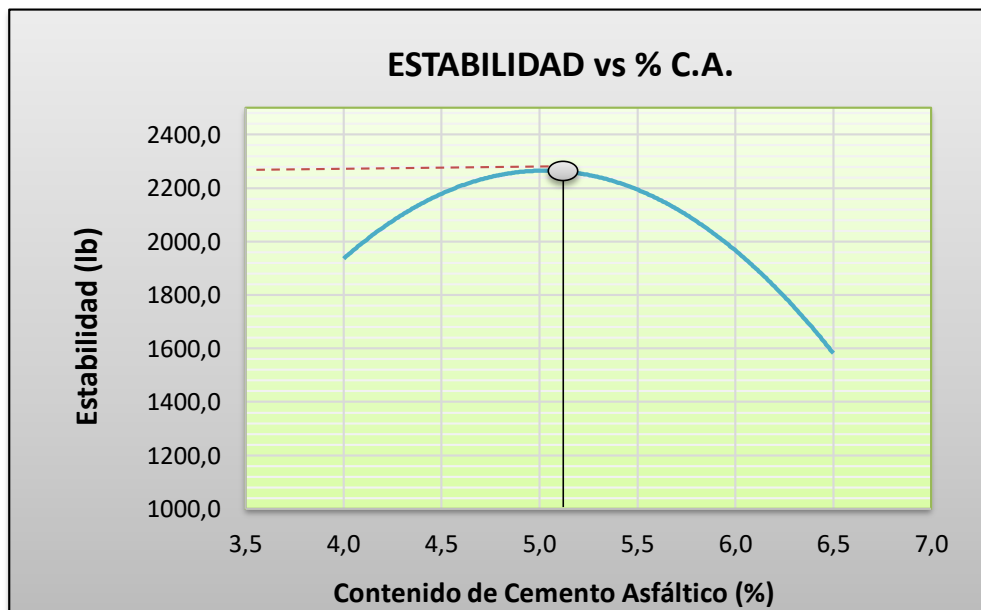
Igualmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 37: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



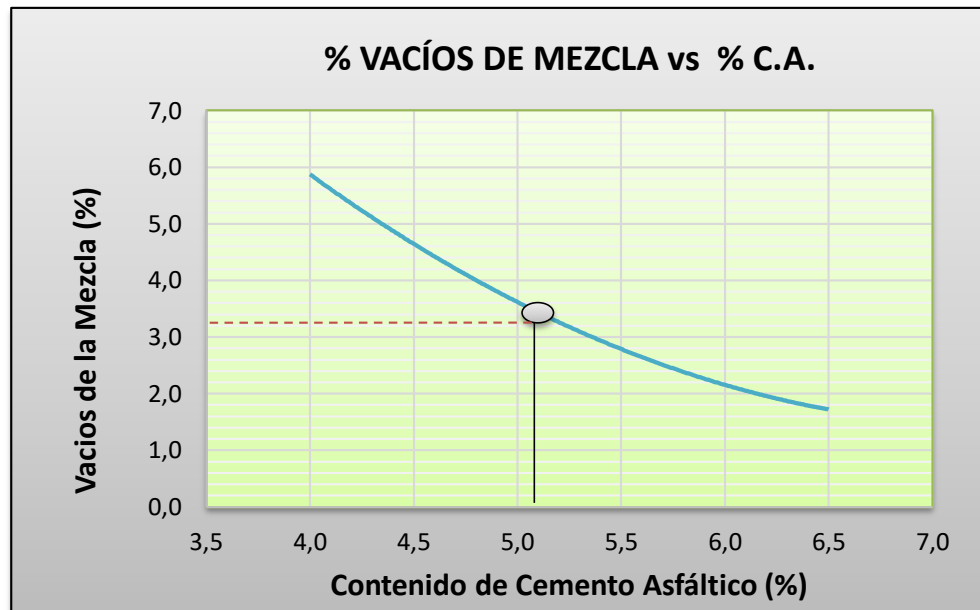
Fuente: Elaboración propia

Figura 38: Estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



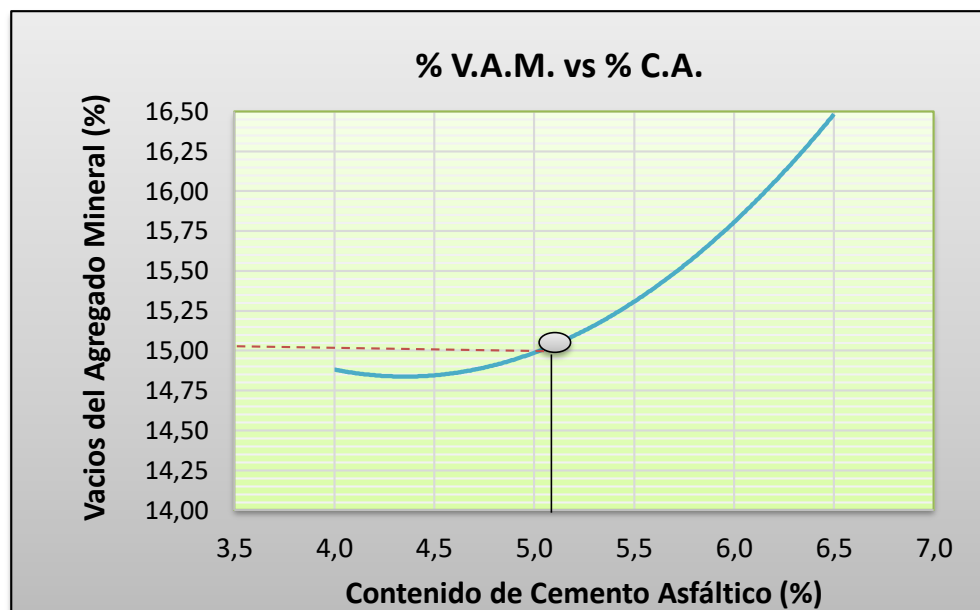
Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



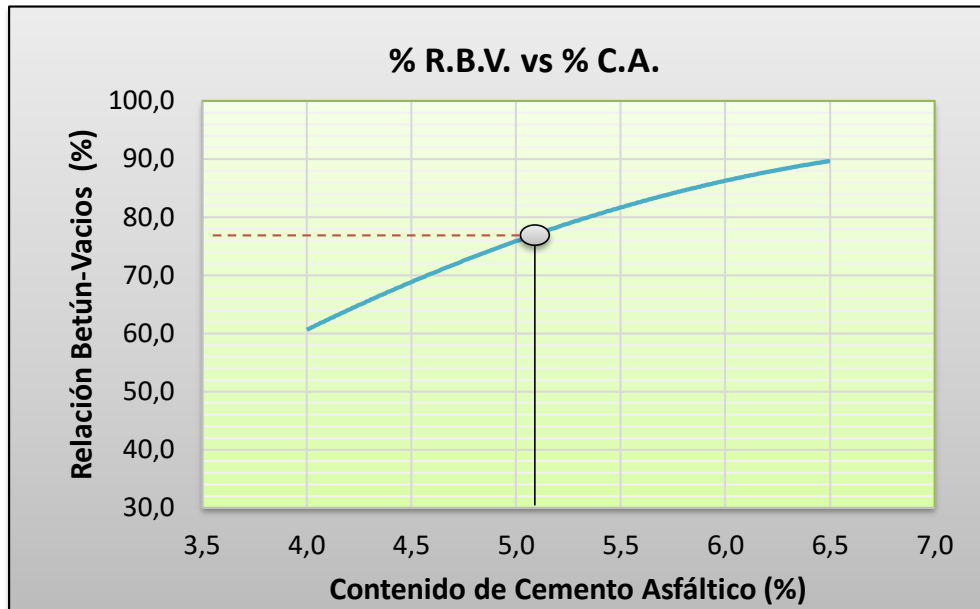
Fuente: Elaboración propia

Figura 40: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



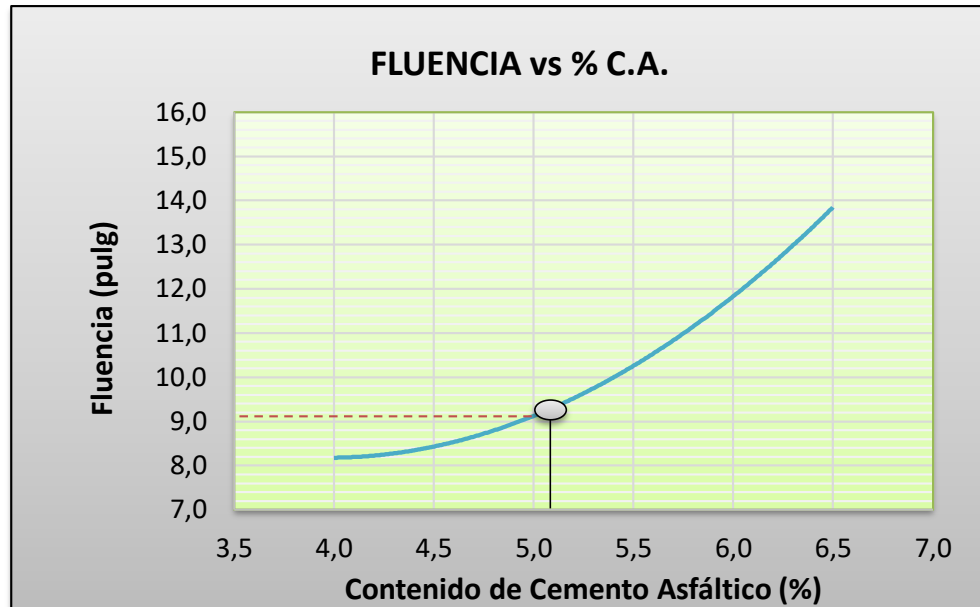
Fuente: Elaboración propia

Figura 41: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 53: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2265,04	5,02
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,31	5,59
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,80
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,14	2,30	-----	-----
% Vacíos	5,14	3,37	3	5
R.B.V. (%)	5,14	77,59	75	82
V.A.M (%)	5,14	15,06	>13	
Estabilidad (lb)	5,14	2261	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,14	9,40	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5,14	

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos de estabilidad y vacíos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue de 5,14%.

Mezclas asfálticas tibias con adición de 2% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 130°C y compactadas a 120°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

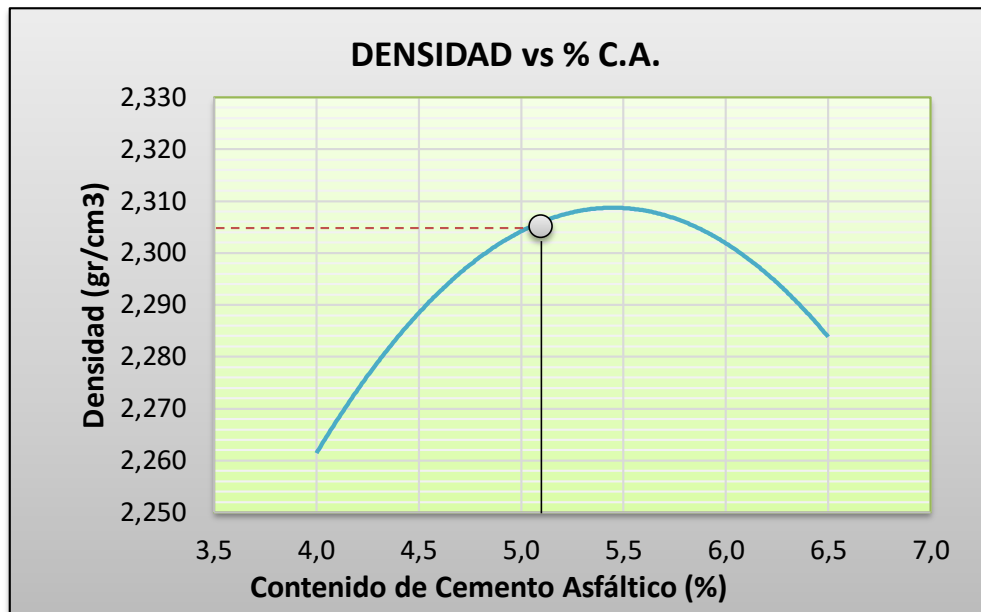
Tabla 55: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,26	2,29	2,30	2,31	2,30	2,28	-
Estabilidad (lb)	1987,90	2202,20	2291,51	2258,52	1980,70	1685,26	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,78	4,88	3,76	2,67	2,33	2,44	3 – 5
VAM (%)	15,69	15,03	15,09	15,19	15,94	17,06	>13
RBV (%)	56,80	67,50	75,11	82,43	85,37	85,69	75 – 82
Flujo (1/100")	8,33	8,33	9,33	10,67	13,00	14,67	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

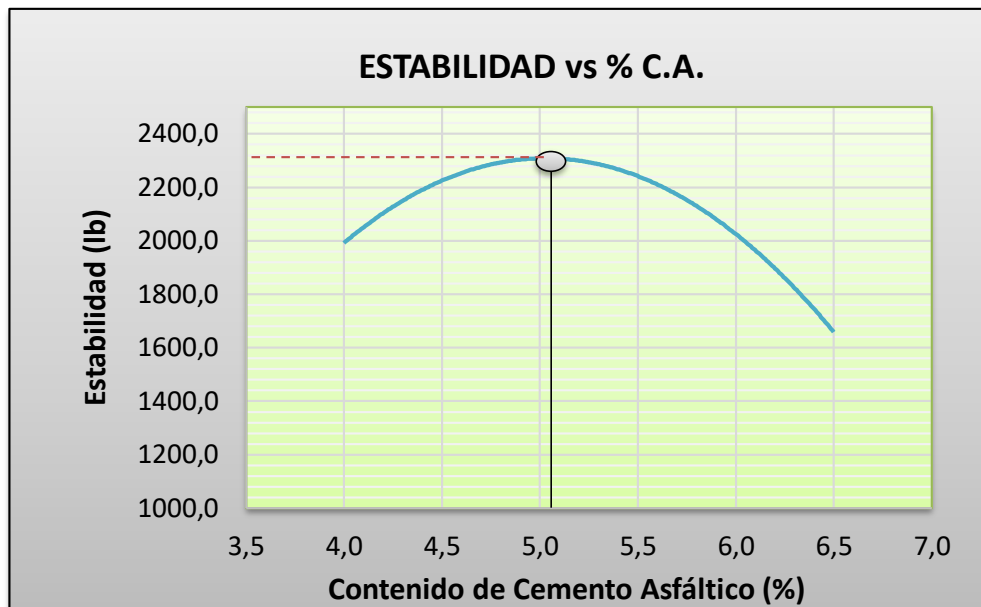
Con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 43: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



