

CAPÍTULO I
DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1 Introducción

El constante incremento de la población y la mayor facilidad de movilidad que existe hoy en día, han dado lugar a un aumento paralelo y gradual en la demanda de transporte, esto conduce a un deterioro acelerado del pavimento de las carreteras por lo que la exigencia de mejoras en las vías y mezclas asfálticas con una vida de servicio más larga, es esencial.

Uno de los principales problemas que se producen en los pavimentos de asfalto debido a las condiciones climáticas y ambientales es el fracaso en la unión entre el aglutinante y la superficie del agregado. Estos problemas se deben principalmente a características de cohesión y adhesión, lo que se traduce en grietas y superficies de pavimentos con pérdidas de material.

La comprensión de las propiedades funcionales y mecánicas de las mezclas asfálticas es esencial a diferentes temperaturas, dada la influencia que esta variable ejerce directamente sobre el comportamiento visco-elástico de los materiales.

Este estudio pretende analizar la influencia de la temperatura de mezclas asfálticas fabricadas con un filler no convencional mediante el concepto de sensibilidad o susceptibilidad térmica. Las mezclas asfálticas a evaluar son fabricadas con cenizas procedentes de las plantas de celulosa más propiamente de la caña de azúcar, como filler de aportación. Finalmente, para determinar los resultados obtenidos se utiliza el método universal de caracterización de ligantes UCL y se determina si es válido.

1.2 Justificación

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

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

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

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

En el presente proyecto se pretende realizar un análisis experimental de la influencia de temperatura en las mezclas asfálticas, debido a que las mezclas asfálticas bajo condiciones extremas de temperatura, presentan características asimilables a las de un cuerpo frágil, lasto-plástico o viscoso. Es de vital importancia evaluar los filler a utilizar a la hora de proyectar u otorgar una mayor capacidad de cohesión a las mezclas asfálticas frente a agentes externos y las variaciones de temperatura.

Dentro de la vida del pavimento se presentan problemas debido a las condiciones climáticas y ambientales que llevan al fracaso en la unión entre el aglutinante y la superficie del agregado, éstas pueden ser controladas mediante las características de cohesión y la susceptibilidad térmica que presenta el mastico a la mezcla ; la primera, relacionada con el poder aglomerante y la resistencia a la disgregación de sus materiales, mientras que la segunda se relaciona con la variación en el comportamiento mecánico de mezclas a distintas temperaturas.

Bajo este contexto la presente investigación pretende mejorar la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas mediante mezclas asfálticas con cenizas procedentes de la planta de celulosa (ceniza de caña de azúcar), como filler de aportación. Para determinar los resultados obtenidos se realizará mediante el método universal de caracterización de ligantes UCL.

1.3 Diseño teórico

1.3.1 Situación Problemática

El asfalto por ser uno de los materiales más utilizados en la construcción de pavimentos, es de vital importancia para un ingeniero civil conocer sus características y propiedades, y así de esta manera llegar a una idea más clara del comportamiento que este va a tener cuando sea puesto en servicio.

En nuestra región la construcción de pavimentos flexibles es una modalidad que se ha incrementado desde hace muchos años. La susceptibilidad térmica es una de las propiedades que proporciona el cemento asfáltico a una mezcla asfáltica, que de acuerdo al tipo de agregado mineral utilizado arrojará un comportamiento específico.

La corta vida útil que muestran nuestros pavimentos flexibles, ya que apoco tiempo de ser puestos en uso presentan un deterioro bastante considerable que a la larga crea una serie de incomodidades a los usuarios; incomodidades que repercuten en el deterioro de los vehículos, hacen menos placenteros sus viajes y lo peor del caso muchas veces influyen de manera determinantes en los accidentes de tránsito que cobran la vida de muchas personas.

Los ingenieros civiles están en la obligación de saber por qué se presentan estos problemas en los pavimentos flexibles, los cuales radican la mayoría de las veces en problemas de diseños de mezclas, que es el punto de partida para este trabajo.

Se pretende analizar experimentalmente la susceptibilidad térmica de mezclas, con la fabricación de briquetas en dos grupos, la primera con el filler del agregado mineral y la segunda sustituyendo totalmente el filler con un filler de ceniza de celulosa, utilizando el método UCL, basado en el ensayo de cántabro de pérdida por desgaste..

1.3.2 Problema

¿De qué manera el análisis experimental de las mezclas asfálticas fabricadas con cenizas procedentes de celulosa utilizando el método universal de caracterización de ligantes UCL puede determinar la susceptibilidad térmica?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar experimentalmente mezclas fabricadas con cenizas procedentes de la celulosa como filler de aportación al mástico bituminoso, para determinar la influencia de temperaturas, utilizando el método UCL basado en el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

1.4.2 Objetivos específicos

- Definir los conceptos principales necesarios para desarrollar el tema de susceptibilidad térmica.
- Realizar la caracterización de los agregados y cemento asfáltico para conseguir las propiedades necesarias de las mezclas y así lograr que respondan a los objetivos propuestos en el diseño.
- Fabricar briquetas mediante el método Marshall con el fin de obtener el porcentaje óptimo de asfalto y de agregados para la realización de la mezcla asfáltica.
- Fabricar y ensayar briquetas sometidas a diferentes condiciones (en seco y a distintas temperaturas) para realizar el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.
- Elaborar la gráfica denominada curva de estado para evaluar la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas.