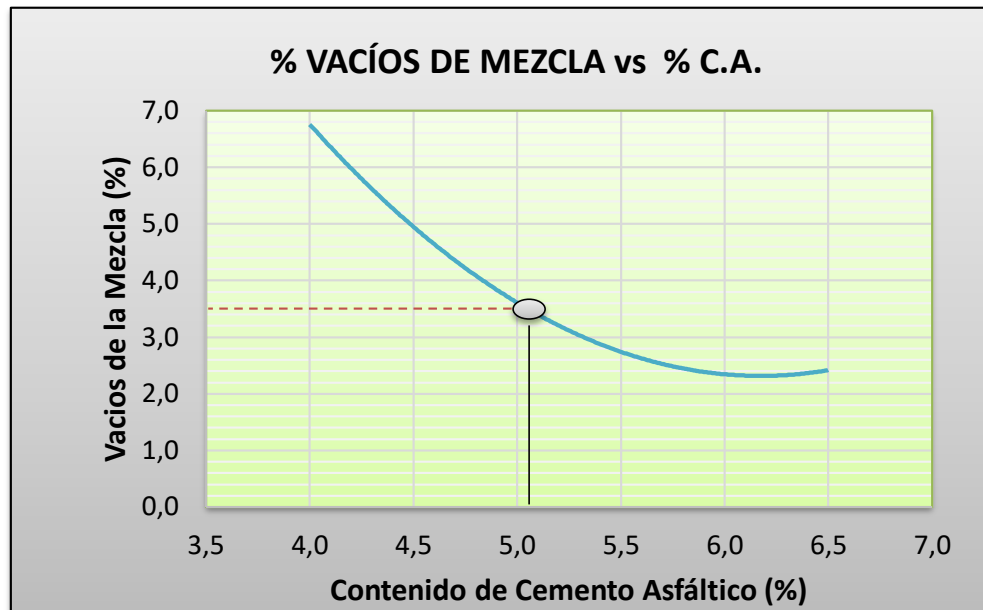
Fuente: Elaboración propia

Figura 44: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya de soya



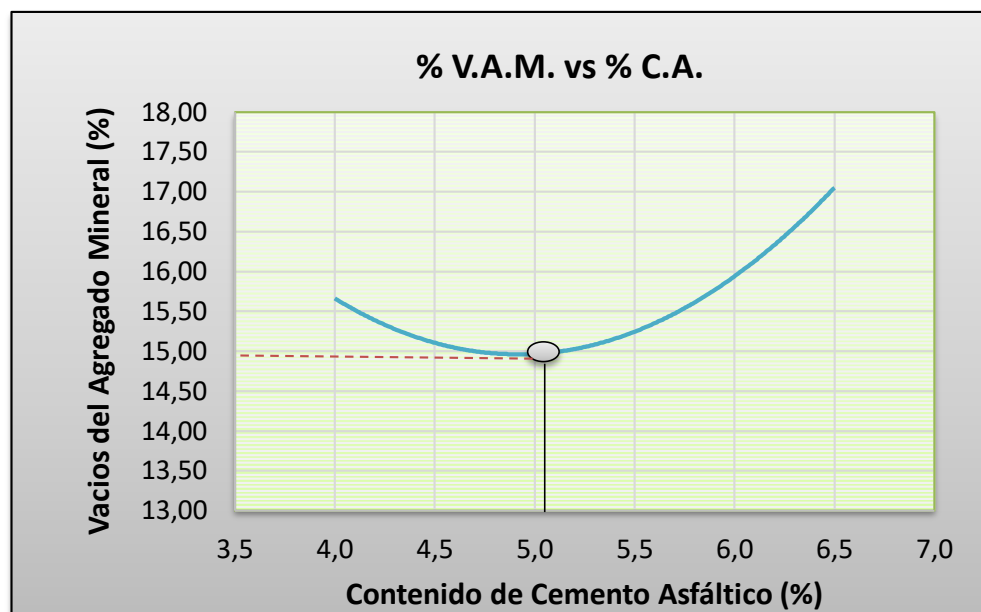
Fuente: Elaboración propia

Figura 45: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



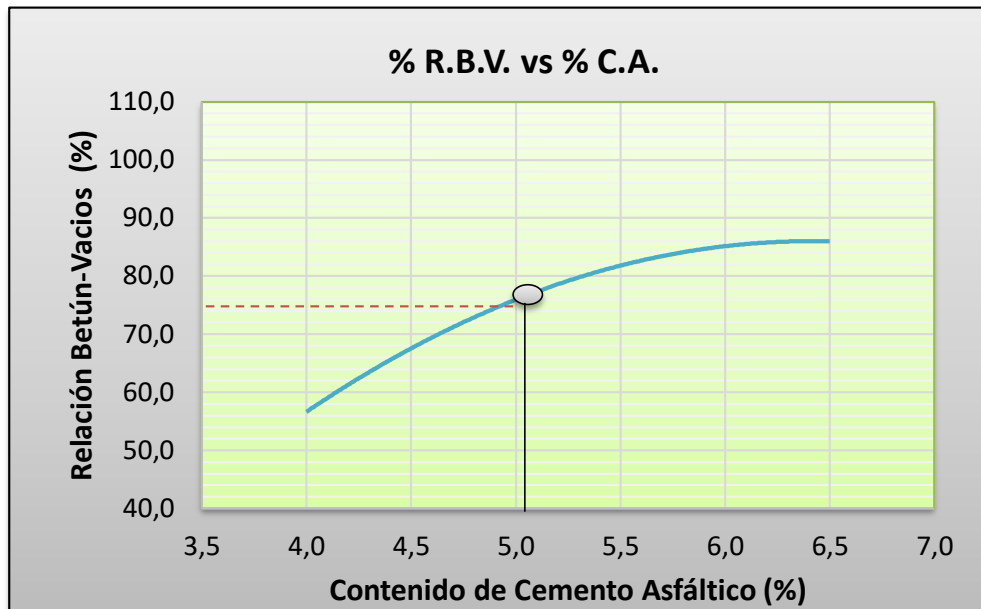
Fuente: Elaboración propia

Figura 46: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



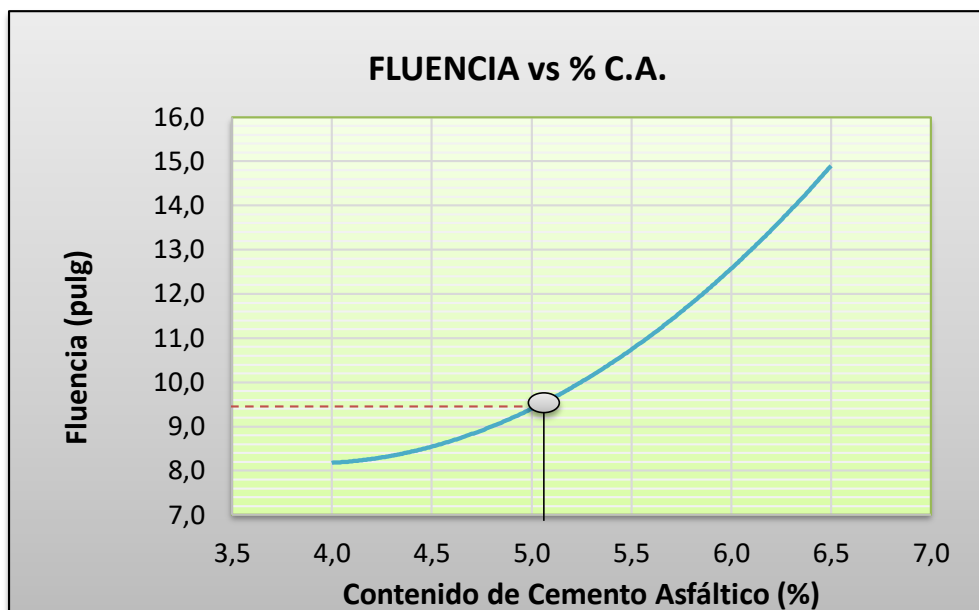
Fuente: Elaboración propia

Figura 47: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 48: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 56: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2290,65	5,03
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,31	5,44
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,84
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,10	2,31	-----	-----
% Vacíos	5,10	3,40	3	5
R.B.V. (%)	5,10	77,34	75	82
V.A.M (%)	5,10	14,99	>13	
Estabilidad (lb)	5,10	2289	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,10	9,63	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,10	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,10%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 3% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 130°C y compactadas a 120°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

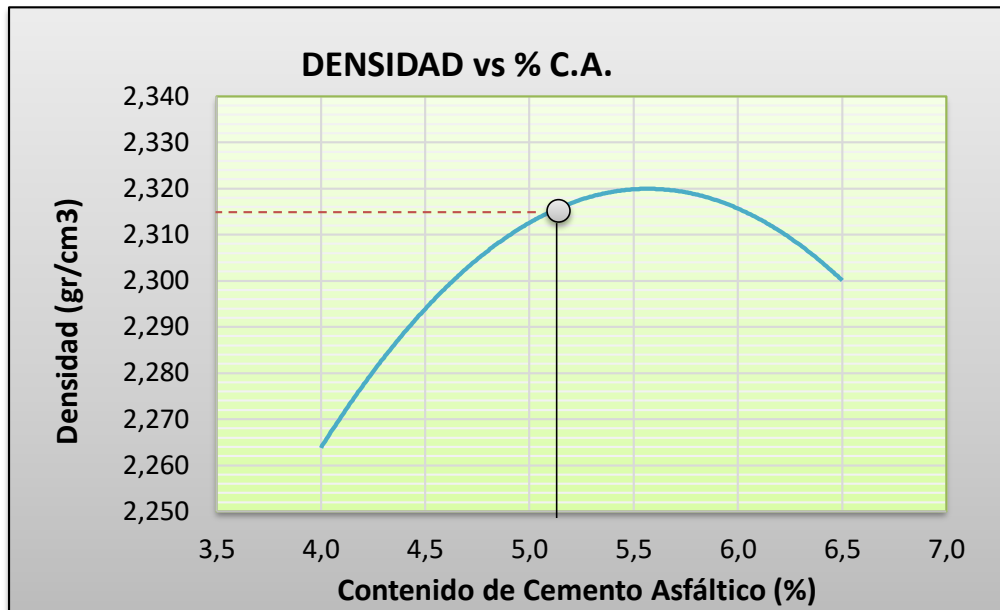
Tabla 58: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,26	2,30	2,32	2,32	2,31	2,30	-
Estabilidad (lb)	1894,10	2124,10	2306,30	2138,60	1860,10	1620,80	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,79	4,60	3,19	2,31	2,05	1,59	3 – 5
VAM (%)	15,68	14,77	14,57	14,85	15,68	16,32	>13
RBV (%)	56,71	68,85	78,13	84,44	86,90	90,23	75 – 82
Flujo (1/100")	8,00	8,00	9,00	10,33	12,67	14,00	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

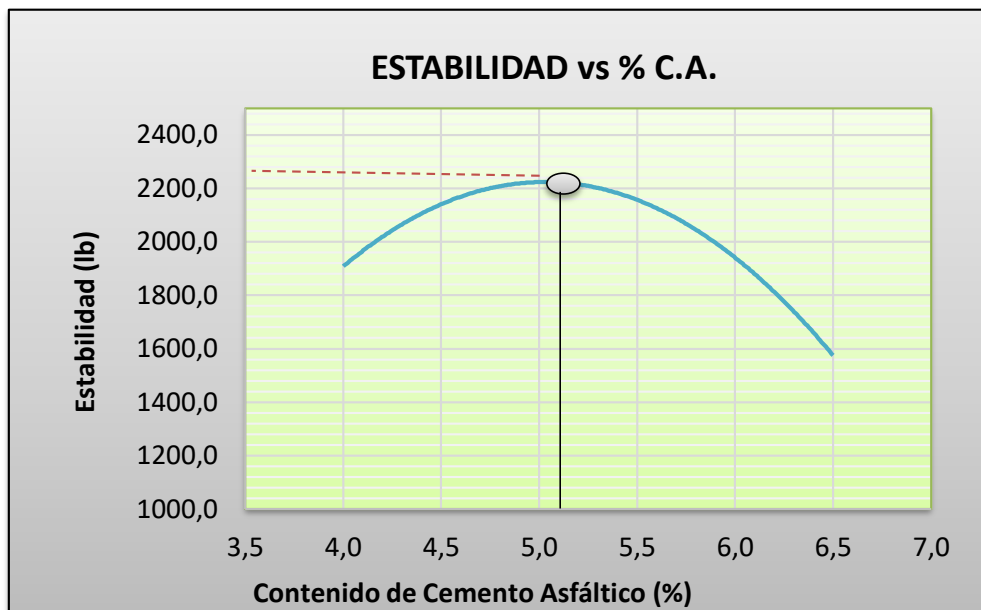
De la misma forma que en los anteriores casos, con los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 49: Densidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



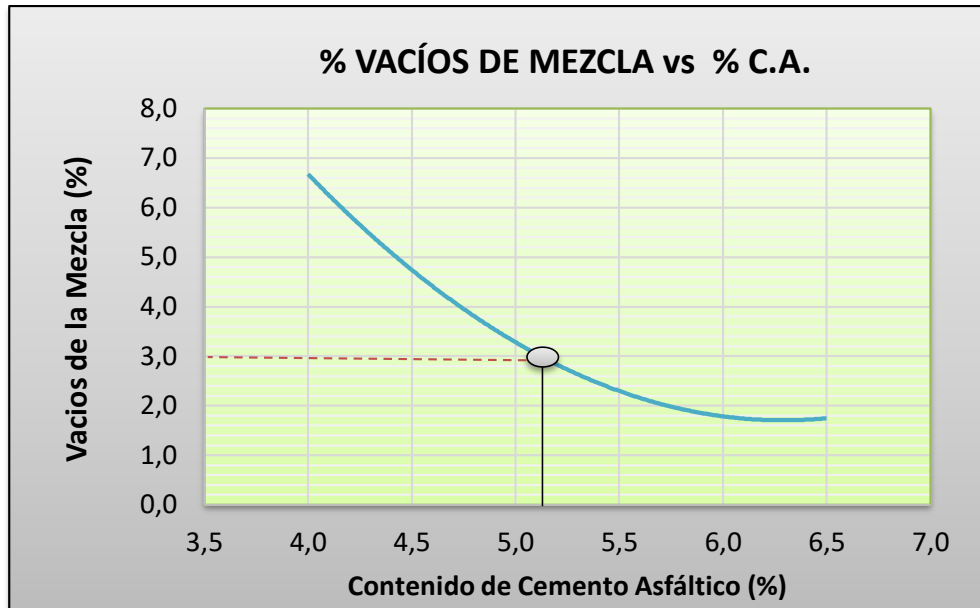
Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Estabilidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



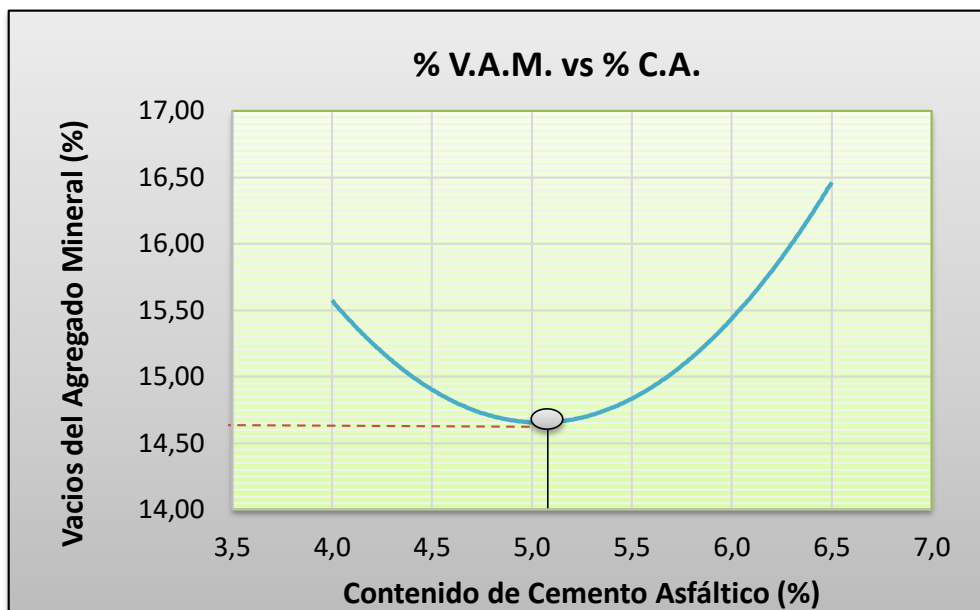
Fuente: Elaboración propia

Figura 51: Vacíos de la mezcla - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



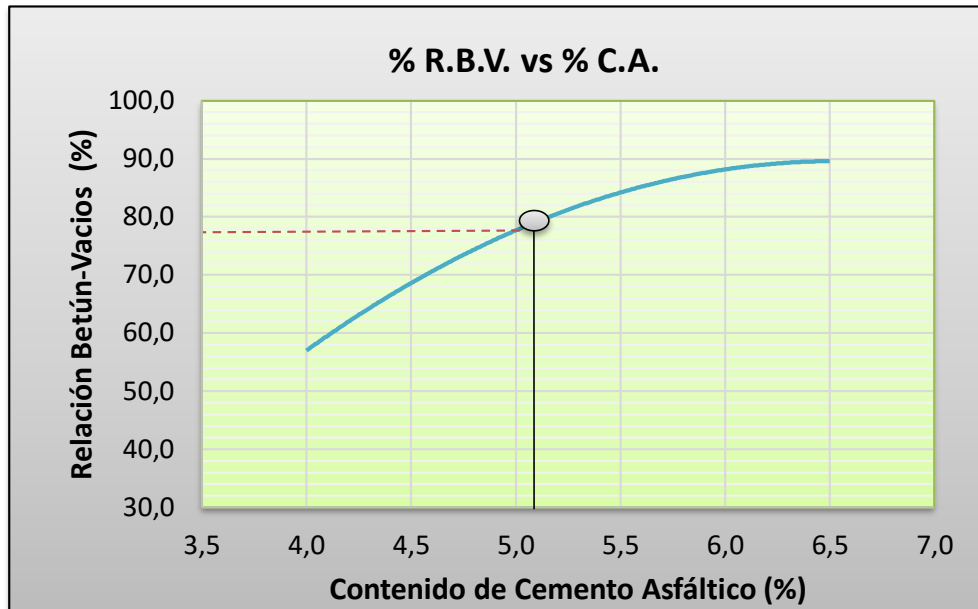
Fuente: Elaboración propia

Figura 52: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



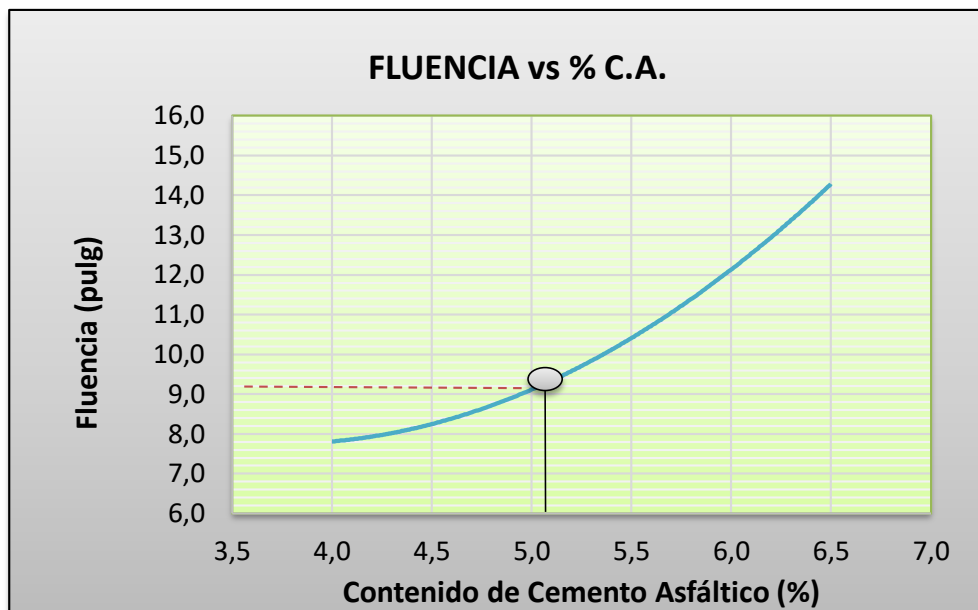
Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Relación betún y vacíos - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 54: Curva de fluencia - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 59: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2223,63	5,03
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,32	5,58
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,73
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,11	2,32	-----	-----
% Vacíos	5,11	3,02	3	5
R.B.V. (%)	5,11	79,39	75	82
V.A.M (%)	5,11	14,66	>13	
Estabilidad (lb)	5,11	2221	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,11	9,37	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,11	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,11%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 4% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 130°C y compactadas a 120°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

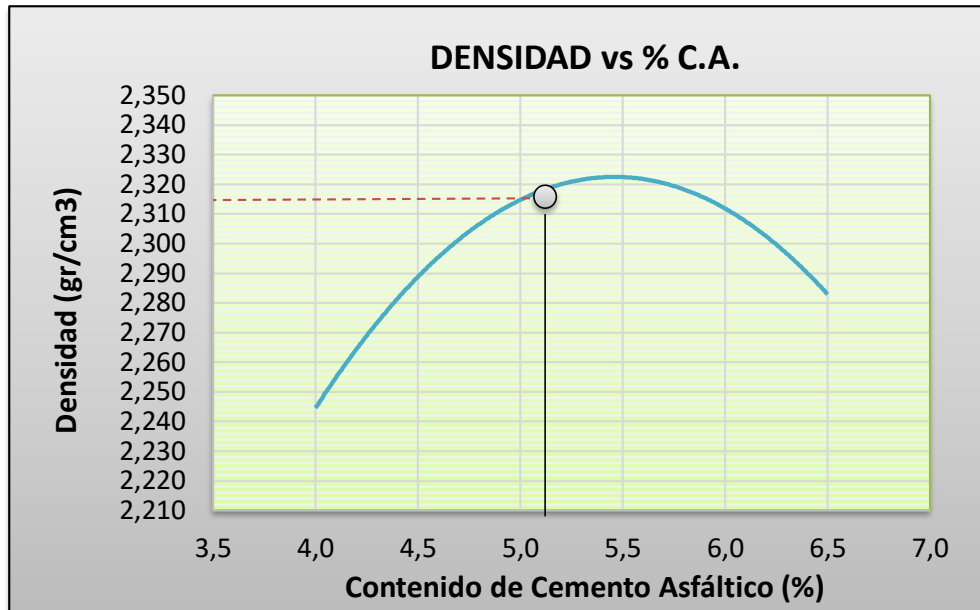
Tabla 61: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,25	2,28	2,32	2,32	2,31	2,28	-
Estabilidad (lb)	1657,60	1866,20	1975,60	1886,50	1718,70	1535,70	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7,38	5,20	2,98	2,05	2,16	2,39	3 – 5
VAM (%)	16,22	15,31	14,39	14,64	15,78	17,01	>13
RBV (%)	54,52	66,03	79,32	85,97	86,29	85,95	75 – 82
Flujo (1/100")	7,00	7,33	8,67	9,67	12,00	12,33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

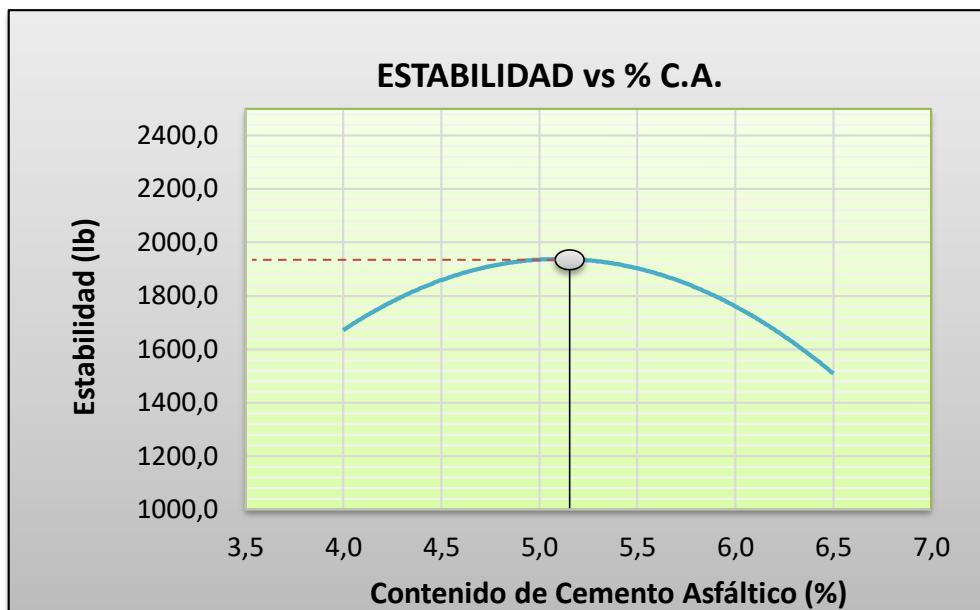
Finalmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 55: Densidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



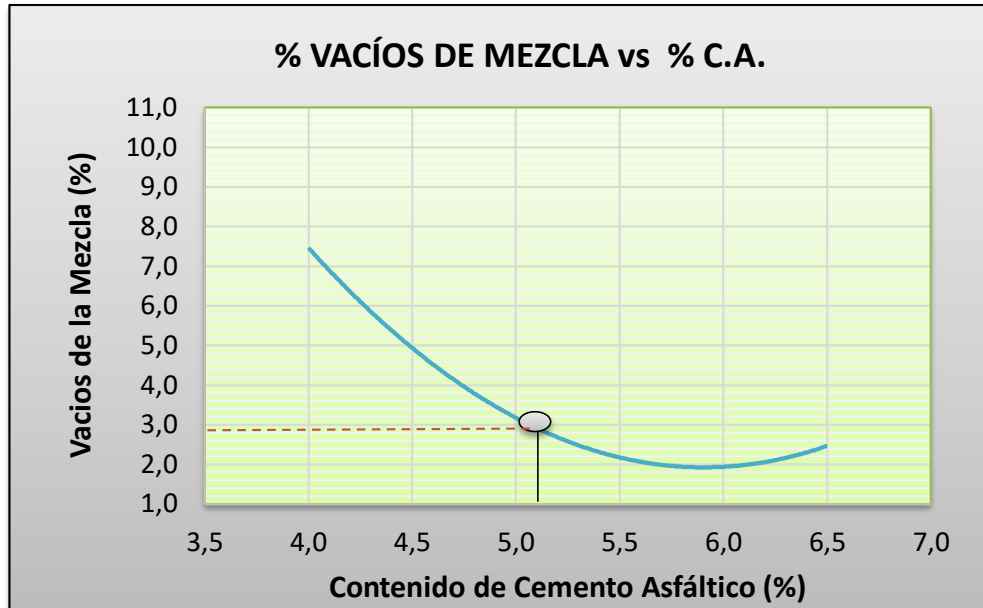
Fuente: Elaboración propia

Figura 56: Estabilidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



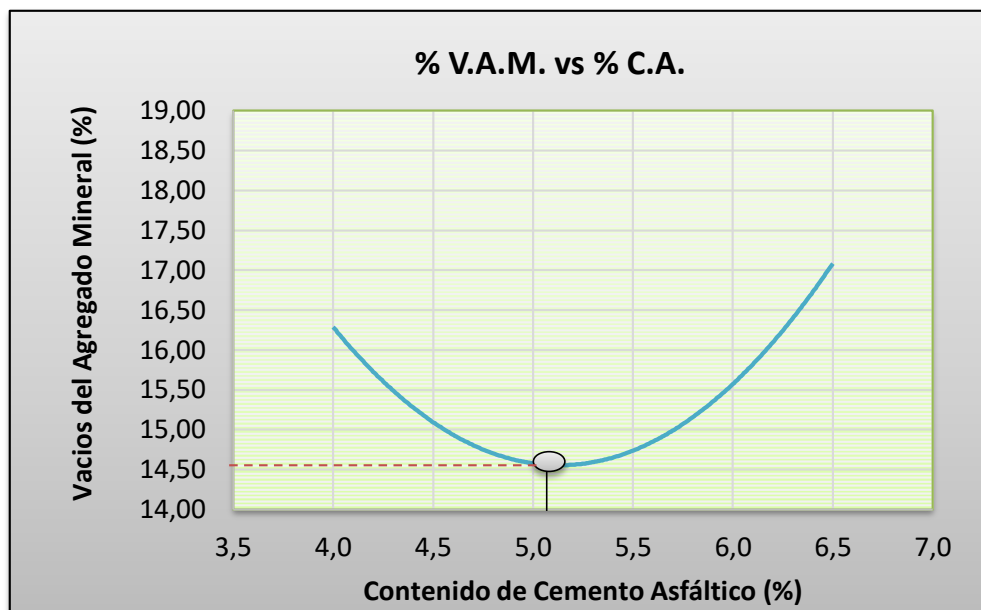
Fuente: Elaboración propia

Figura 57: Vacíos de la mezcla - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



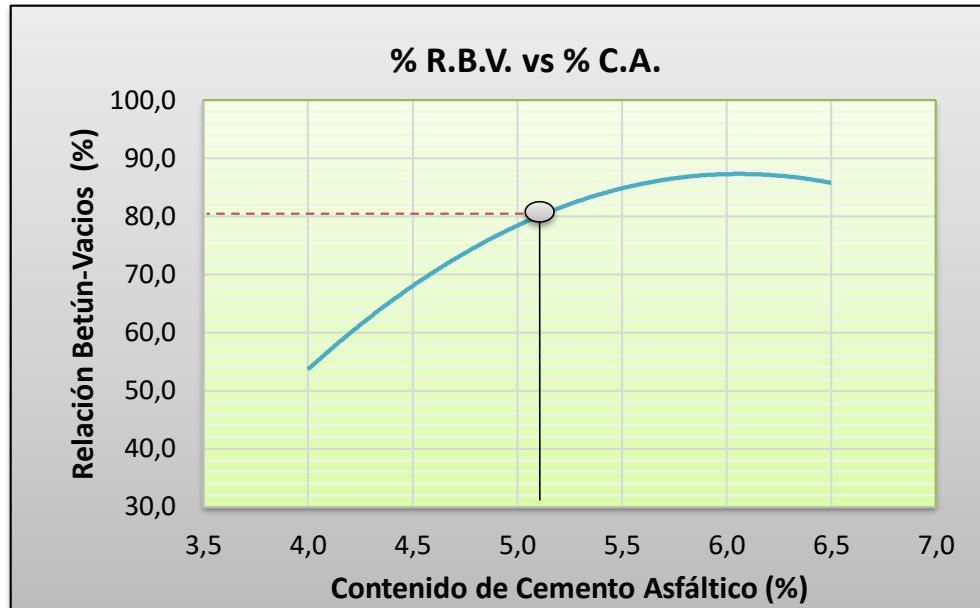
Fuente: Elaboración propia

Figura 58: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



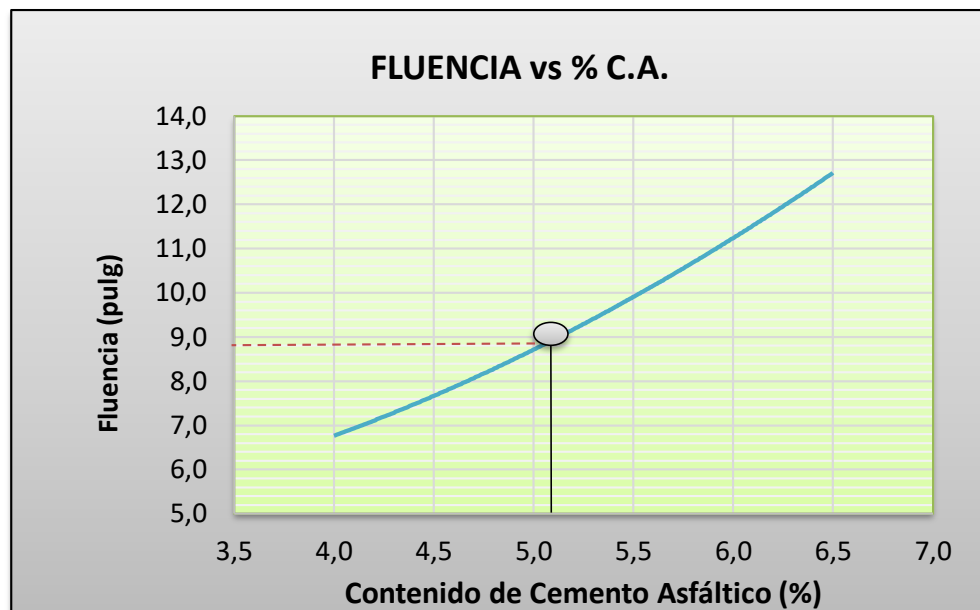
Fuente: Elaboración propia

Figura 59: Relación betún y vacíos - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 60: Curva de fluencia - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 62: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	1937,89	5,10
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,32	5,45
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,74
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,10	2,317	-----	-----
% Vacíos	5,10	2,92	3	5
R.B.V. (%)	5,10	80,02	75	82
V.A.M (%)	5,10	14,56	>13	
Estabilidad (lb)	5,10	1938	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,10	8,94	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,10	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,10%

3.4.2.3. Mezclas asfálticas tibias elaboradas a 135°C

Mezclas asfálticas tibias con adición de 1% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 145°C y compactadas a 135°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

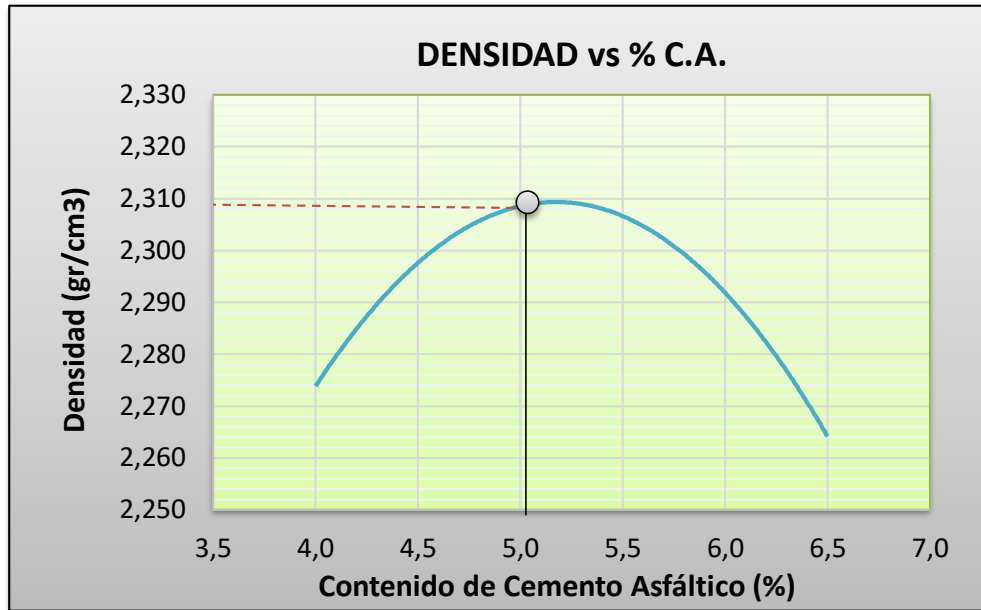
Tabla 64: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 1% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,28	2,29	2,31	2,31	2,30	2,26	-
Estabilidad (lb)	1910,90	2171,40	2306,20	2230,90	2086,40	1907,20	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,01	4,89	3,56	2,53	2,58	3,40	3 – 5
VAM (%)	15,01	15,06	14,93	15,09	16,17	17,90	>13
RBV (%)	59,97	67,55	76,18	83,22	84,07	81,03	75 – 82
Flujo (1/100")	8,33	9,00	9,33	10,33	11,67	12,00	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

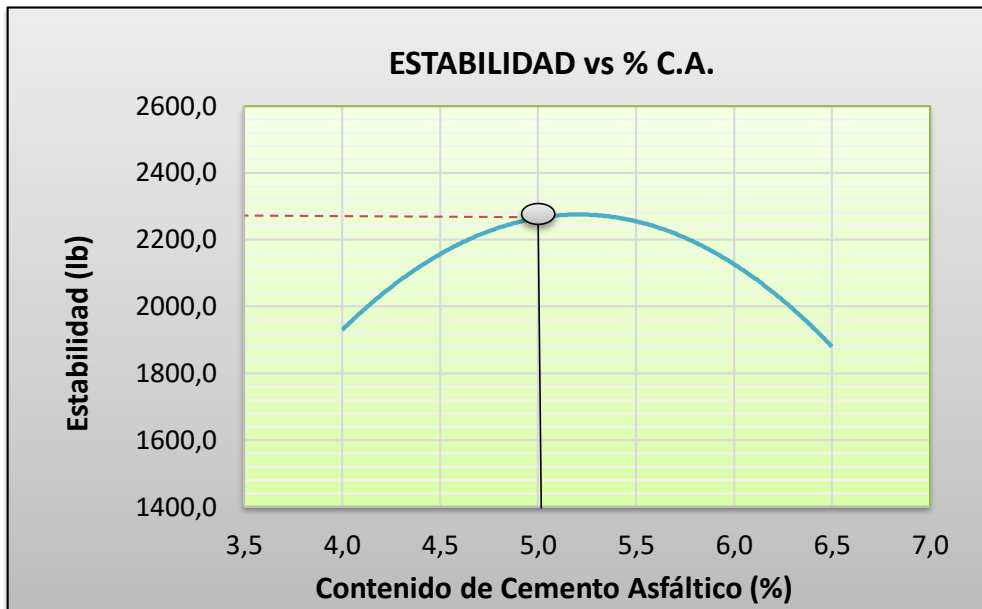
Igualmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 61: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