1.5 Hipótesis

Si se realiza correctamente el ensayo cántabro de pérdida por desgaste, se puede obtener la gráfica de pérdidas al cántabro en función de la temperatura, denominada curva de estado, entonces, se puede desarrollar el análisis de susceptibilidad térmica utilizando el método universal de caracterización de ligantes UCL y así determinar si es válido.

1.6 Conceptualización de las variables

1.6.1 Variable independiente

- Método Universal de Caracterización de Ligantes UCL.

1.6.2 Variable dependiente

- Método Marshall.
- Ensayo cántabro de pérdida por desgaste.
- Curva de estado.

1.7 Alcance

Considerando que el presente trabajo realizado es de tipo experimental-explicativo, donde se busca las causas que originan el problema, en nuestro caso particular se busca saber cuál es la tendencia de la susceptibilidad térmica a través del comportamiento del cemento asfáltico y mezcla.

Al realizar el “Análisis experimental sobre la susceptibilidad térmica de mezclas fabricadas con cenizas de celulosa utilizando el método UCL”, se desarrollará una serie de ensayos, empezando con la selección de materiales, la caracterización de los agregados y la caracterización del cemento asfáltico. Se realizará el diseño y construcción de briquetas mediante el método Marshall, posteriormente el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste para poder elaborar la gráfica denominada curva de estado y así poder analizar la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas, todo esto mediante ensayos de laboratorio. Se hará una validación y evaluación de todos los resultados obtenidos.

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

1.8 Análisis estadístico

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO II
SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS

CAPÍTULO II

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Mezclas asfálticas

2.1.1 Definición

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

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

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.

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.

2.1.1.1 Clasificación de las mezclas asfálticas.

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

- a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.
 - Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
 - Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
 - Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
 - Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 160 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
- 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 la granulometría.

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

2.1.1.2 Propiedades de la mezcla asfáltica

2.1.1.2.1 Estabilidad

La estabilidad se refiere a la capacidad de soportar esfuerzos de tensión provocados por el paso de vehículos sin producir desplazamientos ni deformaciones en la carpeta asfáltica. Una mezcla estable evita la formación de ahuellamientos (roderas), ondulaciones y otros deterioros que indican cambios en la misma. En resumen, la estabilidad es la resistencia a la deformación y su valor se incrementa entre más angulosas (macrotextura) y ásperas (microtextura) sean las partículas del agregado.

Tabla 1. Causas y efecto relacionado con la baja estabilidad

CAUSA	EFEECTO
Exceso de cemento asfáltico en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamientos y exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia, ahuellamientos y exudación.
Material pétreo con pocas o ninguna cara de fractura.	Ahuellamiento.

2.1.1.2.2 Durabilidad

La durabilidad de la mezcla es la propiedad de resistir la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de la película del asfalto debidos a la acción combinada del tráfico y factores naturales, así como el derrame de sales fundentes, aceite o combustibles. La durabilidad mejora conforme se incrementa el contenido de asfalto en la mezcla. Acción contraria sucede con la estabilidad, por lo que es necesario encontrar un punto de equilibrio entre las dos variables.

Tabla 2. Causas y efectos relacionados con la baja durabilidad

CAUSA	EFEECTO
Bajo contenido de asfalto en la mezcla.	Endurecimiento prematuro del betún y desintegración por pérdida del árido
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento prematuro del betún seguido por agrietamiento o desintegración
Material pétreo susceptible al agua.	Desprendimiento de la película de asfalto, dejando un pavimento desgastado o desintegrado

2.1.1.2.3 Impermeabilidad

Se define como la resistencia al paso del agua y aire a través de la mezcla asfáltica.

Esta propiedad está relacionada directamente con el tamaño y porcentaje de vacíos que posee la mezcla compactada.

La impermeabilidad a diferencia de las propiedades anteriores se requiere pero con limitantes, pues también es necesario el paso restringido del agua a través de la mezcla. Las limitaciones se expresan en función del porcentaje de vacíos permitidos por las normas correspondientes. En la tabla se enlistan nuevamente algunas causas y sus efectos debido a la baja temperatura impermeabilidad en la mezcla asfáltica.