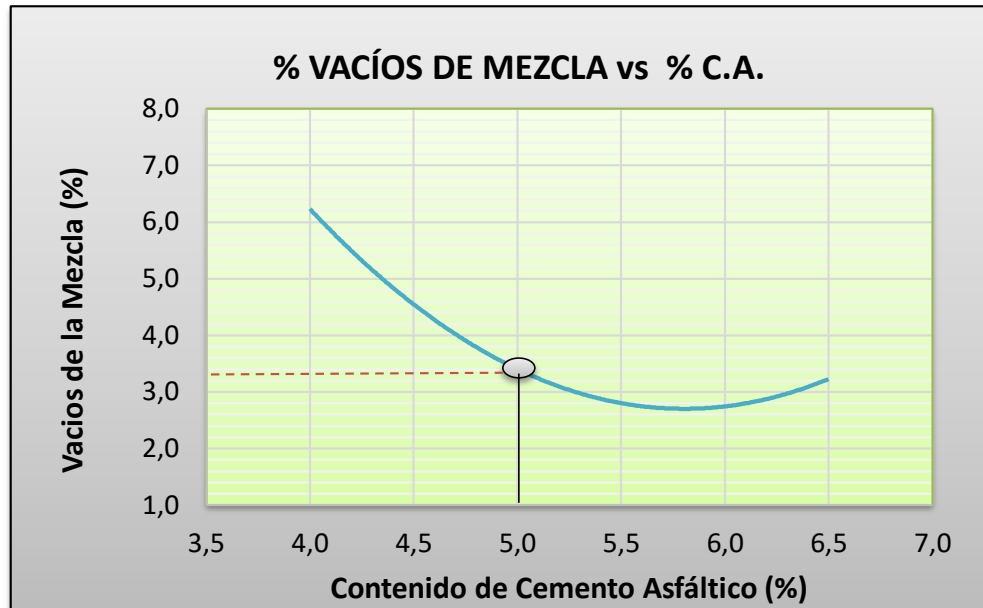
Fuente: Elaboración propia

Figura 62: Estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



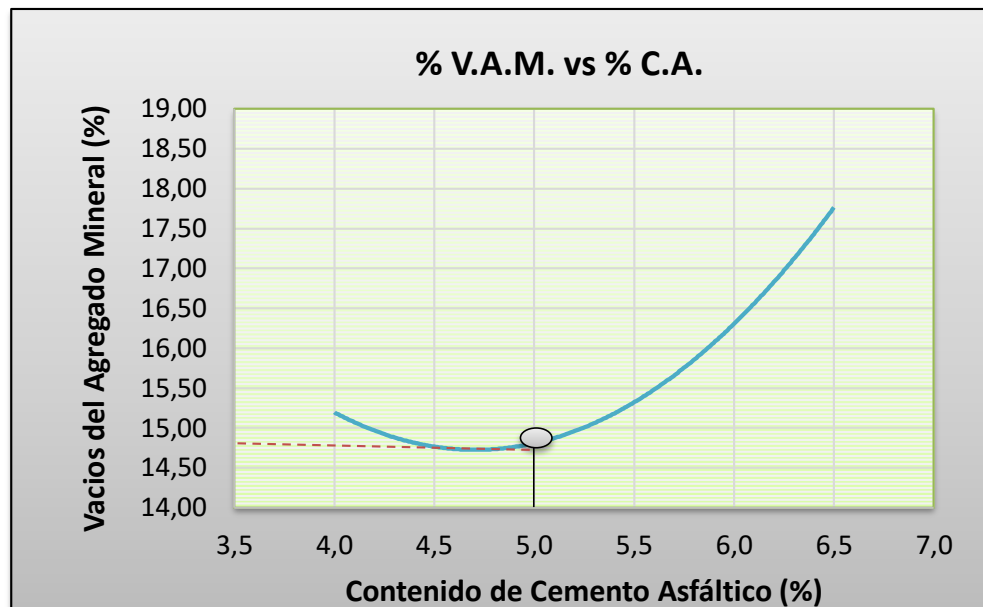
Fuente: Elaboración propia

Figura 63: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



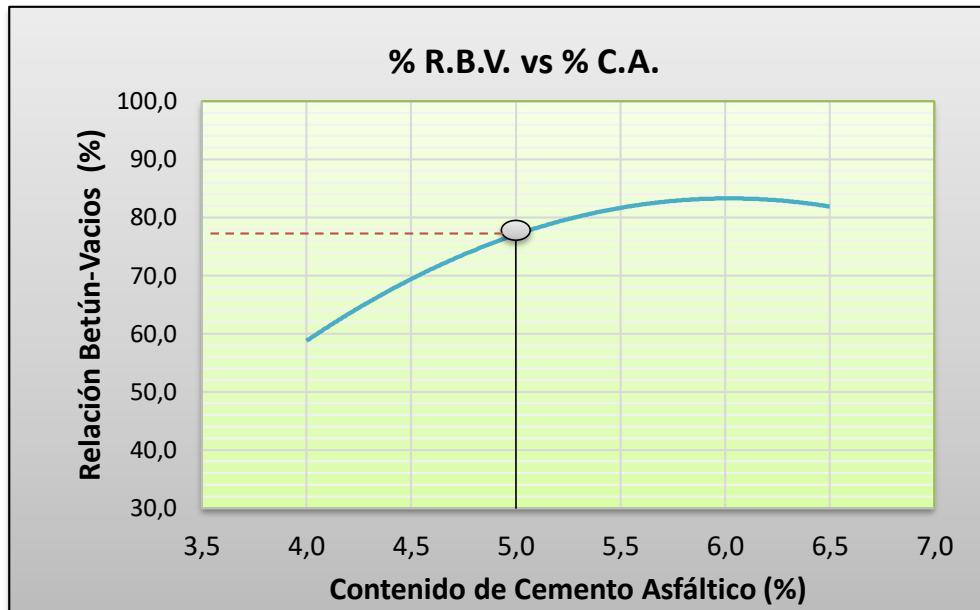
Fuente: Elaboración propia

Figura 64: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



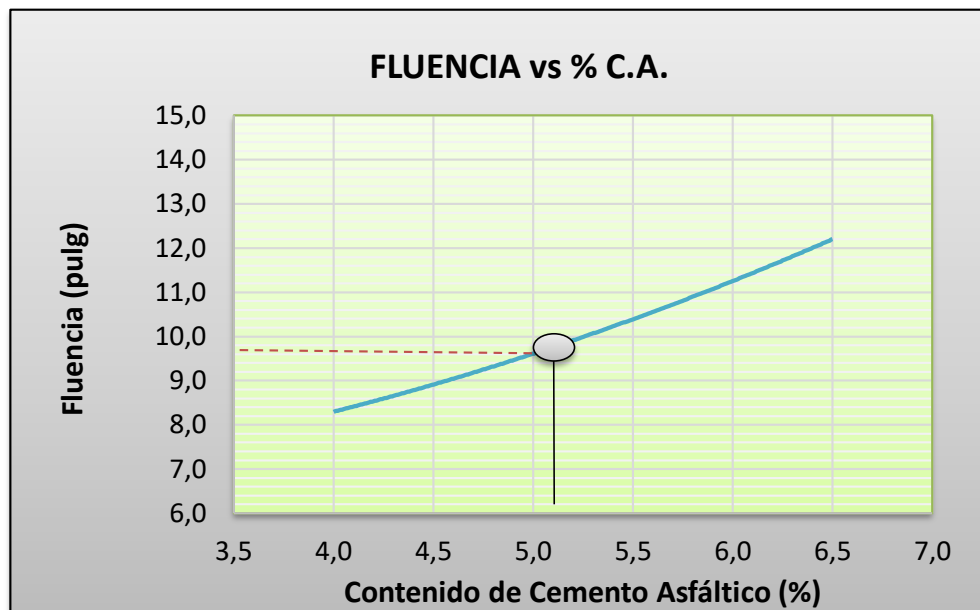
Fuente: Elaboración propia

Figura 65: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 66: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 65: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2275,02	5,21
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,310	5,18
	vacíos de la mezcla (%)	4,000	4,70
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 66: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 1% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,03	2,309	-----	-----
% Vacíos	5,03	3,35	3	5
R.B.V. (%)	5,03	77,38	75	82
V.A.M (%)	5,03	14,82	>13	
Estabilidad (lb)	5,03	2267	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,03	965	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5,03	

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos de estabilidad y vacíos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue de 5,03%.

Mezclas asfálticas tibias con adición de 2% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 145°C y compactadas a 135°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

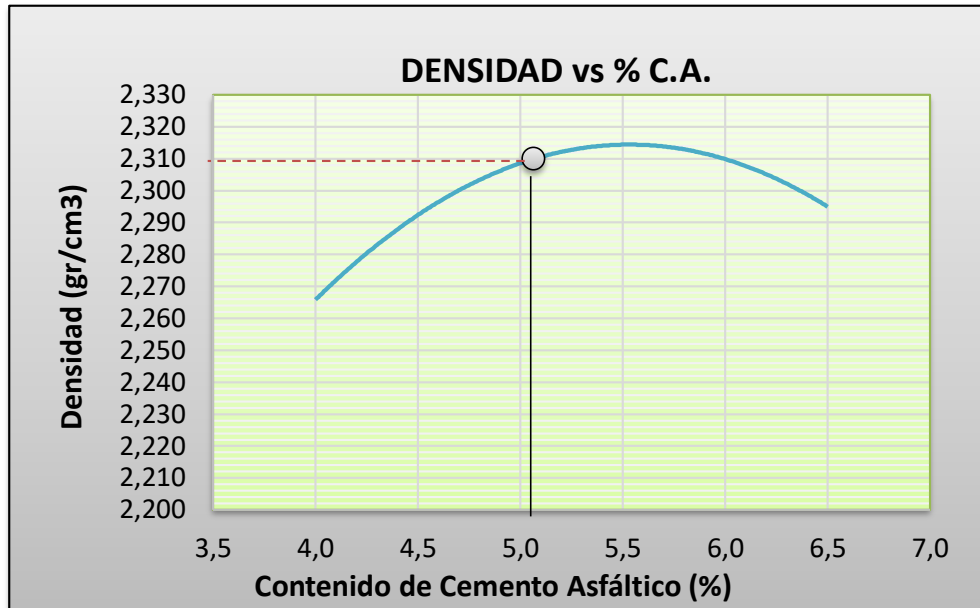
Tabla 67: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,27	2,29	2,31	2,32	2,31	2,30	-
Estabilidad (lb)	2003,20	2207,50	2408,40	2294,10	2033,30	1858,90	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,55	4,85	3,41	2,34	2,20	1,87	3 – 5
VAM (%)	15,49	15,01	14,79	14,90	15,82	16,58	>13
RBV (%)	57,67	67,67	76,92	84,28	86,12	88,69	75 – 82
Flujo (1/100")	8,33	8,33	9,33	10,33	12,67	13,33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

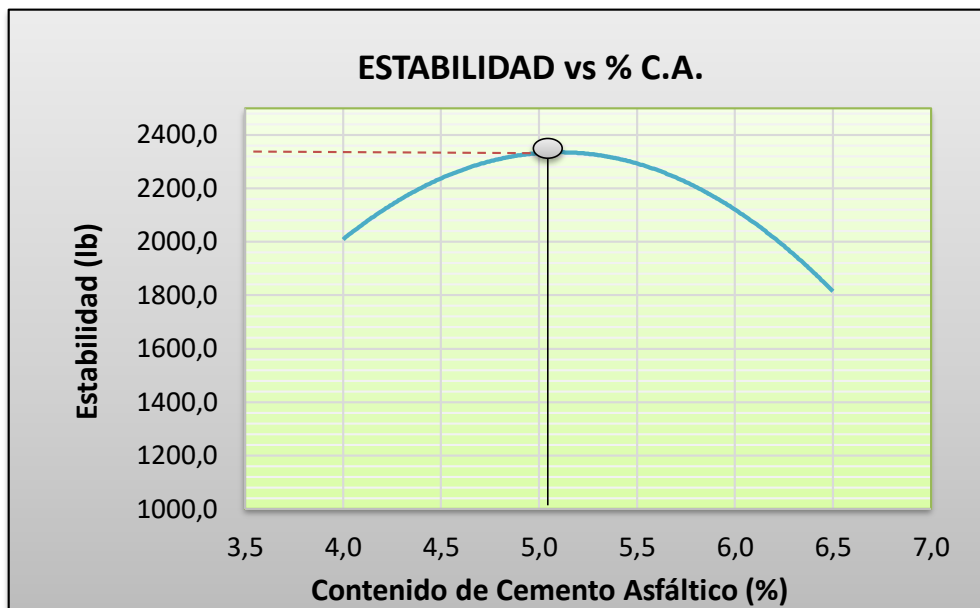
Con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 67: Densidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



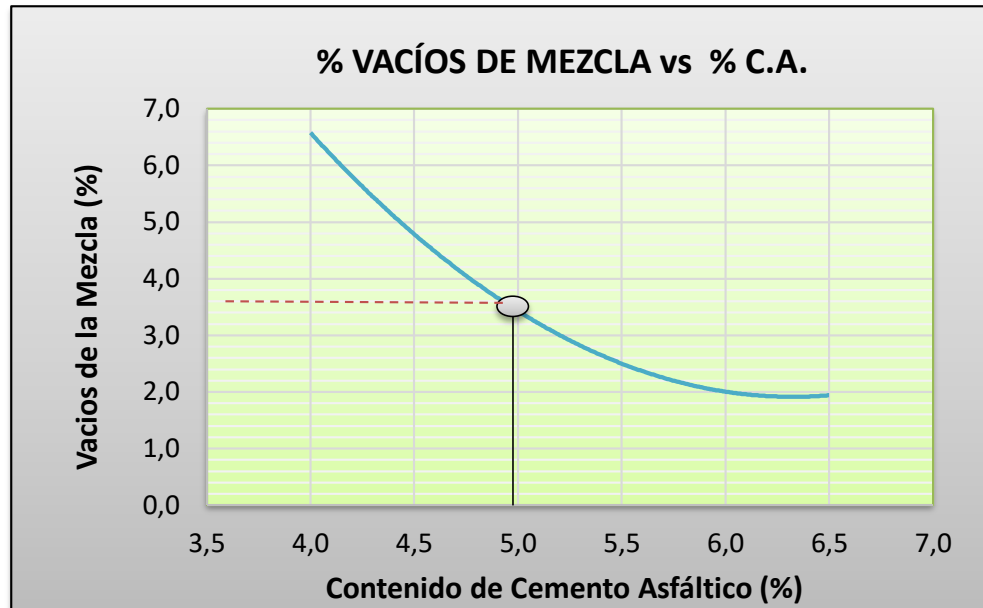
Fuente: Elaboración propia

Figura 68: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



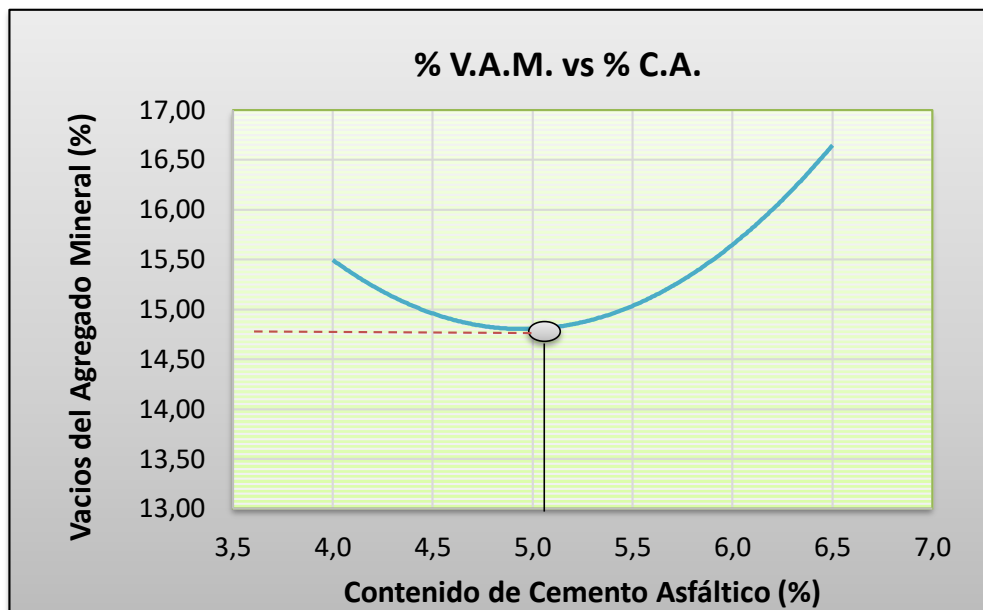
Fuente: Elaboración propia

Figura 69: Vacíos de la mezcla – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



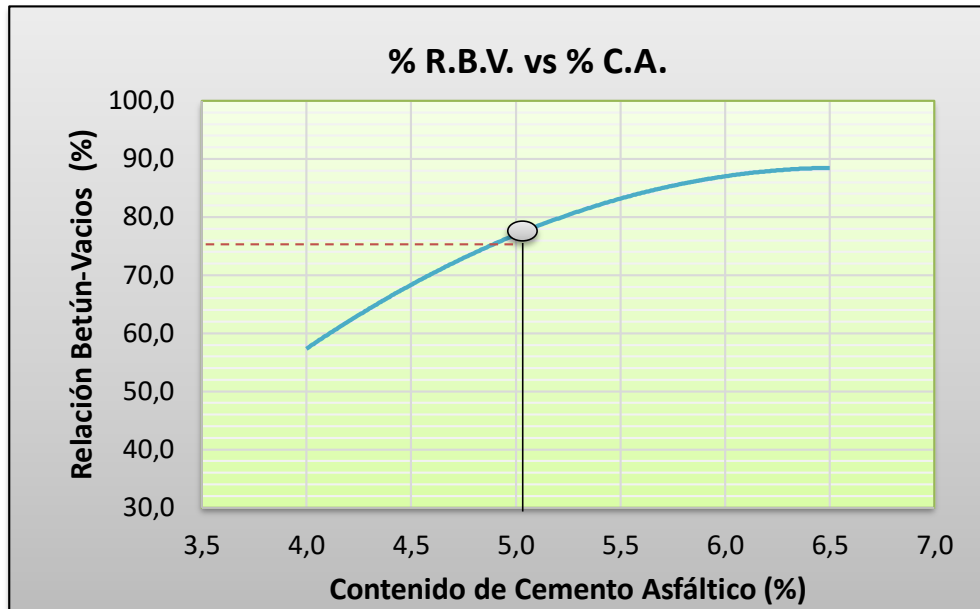
Fuente: Elaboración propia

Figura 70: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



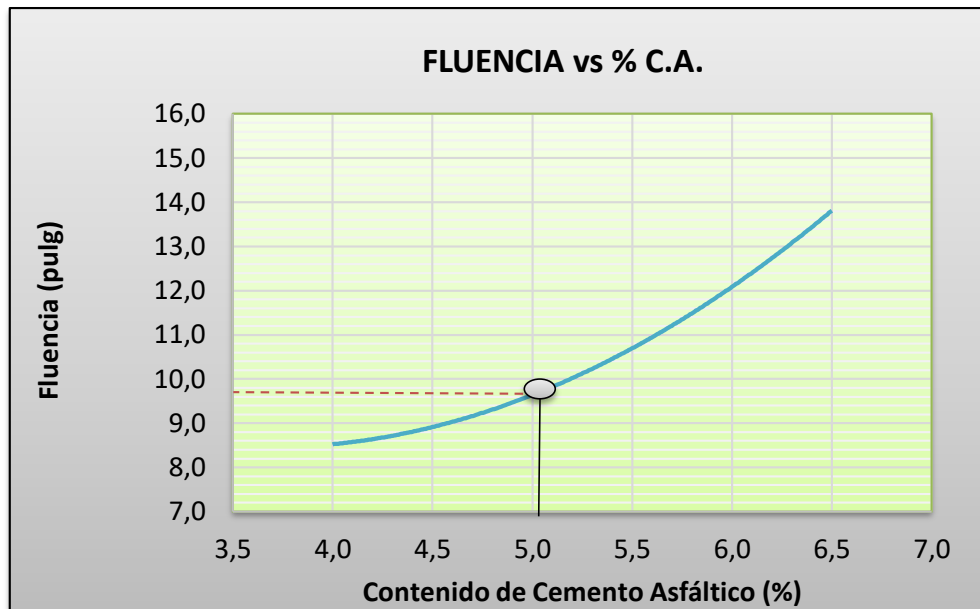
Fuente: Elaboración propia

Figura 71: Relación betún vacíos – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 72: Curva de fluencia – mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 68: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2333,3	5,10
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,32	5,54
	vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,77
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 69: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 2% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,14	2,312	-----	-----
% Vacíos	5,14	3,13	3	5
R.B.V. (%)	5,14	78,89	75	82
V.A.M (%)	5,14	14,83	>13	
Estabilidad (lb)	5,14	2334	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,14	9,89	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,14	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,14%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 3% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 145°C y compactadas a 135°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

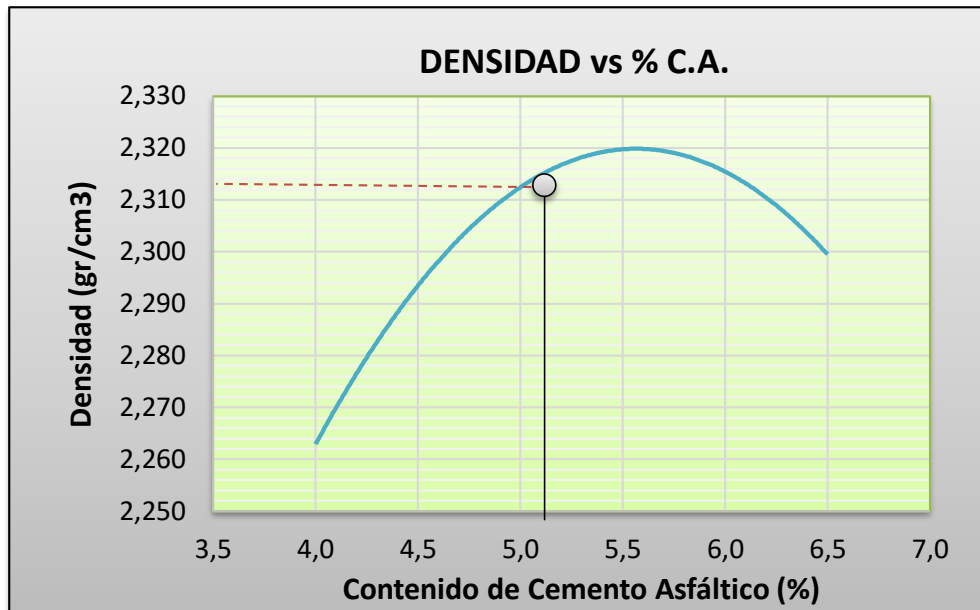
Tabla 70: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 3% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,26	2,30	2,32	2,32	2,31	2,30	-
Estabilidad (lb)	1841,50	2107,40	2245,90	2101,90	1844,40	1675,80	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	6,85	4,59	3,12	2,40	2,06	1,60	3 – 5
VAM (%)	15,74	14,76	14,54	14,94	15,69	16,32	>13
RBV (%)	56,46	68,69	78,49	83,91	86,85	90,19	75-82
Flujo (1/100")	8,00	8,33	9,33	10,00	12,00	14,00	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

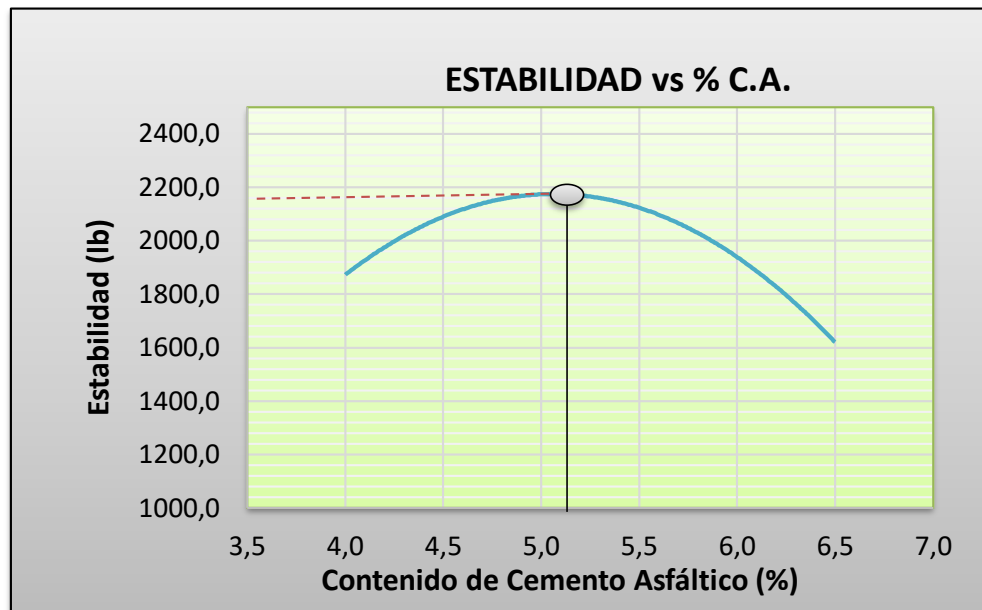
De la misma forma que en los anteriores casos, con los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 73: Densidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



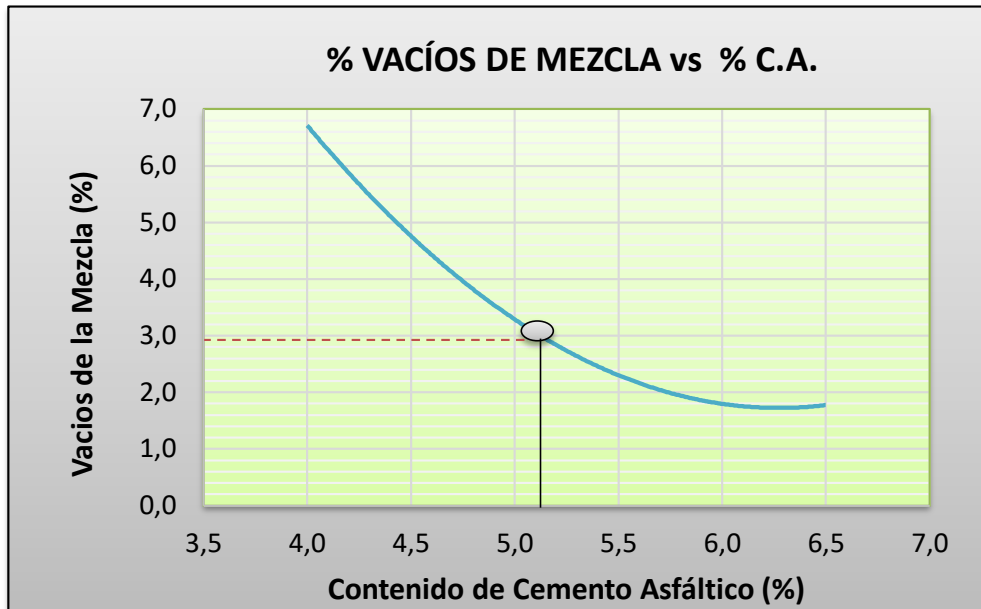
Fuente: Elaboración propia

Figura 74: Estabilidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



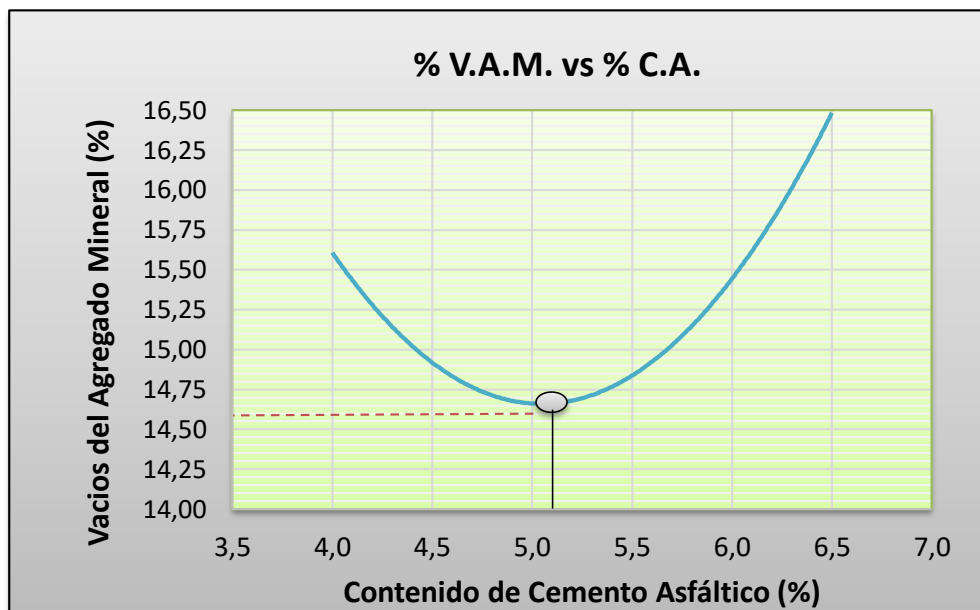
Fuente: Elaboración propia

Figura 75: Vacíos de la mezcla - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



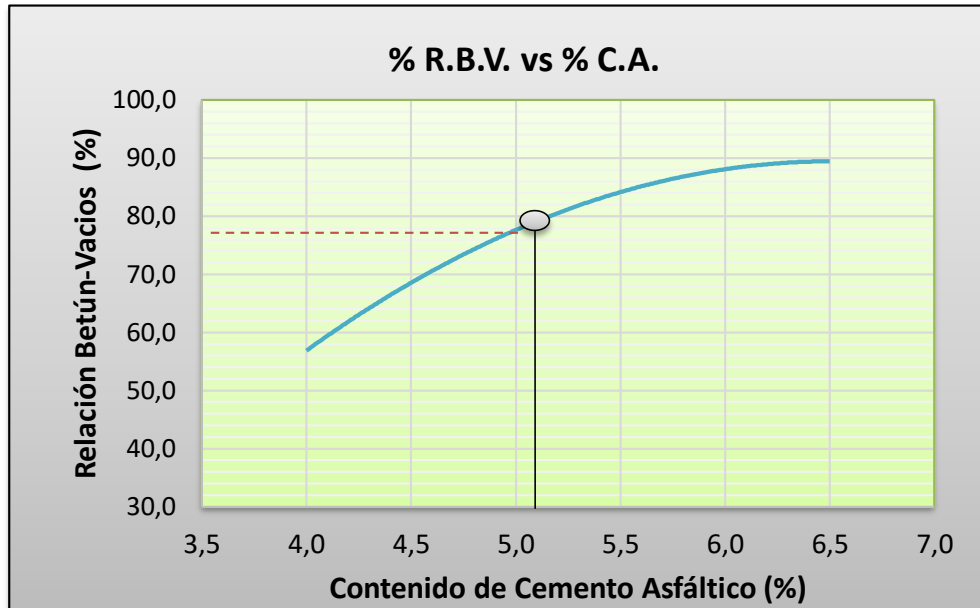
Fuente: Elaboración propia

Figura 76: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



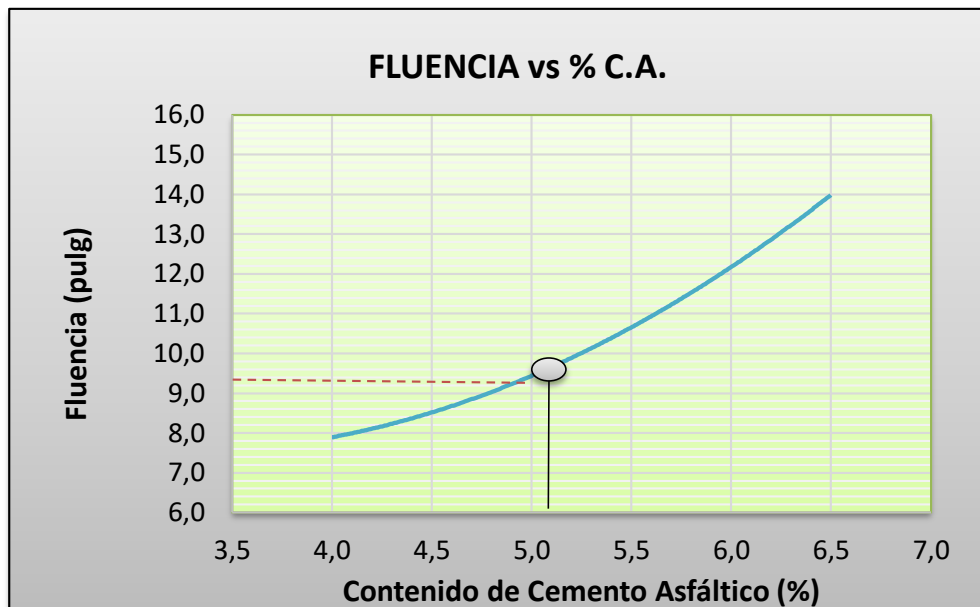
Fuente: Elaboración propia

Figura 77: Relación betún y vacíos - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 78: Curva de fluencia - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 71: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2174,646	5,06
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,319	5,56
	vacíos de la mezcla (%)	4,000	4,74
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 72: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 3% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,12	2,32	-----	-----
% Vacíos	5,12	3,01	3	5
R.B.V. (%)	5,12	79,42	75	82
V.A.M (%)	5,12	14,67	>13	
Estabilidad (lb)	5,12	2174	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,12	9,70	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,12	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,12%

Mezclas asfálticas tibias con adición de 4% de cera de soya

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya fueron elaboradas a una temperatura de 145°C y compactadas a 135°C. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla modificada se muestran en la siguiente tabla:

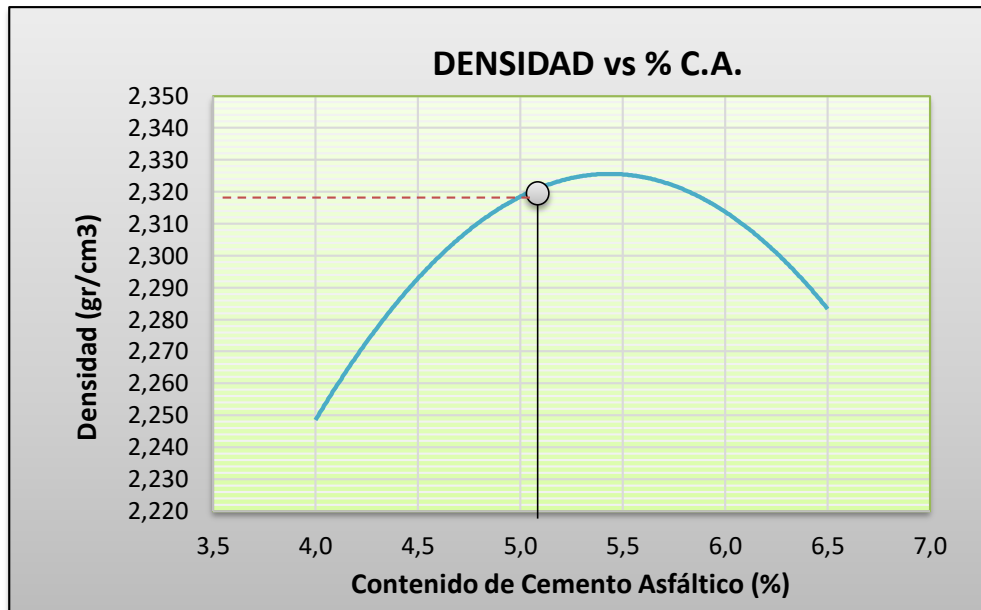
Tabla 73: Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 4% de cera de soya

Porcentaje de cemento asfáltico	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Especif.
Densidad (gr/cm ³)	2,24	2,30	2,32	2,33	2,31	2,29	-
Estabilidad (lb)	1511,50	1724,60	1770,60	1661,70	1472,90	1314,30	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7,53	4,38	3,03	2,08	2,20	2,23	3 – 5
VAM (%)	16,36	14,58	14,44	14,66	15,81	16,88	> 15
RBV (%)	53,99	69,96	79,00	85,82	86,10	86,76	65 – 75
Flujo (1/100")	7,33	7,67	9,33	10,33	12,33	13,33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

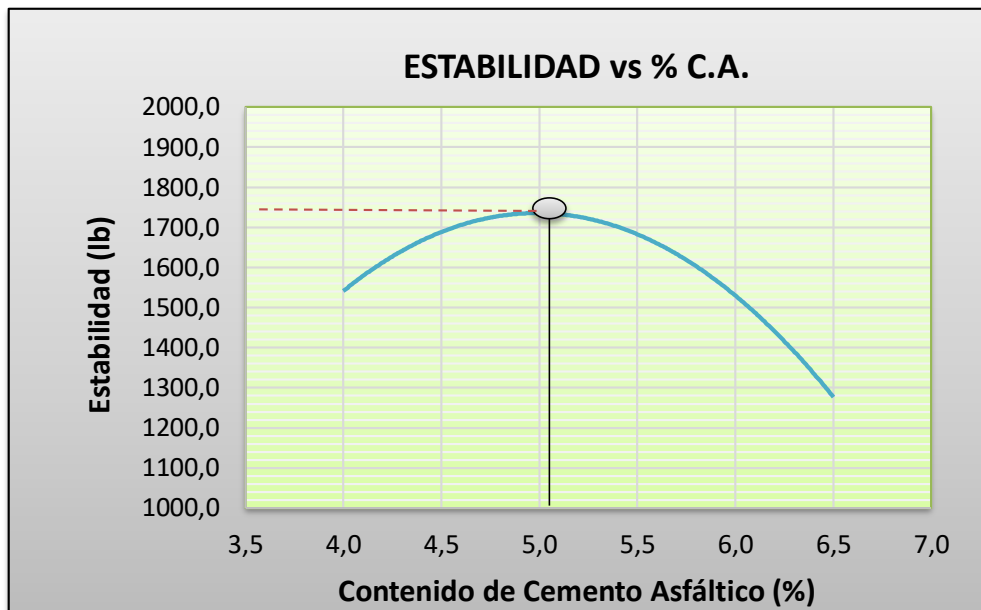
Finalmente, con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 79: Densidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



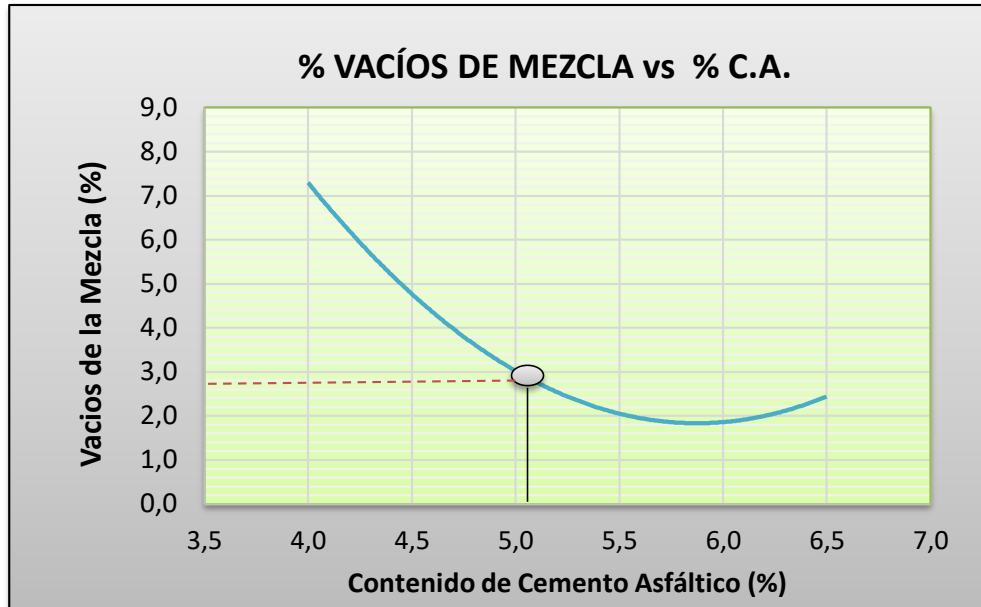
Fuente: Elaboración propia

Figura 80: Estabilidad Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



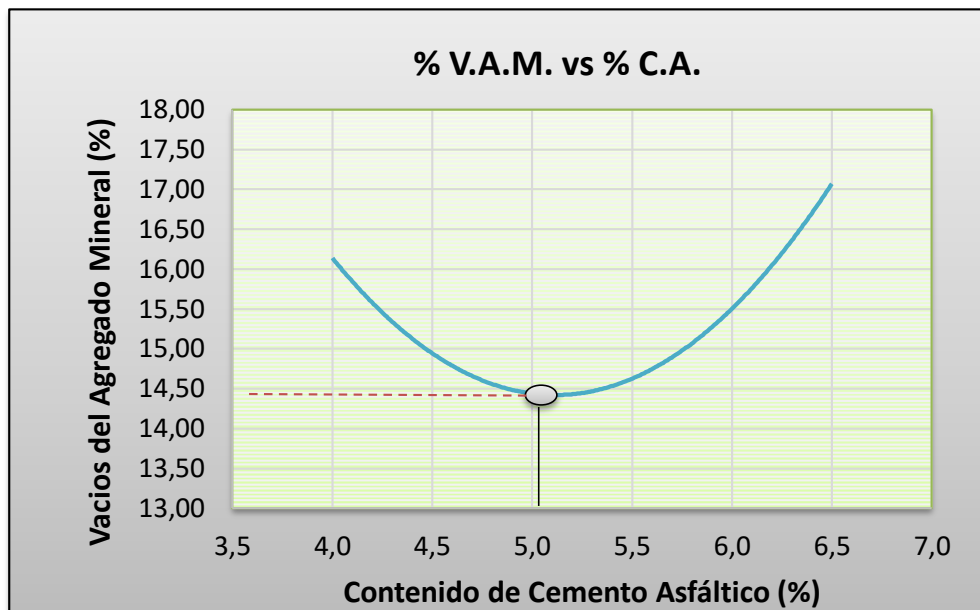
Fuente: Elaboración propia

Figura 81: Vacíos de la mezcla - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



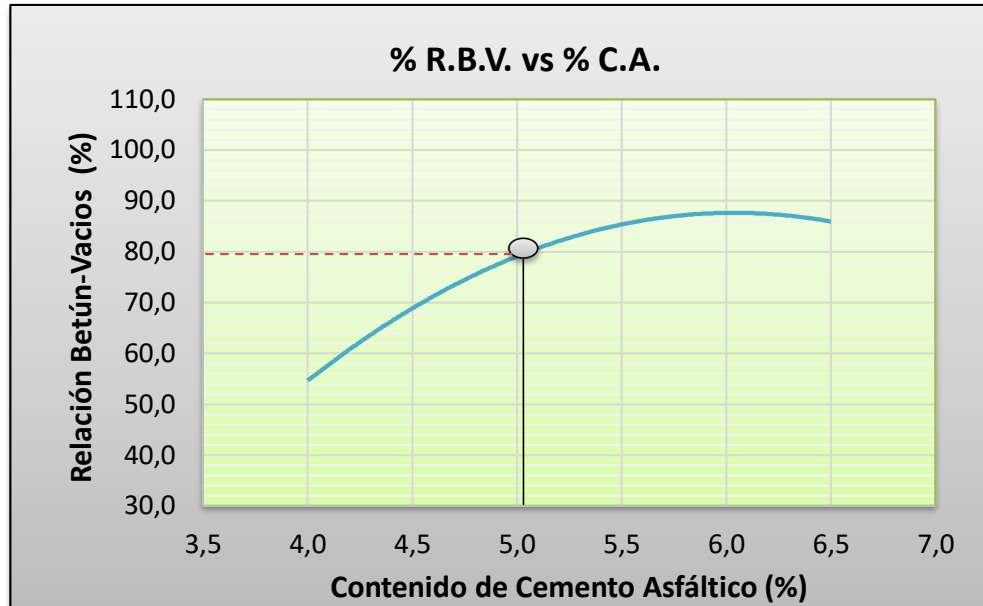
Fuente: Elaboración propia

Figura 82: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



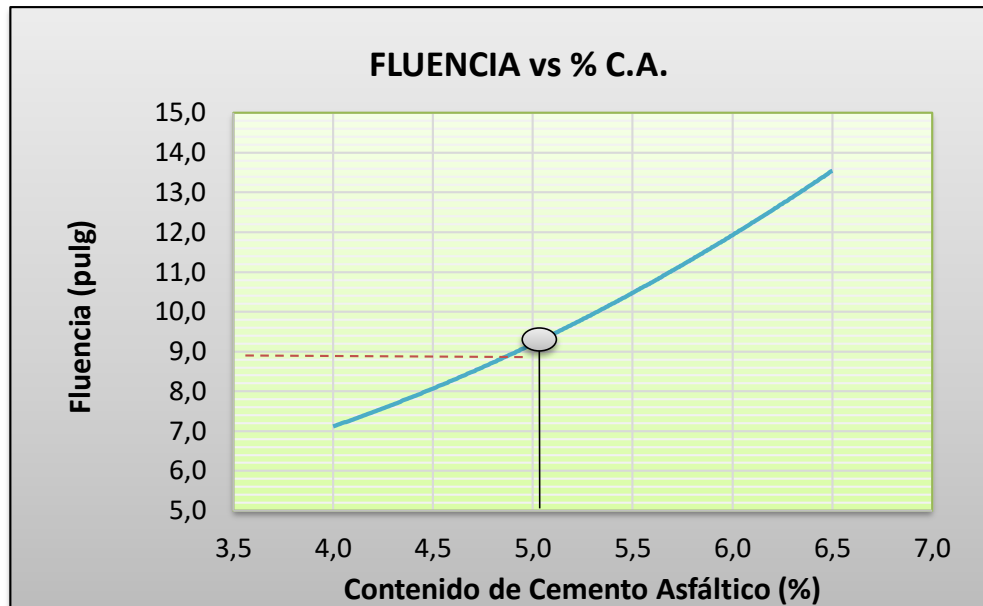
Fuente: Elaboración propia

Figura 83: Relación betún y vacíos - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Figura 84: Curva de fluencia - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 74: Valores obtenidos de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con cemento modificado 4% de cera de soya

	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	1735,542	4,99
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,327	5,44
	vacíos de la mezcla (%)	4,000	4,69
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,04

Fuente: Elaboración propia

Tabla 75: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla con asfalto modificado 4% de cera de soya

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,04	2,321	-----	-----
% Vacíos	5,04	2,92	3	5
R.B.V. (%)	5,04	79,76	75	82
V.A.M (%)	5,04	14,43	>13	
Estabilidad (lb)	5,04	1735	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,04	9,28	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,04	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,04%

3.5. Comparación de los resultados obtenidos

3.5.1. Comparación de los resultados de los agregados utilizados

Para los agregados que fueron utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas sólo se realizó la caracterización.

Tabla 76: Comparación de las características de los agregados

Ensayo	Resultado	Especificación ASTM
Agregado grueso		
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	*	-
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles. (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511	29,696%	< 35%
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519	*	-
Caras fracturadas en agregados gruesos. A0508	95,95%	> 75%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración. (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	3,16%	< 12%
Agregado fino		
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	*	-
Equivalente de arena. (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509	96,39 %	> 45%

Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	5,81 %	< 12%
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.	*	-
Filler		
Método para determinar la granulometría del filler. A0502	Cemento Portland	*
		-

* Datos expuestos en tablas anteriores

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos si cumplen con las especificaciones mínimas establecidas por normativa.

3.5.2. Comparación según la caracterización del cemento asfáltico convencional y el modificado

Cuando se pretende hacer el uso del cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico que será modificado se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño en la elaboración de las mezclas asfálticas.

Para ello se realizó la caracterización del cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes de cera de soya (1, 2, 3 y 4%). Los resultados de los ensayos realizados se presentan a continuación.

Peso específico

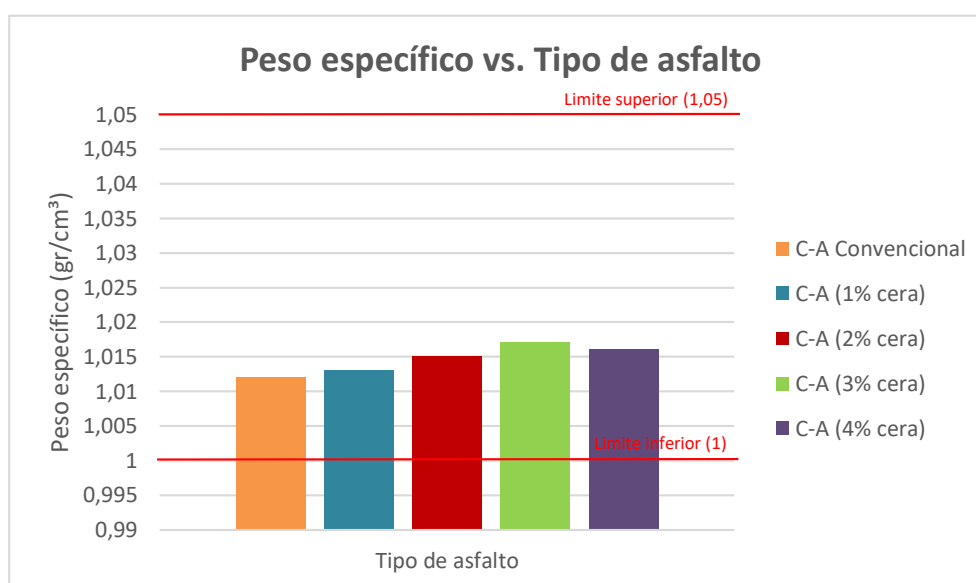
El peso específico es un aspecto a tomar en cuenta para el diseño de las mezclas asfálticas, el peso específico aumenta según el porcentaje de cera que se adiciona al betún y estos se encuentran dentro de las especificaciones esto se debe a que la cera al ser densa incrementa en menor proporción el volumen que el peso total de la mezcla.

Tabla 77: Peso específico de los tipos de asfaltos

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones		
						Min.	Max.	Método
Peso específico (gr.)	1,012	1,013	1,015	1,017	1,016	1,000	1,050	ASTM D-70

Fuente: Elaboración propia

Figura 85: Peso específico – tipo de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Punto de inflamación

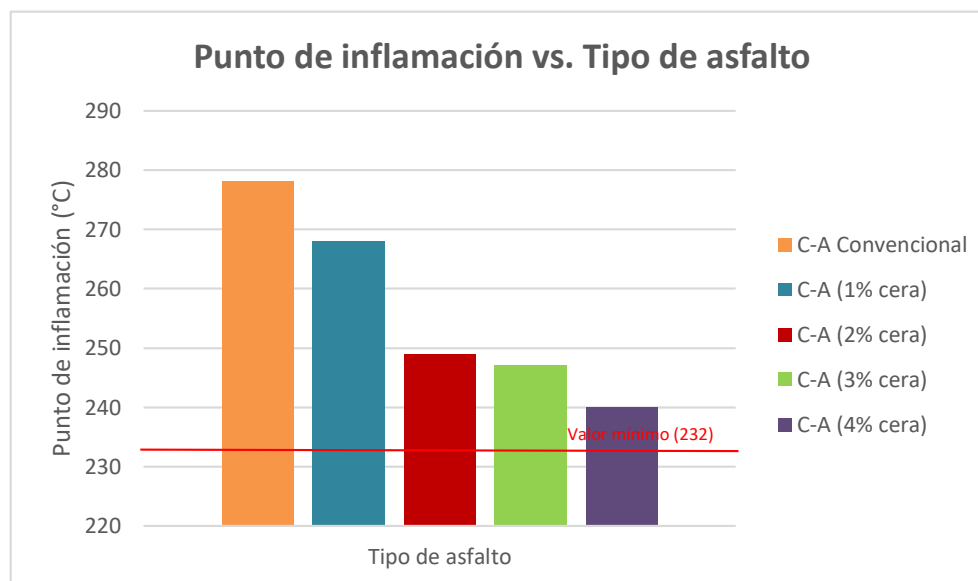
De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la temperatura del punto de inflamación disminuye según se adiciona los porcentajes de cera de soya.

Tabla 78: Punto de inflamación de los tipos de asfalto

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificación	
						Min.	Max.
Punto de inflamación AASHTO T-48 (°C)	278	268	249	247	240	>232	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 86: Punto de inflamación – Tipo de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Ductilidad

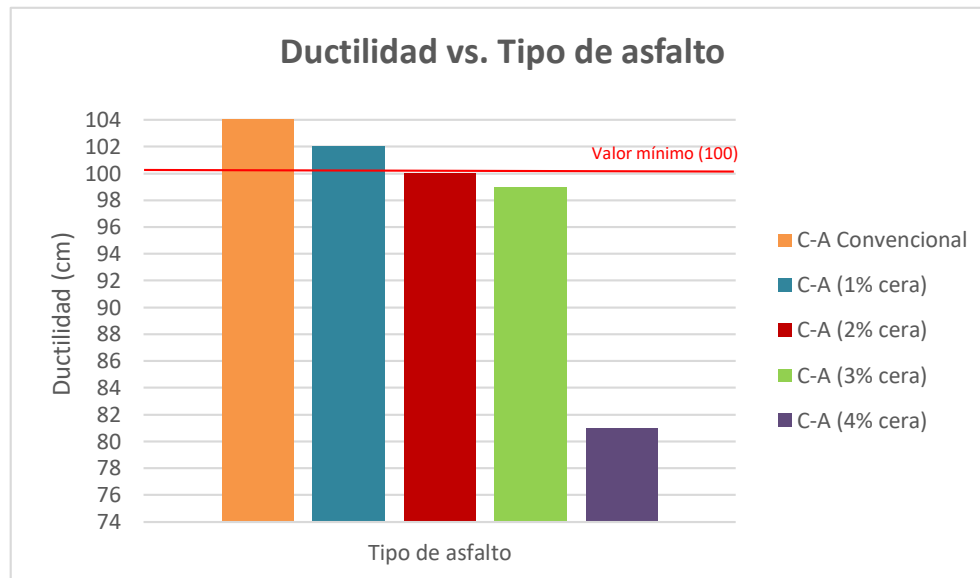
De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la ductilidad disminuye en los cuatro diferentes porcentajes lo que da una menor elasticidad en el ligante asfáltico, sólo dos porcentajes cumplen con las especificaciones mientras los dos últimos porcentajes están por debajo de la franja mínima.

Tabla 79: Ductilidad de los diferentes tipos de asfalto

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones	
						Min.	Max.
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 (cm)	104	102	100	99	81	>100	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 87: Ductilidad – Tipos de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Penetración

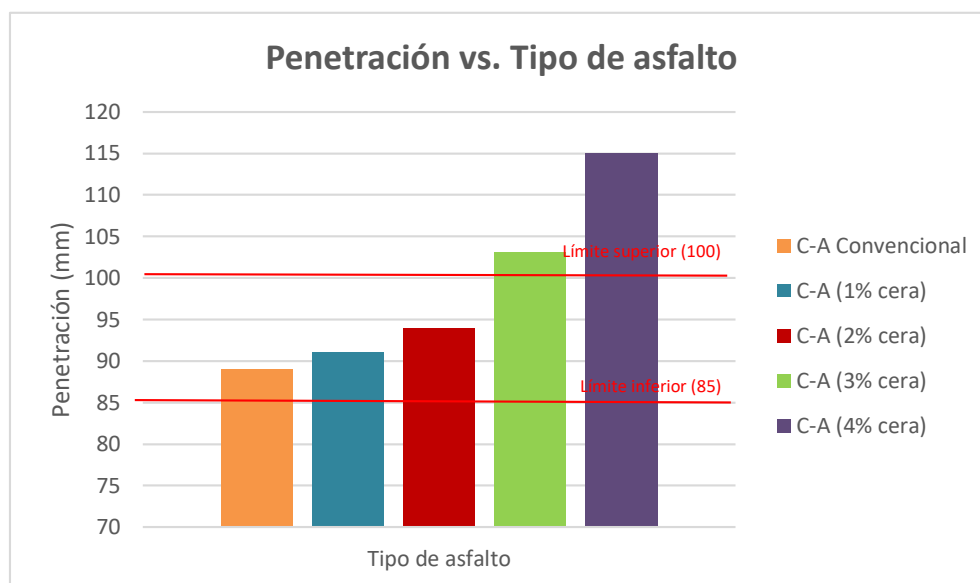
De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la penetración aumenta de acuerdo a la adición de cera de soya, lo que indica, como es de esperar la cera de soya vuelve más blando al asfalto.

Tabla 80: Penetración de los diferentes tipos de asfalto

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones	
						Min.	Max.
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49 (mm)	89	91	94	103	115	85	100

Fuente: Elaboración propia

Figura 88: Penetración – Tipos de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Viscosidad

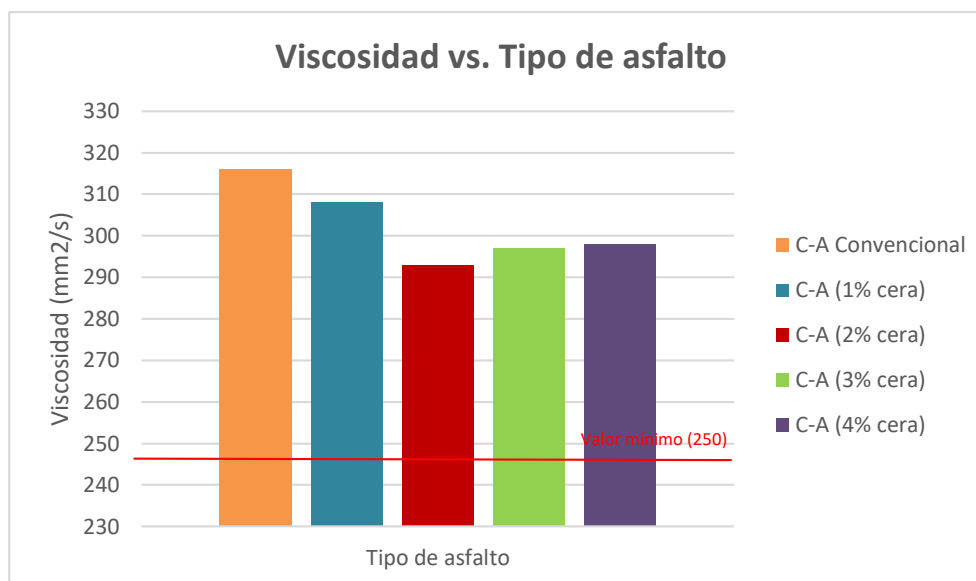
De acuerdo a los resultados se observa que la viscosidad disminuye en las dos primeras incorporaciones de cera lo que permite diseñar las mezclas a menor temperatura y los últimos porcentajes hacen que la viscosidad aumente debido a la gran cantidad de líquido denso en el que se vuelve la cera al calentarse, pero los resultados si cumplen con las especificaciones por norma.

Tabla 81: Viscosidad de los diferentes tipos de asfalto

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones	
						Min.	Max.
Viscosidad Cinemática 135°C AASHTO T-72 (mm ² /s)	316	308	293	297	298	250	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 89: Viscosidad – Tipos de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Punto de ablandamiento

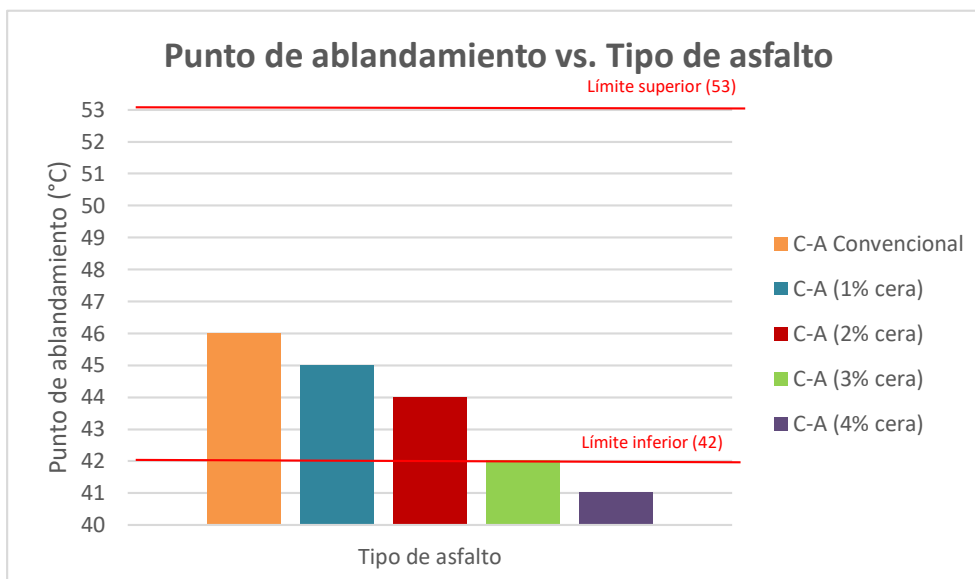
El asfalto con cera de soya al ser más blando, tiene un punto de ablandamiento más bajo a medida que se aumenta el porcentaje de cera de soya, lo cual puede afectar el comportamiento del asfalto en la mezcla asfáltica si las temperaturas de servicio del asfalto son altas.

Tabla 82: Punto de ablandamiento de los diferentes asfaltos

Ensayo	C-A Convencional	C-A (1% cera)	C-A (2% cera)	C-A (3% cera)	C-A (4% cera)	Especificaciones	
						Min.	Max.
Punto de ablandamiento (°C)	46	45	44	42	41	42	53

Fuente: Elaboración propia

Figura 90: Punto de ablandamiento – Tipos de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Tabla 83: Resumen de resultado de caracterización del asfalto

Ensayo	C-A Conv.		C-A (1%cera)		C-A (2%cera)		C-A (3%cera)		C-A (4%cera)		Especificaciones	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Peso específico (gr/cm ³)	1,012	C	1,013	C	1,015	C	1,017	C	1,016	C	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48 (°C)	278	C	268	C	249	C	247	C	240	C	232	-
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 (cm)	104	C	102	C	100	C	99	NC	81	NC	100	-
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49 (mm)	89	C	91	C	94	C	103	NC	115	NC	85	100
Viscosidad cinemática 135°C AASHTO T-72 (mm ² /s)	316	C	308	C	293	C	297	C	298	C	250	-
Punto de ablandamiento (°C)	46	C	45	C	44	C	42	NC	41	NC	43	53

C: Cumple

NC: No cumple

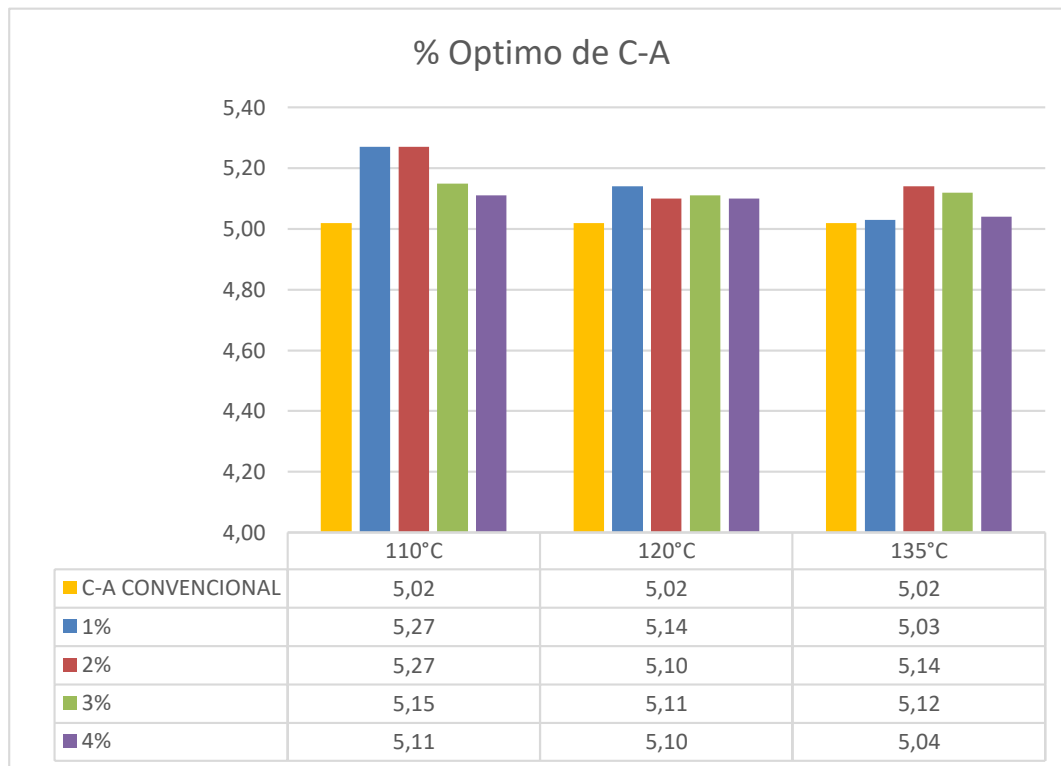
Fuente: Elaboración propia

El cemento asfáltico modificado con 3 y 4% de cera de soya es blando y poco elástico.

3.6. Análisis de resultados

3.6.1. Porcentaje óptimo de asfalto

Figura 91: Comparación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para las mezclas de trabajo

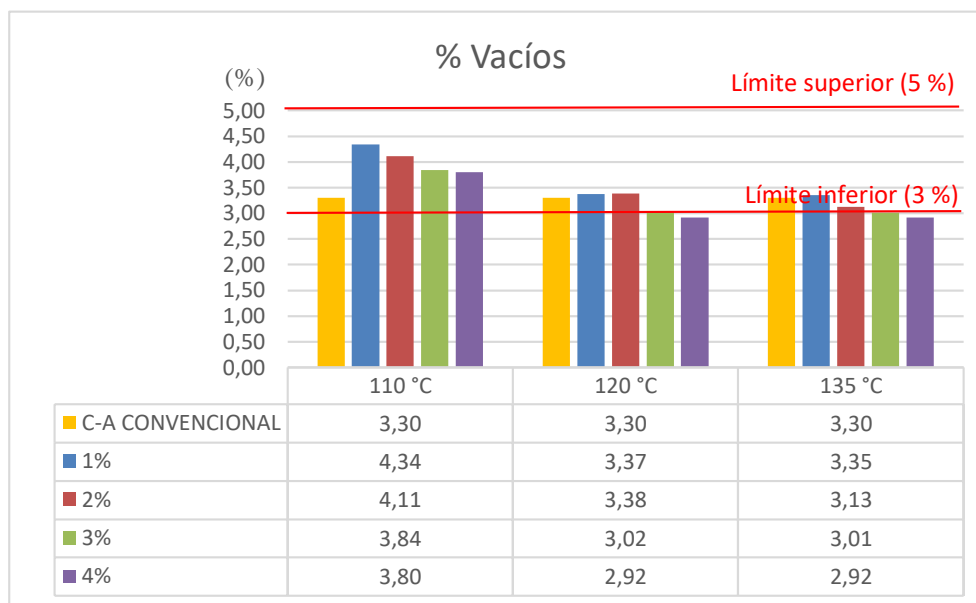


Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede apreciar una gran similitud en cuanto al contenido óptimo de cemento asfáltico.

3.6.2. Porcentaje de vacíos totales de la mezcla

Figura 92: Comparación de vacíos totales para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



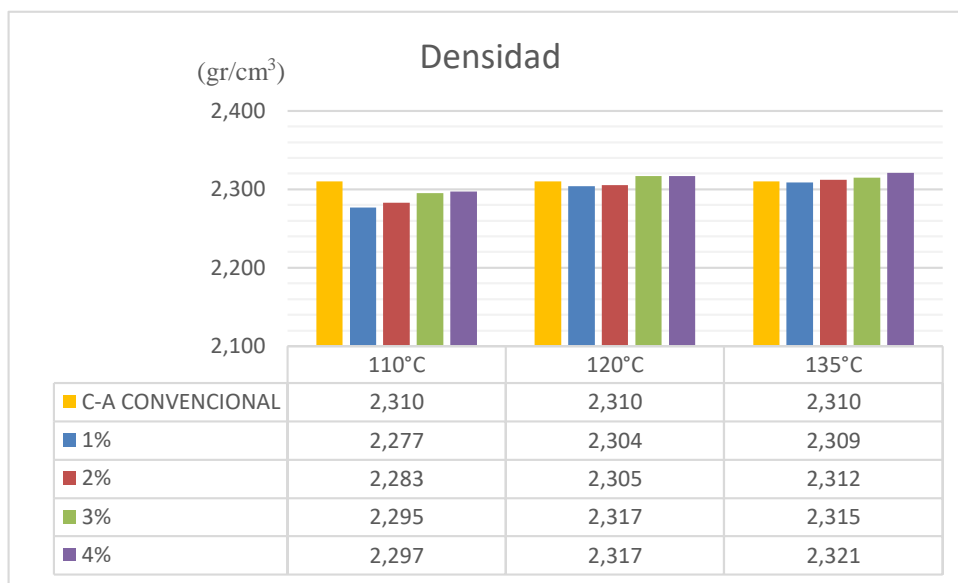
Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en la gráfica 10 las mezclas diseñadas a una temperatura de 110°C presentan mayor cantidad de vacíos en la mezcla lo que puede ocasionar pasajes a través de las mezclas por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro.

Así mismo, cabe destacar que las muestras de ensayo a 120°C y 135°C se encuentran dentro el rango especificado por norma, el cual está comprendido entre 3% a 5% de vacíos en mezclas, excepto las mezclas con un porcentaje de 4% de cera que tiene un contenido muy bajo de vacíos, lo q puede producir la exudación del asfalto, una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

3.6.3. Densidad de las mezclas de trabajo

Figura 93: Comparación de densidad para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

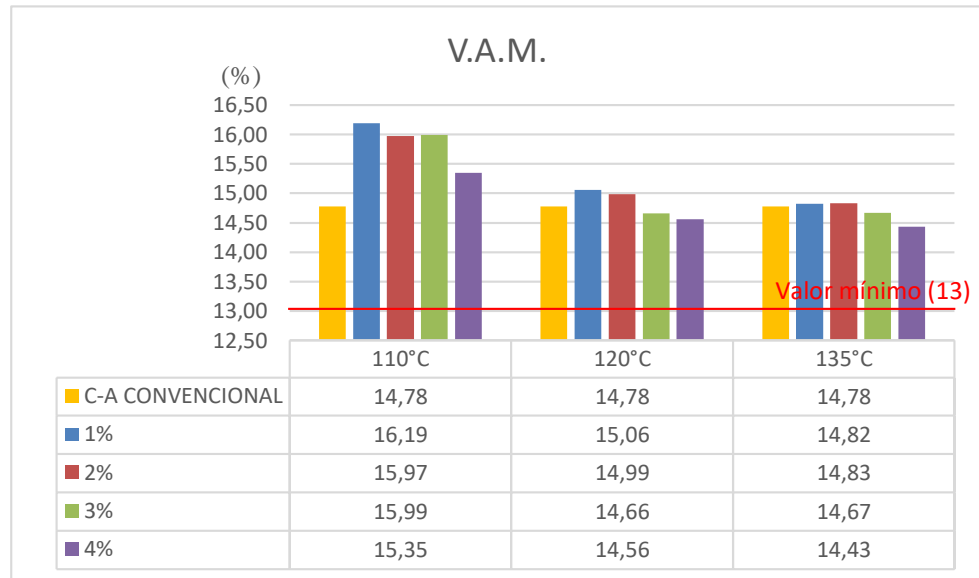
En cuanto a las densidades como podemos observar en la gráfica las muestras elaboradas a 110°C son muy bajas en comparación con la mezcla de referencia, por otro lado, las densidades de las muestras elaboradas a 135°C son las más similares a la mezcla patrón lo que nos permitirá obtener un rendimiento duradero de la mezcla.

3.6.4. Vacíos en agregado mineral – VAM

El VAM son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación.

Con los resultados que apreciamos de la gráfica se puede ver que las mezclas elaboradas a 110°C tienen mayor cantidad de vacíos en agregado mineral lo que quiere decir que habrá mayor espacio para las películas del asfalto y de esta manera la mezcla será más duradera. Sin embargo, el VAM de las otras mezclas se encuentran dentro de las especificaciones.

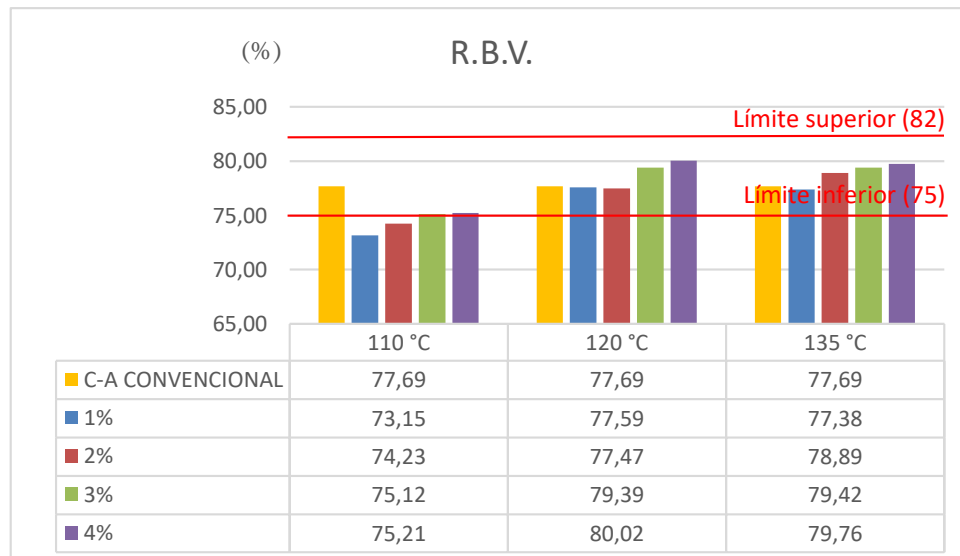
Figura 94: Comparación de vacíos en agregado mineral para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Relación betún vacíos – RBV

Figura 95: Comparación de relación betún vacíos para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



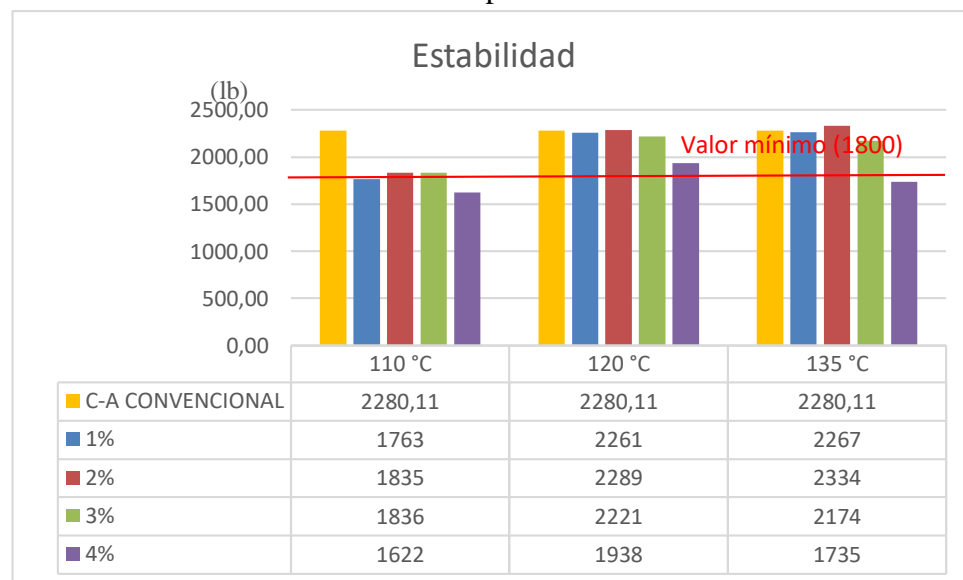
Fuente: Elaboración propia

Observando la gráfica la relación existente del porcentaje de RBV para los contenidos óptimos de cada muestra, existe un aumento de los mismos a manera que se incrementa la temperatura, lo cual podría significar que existe menor cantidad de aire en las mezclas semicalientes.

3.6.6. Estabilidad Marshall

La estabilidad es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir la acción del desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas.

Figura 96: Comparación de estabilidad para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

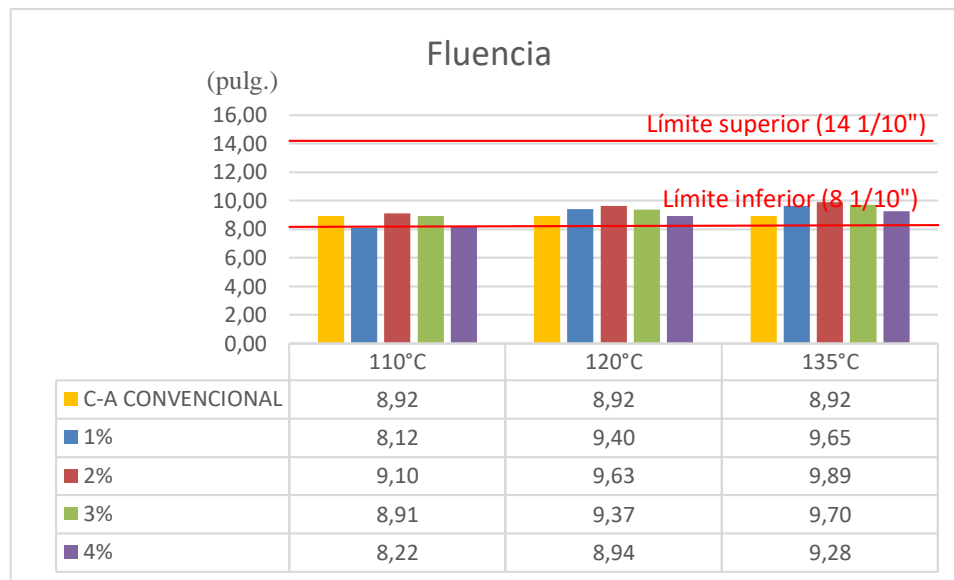
De acuerdo a los resultados de estabilidad Marshall para los porcentajes óptimos de las mezclas estudiadas se puede apreciar que los grupos de muestras elaboradas a 120°C y 135°C cumplen con la especificación mínima de la estabilidad, en cuanto a las mezclas elaboradas a 110°C la estabilidad es muy baja en comparación con la mezcla convencional.

Como se puede observar en las gráficas la temperatura que mejora la estabilidad de la mezcla asfáltica es de 135°C con un porcentaje añadido de 2% de cera de soya, a partir

de este punto la estabilidad empieza a descender considerablemente, esto se debe a que mientras más cera tenga la mezcla ésta se vuelve más blanda y a mayor temperatura la estabilidad disminuye.

3.6.7. Flujo de las mezclas de trabajo

Figura 97: Comparación de flujo para las mezclas asfálticas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, analizando el flujo que presenta en las mezclas asfálticas diseñadas tanto la convencional como las mezclas asfálticas tibias, se puede notar que todas encuentran gran similitud como se observa en la gráfica, y con valores de flujo dentro del rango establecido por norma considerando el porcentaje óptimo de asfalto, la cual permite una variación comprendida entre 8 a 14 centésima de pulgada (1/100”).

De igual forma se debe hacer notar que con la incorporación a escala de cera de soya en el cemento asfáltico para diseñar la mezcla asfáltica tibia, el flujo va creciendo, hasta la mezcla que contiene 2% de cera, posterior a esta mezcla de trabajo la fluencia empieza a decrecer levemente.

Resumen de resultados de las mezclas elaboradas a diferentes temperaturas

Tabla 84: Resumen de resultado de las propiedades (110°C)

Características	110 °C				Especificaciones	
	1%	2%	3%	4%	Min.	Max.
Densidad	2,277	2,283	2,295	2,297	-	-
% Vacíos	4,34	4,11	3,84	3,80	3	5
R.B.V	73,15	74,23	75,12	75,21	75	82
V.A.M.	16,19	15,97	15,99	15,35	13	-
Estabilidad (Lb)	1763	1835	1836	1622	1800	-
Fluencia 1/100"	8,12	9,10	8,91	8,22	8	16
% Optimo de C-A	5,27	5,27	5,15	5,11	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 85: Resumen de resultado de las propiedades (120°C)

Características	120 °C				Especificaciones	
	1%	2%	3%	4%	Min.	Max.
Densidad	2,304	2,305	2,317	2,317	-	-
% Vacíos	3,37	3,38	3,02	2,92	3	5
R.B.V	77,59	77,47	79,39	80,02	75	82
V.A.M.	15,06	14,99	14,66	14,56	13	-
Estabilidad (Lb)	2261	2289	2221	1938	1800	-
Fluencia 1/100"	9,40	9,66	9,37	8,94	8	16
% Optimo de C-A	5,14	5,10	5,11	5,10	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 86: Resumen de resultado de las propiedades (135°C)

Características	135 °C				Especificaciones	
	1%	2%	3%	4%	Min.	Max.
Densidad	2,309	2,312	2,315	2,321	-	-
% Vacíos	3,35	3,13	3,01	2,92	3	5
R.B.V	77,38	78,89	79,42	79,76	75	82
V.A.M.	14,82	14,83	14,67	14,43	13	-
Estabilidad (Lb)	2267	2334	2174	1735	1800	-
Fluencia 1/100"	9,65	9,89	9,70	9,28	8	16
% Optimo de C-A	5,03	5,14	5,12	5,04	-	-

Fuente: Elaboración propia

La mezcla asfáltica diseñada con asfalto modificado con cera de soya que presenta mejores propiedades en comparación con la mezcla asfáltica convencional es la que contiene un porcentaje de cera de 2% y fue elaborada a 135°C, logrando así la disminución de emisión de CO₂ debido a la reducción de temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas.

3.6.8. Análisis de costos

Luego de realizar la comparación de las propiedades de las mezclas de trabajo diseñadas se puede resaltar que, según los datos obtenidos, la utilización de la cera de soya como modificador de la viscosidad del cemento asfáltico presenta gran validez para su aceptación aquellos porcentajes que se encuentran comprendidos entre el 1% a 2% de las mezclas elaboradas a 135°C, siendo el segundo que presenta mejores propiedades con relación a la mezcla asfáltica convencional.

Tomando en cuenta lo mencionado, por consiguiente, se realizará el análisis de presupuesto para una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica tibia con la incorporación del 2% de cera de soya al asfalto, de manera que se pueda evidenciar la factibilidad de la utilización de este aditivo como reductor de viscosidad del cemento asfáltico para la elaboración de las mezclas asfálticas tibias, mediante una comparación entre ambos casos.

Analizando cantidad de materiales para la conformación de la capa de rodadura de una carretera con las siguientes dimensiones:

Ancho de calzada=7,30m, espesor= 0,06m, longitud= 1000m

Cantidad de agregados en porcentaje (mezcla convencional)

Grava = 47,49%

Arena = 42,74%

Filler = 4,75%

Cemento asfáltico = 5,02%

Cantidad de agregados en volumen (mezcla convencional)

Grava = 235,20m³

Arena = 210,70m³

Filler = 26950,00kg

Cemento asfáltico = 24999,80Lt

Cantidad de agregados requeridos mezcla tibia

Cantidad de agregados en porcentaje

Grava = 47,43%

Arena = 42,69%

Filler = 4,74%

Cemento asfáltico = 5,14%

Cantidad de agregados en volumen

Grava = 230,30m³

Arena = 210,70m³

Filler = 26950,0kg

Cera de soya = 453,35kg

Cemento asfáltico = 24681,30Lt

Debido a que en nuestro medio no se puede encontrar la cera de soya se recurrió a realizar la cotización en el interior del país, considerando el costo del proceso de producción y transporte. El análisis de costos para ambas fórmulas de trabajo se encuentra desarrollado en las tablas posteriores.

Inmediatamente de realizar la comparación de precios unitarios (Planillas posteriores) se puede verificar la variación económica que representa la utilización de las mezclas tibias, puesto que los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Mezcla asfáltica convencional:	Costo Bs. 600252,09/km
--------------------------------	------------------------

Mezcla asfáltica con 2% de cera de soya	Costo Bs. 632761,12/km
---	------------------------

La producción de mezclas asfálticas con incorporación de 2% de cera de soya representa un incremento de Bs 75,34/m³ y 32509,03/km en relación a mezclas asfálticas convencionales

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico convencional				
Unidad:	m ³				
Moneda:	Bs.				
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m ³	0,48	152	72,96
2	Arena clasificada	m ³	0,43	145	62,35
3	Cemento Portland	kg	55,00	1,1	60,50
4	Cemento asfáltico	Lt	51,02	10,58	539,79
5	Diesel	Lt	18,00	3,74	67,32
TOTAL MATERIALES					802,92
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	0,0900	23,19	2,0871
2	Obrero A	Hra.	0,0720	12,07	0,86904
3	Chofer	Hra.	0,0012	18	0,0216
4	Ayudante de operador	Hra.	0,0280	16	0,448
5	Operador de equipo liviano	Hra.	0,0820	18	1,476
6	Operador A	Hra.	0,8200	20	16,4
7	Operador B	Hra.	0,8200	20	16,4
SUBTOTAL MANO DE OBRA					37,70174
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	26,84
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	9,64
TOTAL MANO DE OBRA					74,18
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de asfalto	Hra.	0,09	965,23	86,8707
2	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0,0001	421,29	0,042129
3	Volqueta >= 12 m ³	Hra.	0,0012	227,87	0,273444
4	Terminadora de asfalto	Hra.	0,075	350	26,25
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	0,028	71,55	2,0034
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	0,035	303,85	10,63475
7	Compactador neumático TSP 10000	Hra.	0,084	332,81	27,95604
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	3,71
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					157,74
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	164,54
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					164,54
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	119,94
COSTO TOTAL UTILIDAD					119,94
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	40,77
COSTO TOTAL IMPUESTOS					40,77
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					1360,09

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico convencional				
Unidad:	km				
Moneda:	Bs.				
Espesor:	0,06m				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m³	210,24	152	31956,48
2	Arena clasificada	m³	188,34	145	27309,30
3	Cemento Portland	kg	24090,00	1,1	26499,00
4	Cemento asfáltico	Lt	22346,76	10,58	236428,72
5	Diesel	Lt	7884,00	3,74	29486,16
TOTAL MATERIALES					351679,66
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	39,4200	23,19	914,1498
2	Obrero A	Hra.	31,5360	12,07	380,63952
3	Chofer	Hra.	0,5256	18	9,4608
4	Ayudante de operador	Hra.	12,2640	16	196,224
5	Operador de equipo liviano	Hra.	35,9160	18	646,488
6	Operador A	Hra.	359,1600	20	7183,2
7	Operador B	Hra.	359,1600	20	7183,2
SUBTOTAL MANO DE OBRA					16513,36212
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	11754,21
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	4223,18
TOTAL MANO DE OBRA					32490,75
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de asfalto	Hra.	39,42	965,23	38049,3666
2	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0,0438	421,29	18,452502
3	Volqueta >= 12 m³	Hra.	0,5256	227,87	119,768472
4	Terminadora de asfalto	Hra.	32,85	455,03	14947,7355
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	12,264	71,55	877,4892
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	15,33	303,85	4658,0205
7	Compactador neumático TSP 10000	Hra.	36,792	332,81	12244,74552
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	1624,54
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					72540,12
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	72616,97
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					72616,97
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	52932,75
COSTO TOTAL UTILIDAD					52932,75
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	17991,84
COSTO TOTAL IMPUESTOS					17991,84
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					600252,09

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico modificado (2% cera de soya)				
Unidad:	m ³				
Moneda:	Bs.				
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m ³	0,47	152	71,44
2	Arena clasificada	m ³	0,43	145	62,35
3	Cera de soya	kg	0,93	115,00	106,40
4	Cemento asfáltico	Lt	50,37	10,58	532,91
5	Cemento Portland	kg	55,00	1,1	60,50
6	Diesel	Lt	18,00	3,74	67,32
TOTAL MATERIALES					900,92
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	0,0500	23,19	1,1595
2	Obrero A	Hra.	0,0700	12,07	0,8449
3	Chofer	Hra.	0,0012	18	0,0216
4	Ayudante de operador	Hra.	0,0250	16	0,4
5	Operador de equipo liviano	Hra.	0,0820	18	1,476
6	Operador A	Hra.	0,8200	20	16,4
7	Operador B	Hra.	0,8200	20	16,4
SUBTOTAL MANO DE OBRA					36,702
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	26,12
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	9,39
TOTAL MANO DE OBRA					72,21
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de asfalto	Hra.	0,05	965,23	48,2615
2	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0,0001	421,29	0,042129
3	Volqueta >= 12 m ³	Hra.	0,0012	227,87	0,273444
4	Terminadora de asfalto	Hra.	0,075	350	26,25
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	0,028	71,55	2,0034
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	0,035	303,85	10,63475
7	Compactador neumático TSP 10000	Hra.	0,084	332,81	27,95604
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	3,61
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					119,03
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	173,65
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					173,65
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	126,58
COSTO TOTAL UTILIDAD					126,58
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	43,03
COSTO TOTAL IMPUESTOS					43,03
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					1435,43

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpetas de concreto asfáltico modificado (2% cera de soya)				
Unidad:	km				
Moneda:	Bs.				
Espesor:	0,06m				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m³	205,86	152	31290,72
2	Arena clasificada	m³	188,34	145	27309,30
3	Cera de soya	kg	405,24	115,00	46602,32
4	Cemento asfáltico	Lt	22062,06	10,58	233416,59
5	Cemento Portland	kg	24090,00	1,1	26499,00
6	Diesel	Lt	7784,00	3,74	29112,16
TOTAL MATERIALES					394230,10
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	21,9000	23,19	507,861
2	Obrero A	Hra.	30,6600	12,07	370,0662
3	Chofer	Hra.	0,5256	18	9,4608
4	Ayudante de operador	Hra.	10,9500	16	175,2
5	Operador de equipo liviano	Hra.	35,9160	18	646,488
6	Operador A	Hra.	359,1600	20	7183,2
7	Operador B	Hra.	359,1600	20	7183,2
SUBTOTAL MANO DE OBRA					16075,476
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	11442,52
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	4111,19
TOTAL MANO DE OBRA					31629,19
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de asfalto	Hra.	21,9	965,23	21138,537
2	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0,0438	421,29	18,452502
3	Volqueta >= 12 m³	Hra.	0,5256	227,87	119,768472
4	Terminadora de asfalto	Hra.	32,85	455,03	14947,7355
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	12,264	71,55	877,4892
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	15,33	303,85	4658,0205
7	Compactador neumático TSP 10000	Hra.	36,792	332,81	12244,74552
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	1581,46
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					55586,21
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	76549,83
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					76549,83
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	55799,53
COSTO TOTAL UTILIDAD					55799,53
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	18966,26
COSTO TOTAL IMPUESTOS					18966,26
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					632761,12

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Posteriormente al estudio realizado se pueden citar las siguientes conclusiones:

- ✓ Se logró con el objetivo de fabricar una mezcla asfáltica tibia, a temperaturas inferiores que la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente obteniendo un excelente recubrimiento del agregado mediante la modificación de la viscosidad del cemento asfáltico por la adición de cera de soya.
- ✓ El cómputo global de los resultados obtenidos en estos ensayos mostró características muy favorables cumpliendo así las especificaciones mínimas requeridas.

Los resultados fueron los siguientes:

Agregado grueso

- Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (máx. 40%) = 29.70%
- Caras fracturadas en agregados gruesos (min. 75%) = 95.95%
- Método de sulfatos para determinar desintegración (máx. 12%) = 3.16%

Agregado fino

- Equivalente de arena (min. 45%) = 96.28%
- Método de sulfatos para determinar desintegración (máx. 12%) = 5.81%

- ✓ Los ensayos realizados para la caracterización del asfalto convencional y el asfalto modificado cumplen con las especificaciones mínimas requeridas excepto cuando se le añade 4% de cera de soya obtenemos asfaltos demasiados blandos lo que puede ser perjudicial si las temperaturas de elaboración son elevadas.

- ✓ Para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales se determinó un porcentaje óptimo de asfalto es 5.02% las propiedades físicas y mecánicas determinadas según el método Marshall fueron las siguientes
 - Densidad= 2.31 gr/cm³
 - % de vacíos en la mezcla (3-5) = 3.30%
 - %Relación betún vacíos (75-82) = 77,69%
 - % Vacíos en agregado mineral (min. 13%)= 14,78%
 - Estabilidad Marshall (min. 1800 lb) = 2280lb
 - Fluencia Marshall (8-14 1/100") = 8,92 1/100"

- ✓ Tomando en cuenta las propiedades Marshall, se puede resaltar que el uso de cera de soya aporta mayores beneficios a la mezcla asfáltica si es añadido en un porcentaje del 2% y elaborada a 135°C con un contenido óptimo de asfalto de 5,14%, las propiedades obtenidas fueron las siguientes:
 - En la mezcla asfáltica diseñada con asfalto modificado con cera de soya la densidad obtenida fue de 2,31 gr/cm³ que es igual al valor obtenido para la mezcla asfáltica convencional.
 - El porcentaje de vacíos obtenido en la mezcla asfáltica modificada es de 3,13% lo que representa un 94,85% del porcentaje de vacíos de la mezcla convencional que da una menor permeabilidad a la mezcla asfáltica tibia.
 - En cuanto al porcentaje de vacíos en agregado mineral el resultado obtenido fue de 14,83%, la mezcla tibia tendrá una película de asfalto mayor a la mezcla asfáltica convencional permitiendo mayor durabilidad en la mezcla tibia.
 - El valor obtenido de la estabilidad Marshall en la mezcla tibia es de 2334lb. mejorando un 2,4% la resistencia a la deformación y desplazamiento en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.
 - En las mezclas asfálticas diseñadas con asfalto modificado la fluencia obtenida fue de 9,89 1/100".

- ✓ Este aditivo en cantidades del 2% con respecto a la masa del asfalto, puede aumentar la concentración de calor de la mezcla, permitiendo que todos los materiales se integren sin inconvenientes a temperaturas inferiores que la mezcla asfáltica convencional en un rango de entre 20 y 40°C minimizando de esta manera el impacto ambiental al momento de fabricar, extender y compactar la mezcla asfáltica.

- ✓ Se demostró mediante el análisis de costos que producir dichas mezclas asfálticas tibias con la incorporación del 2% de cera de soya simboliza un incremento de Bs 75,34/m³ o 32509,03/km en relación a mezclas asfálticas convencionales. Si bien, la diferencia de costos representa un incremento significativo, se debe tener en cuenta que se consideró la obtención de la cera de soya en el interior del país, lo que provoca un incremento en su costo.

- ✓ Por último, se puede concluir que este tipo de mezclas es viable en nuestro medio permitiendo su utilización bajar las temperaturas de trabajo entre un rango de 20 °C a 40°C de las mezclas convencionales, y de esta manera se logra los beneficios ambientales ya que al producirse a menores temperaturas éstas disminuyen las emisiones que producen las mezclas convencionales.

4.2.Recomendaciones

Debido a la urgencia de proveer soluciones al calentamiento global y a la necesidad de optimizar los procesos constructivos, se considera importante continuar con la investigación de este tema, para lo cual se hace las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones.

- ✓ Procurar que los agregados utilizados provengan de fuentes con buena calidad, ya que cualquier mezcla asfáltica depende casi en su totalidad de las propiedades que ostentan los agregados pétreos.
- ✓ Es importante realizar los ensayos mínimos de caracterización, de los agregados como el cemento asfáltico, para determinar si el material es apto para ser utilizado en la elaboración de las mezclas asfálticas.
- ✓ Tener en cuenta las normas de seguridad que rigen en los laboratorios, especialmente cuando se manipula asfalto caliente debido a la exposición de gases tóxicos, provocadas por las altas temperaturas.
- ✓ Una vez fabricadas las briquetas, tomar los datos como la altura promedio y los pesos (seco, saturado superficialmente seco y sumergido), con un alto grado de precisión, debido a que son parámetros que influyen en los cálculos de la densidad y el porcentaje de vacíos.
- ✓ En climas cálidos, donde las temperaturas del pavimento son altas, se recomienda realizar un estudio ya que al utilizar ligantes demasiado blandos la mezcla podría ser más susceptible a fallas por ahuellamiento.
- ✓ De acuerdo a la bibliografía obtenida y en base a los resultados de ensayo de laboratorio, se recomienda incorporar en las especificaciones técnicas para construcción el uso diseño de mezcla asfáltica tibia en nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Administradora Boliviana de Carreteras. Manual De Ensayos De Suelos Y Materiales *Asfaltos. Edición APIA XXI Ingenieros Y Arquitectos Consultores.

Asphalt Institute 1973. "Manual del Asfalto". Traducido por Manuel Velázquez. PROAS. Ediciones URMO. España

Alejandro, Piqueras. R. (2004). Mezclas Asfálticas. Universidad politécnica de Cataluña, Informe. (Pág. 41-42).

Crespin Molina, R., Santa Cruz Jovel, I. E., & Torrez Linares, P. A. (2012). Aplicación del método Marshall en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto. San Salvador: Universidad de El Salvador.

Del Pozo, R. M. (13 de Marzo de 2014). Elaboración de velas de cera de soja. Ciudad Valles, San Luis Potosi: Instituto Tecnológico de Ciudad de Valles.

Homes, L. &. (2013). Metodo Marshall. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta.

Marín, K. (2016). Propiedades del Asfalto y Mezclas Asfálticas. Panamá. Universidad Técnica de Panamá.

Padilla Rodríguez, A. (2004). Clasificación de las mezclas asfálticas. En Mezclas Asfálticas (págs. 45-46). España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. (2014). En Asphalt Institute MS-22 (pág. 59).

Román Chamba, R. (Septiembre de 2017). Fabricación de hormigones asfálticos Tibios en el Ecuador . Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.

Turpo, V., & Mendoza, C. (2014). Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca. Perú, Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

UDEP. (2017). Diseño de mezclas asfálticas. Perú: Universidad de Piura.

Valle rodas, R. (25 de Octubre de 2018). Carreteras, calles y autopistas .

Webgrafía

Bisso Fernández, R. (30 de mayo de 2017). Pavimentos Ecológicos. Obtenido de: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/3-glassphalt.html>.

Webmaster. (1 de Abril de 2012). *Revista maquinaria pesada*. Obtenido de <http://revistamakinariapesada.com/carreteras-verdes-o-ecologicas/>

ANEXOS

ANEXO I
IMAGENES

ANEXOS II
PLANILLAS DE CÁLCULO

ANEXOS III
DOCUMENTOS DE RESPALDO