Tabla 3. Causas y efecto relacionados con la baja permeabilidad

CAUSA	EFEECTO
Tamaño máximo de partícula grande.	Dificultad para colocar.
Exceso de árido grueso.	Dificultad para compactar.
Temperatura muy baja de mezclado.	Dificultad para compactar, árido sin recubrir, mezcla poco durable.
Exceso de arena de tamaño medio.	Mezcla que se desplaza, muy blanda.
Bajo contenido de relleno mineral (filler).	Mezcla blanda, muy permeable.
Alto contenido de relleno mineral (filler).	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

2.1.1.2.4 Trabajabilidad

Es la facilidad con la que la mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. La trabajabilidad está relacionada principalmente a la estructura mineral y en menor medida a la viscosidad del ligante.

La tabla menciona algunas causas y efectos producto de una mala trabajabilidad.

Tabla 4. Causas y efecto con la baja trabajabilidad

CAUSA	EFEECTO
Bajo contenido de asfalto en la mezcla.	Endurecimiento prematuro del betún y desintegración por pérdida del árido
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento prematuro del betún seguido por agrietamiento o desintegración
Material pétreo susceptible al agua.	Desprendimiento de la película de asfalto, dejando un pavimento desgastado o desintegrado

2.1.1.2.5 Flexibilidad

La flexibilidad de la mezcla asfáltica se refiere a la capacidad de acomodarse después de un movimiento o asentamiento del cuerpo del pavimento sin que se presenten fisuras o agrietamientos.

2.1.1.2.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga se refiere a la capacidad de soportar la flexión repetida bajo las cargas de tráfico, además de resistir el efecto de las bajas temperaturas sobre el pavimento. La resistencia por fatiga implica seleccionar materiales resilientes, es decir, capaces de resistir la aplicación de cargas repetitivas. El deterioro más común a falta de esta propiedad es conocido como "piel de cocodrilo".

A continuación, en la tabla se presentan las causas y efectos debidos a la falta de resistencia a la fatiga.

Tabla 5. Causas y efecto relacionados con la baja resistencia a la fatiga

CAUSA	EFEECTO
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o la mala compactación.	Envejecimiento temprano del betún, seguido por agrietamientos por fatiga.
Espesor insuficiente en capas.	Flexión excesiva seguida por agrietamiento por fatiga.

2.1.1.2.7 Resistencia al deslizamiento

La capacidad de mantener la adherencia del neumático con la superficie de la carpeta asfáltica, especialmente cuando ésta se encuentra mojada. La resistencia al deslizamiento se encuentra estrechamente relacionada con la rugosidad (microtextura) y aspereza (macrotextura) que presente el agregado pétreo.

La microtextura es la textura superficial de los agregados de una superficie de rodamiento e interviene en la adherencia entre llantas y pavimento. La microtextura es un valor cualitativo que describe que tan pulida o áspera se encuentra la textura de los agregados. La magnitud de las irregularidades del agregado es un valor inferior a 0.5 mm.

Por su parte, la macrotextura se define como las depresiones o el relieve que presenta una superficie de rodamiento respecto a un plano. Al igual que la microtextura puede medirse cualitativamente, calificando a la superficie como pulida o áspera en función de la ausencia o presencia de esta característica. La magnitud de las depresiones puede alcanzar valores desde 0.50 hasta 50 mm.

La resistencia al deslizamiento junto con la resistencia a la fatiga son unas de las principales propiedades requeridas en las condiciones de servicio de un pavimento asfáltico.

Tabla 6. Causas y efecto relacionados con la baja resistencia al deslizamiento

CAUSA	EFFECTO
Exceso de betún.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Árido mal graduado.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Árido pulido en la mezcla.	Poca resistencia al deslizamiento.

2.1.2 Cemento asfáltico

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución. Procesos naturales han dado lugar a yacimientos en los que puede encontrarse mezclado con minerales, agua y otras sustancias. En otras pocas ocasiones se le ha encontrado libre de materias extrañas. Sin embargo, es comúnmente obtenido mediante el proceso de destilación del petróleo en refinerías.

Sin embargo, de la gran variedad de ligantes hidrocarbonados obtenidos del petróleo es principalmente el cemento asfáltico y sus derivados (emulsiones asfálticas y betunes fluidificados y fluxados) los que se emplean para la construcción de carreteras. También, en menor escala, los asfaltos naturales y los alquitranes son empleados todavía en algunos países.

La incorporación del cemento asfáltico como elemento integrante de las mezclas para la capa de rodadura se debe a sus adecuados valores de adhesividad, resistencia, impermeabilidad, durabilidad y costo. Además de su alta resistencia a los ácidos, álcalis y sales.

Como parte integrante de la mezcla puede representar desde el 3% hasta el 10% en peso con respecto al agregado pétreo. En volumen, la proporción se sitúa entre el 8% y el 25%.

2.1.2.1 Características del cemento asfáltico

La necesidad de aprovechar las ventajas del cemento asfáltico como aglomerante ha provocado que ingenieros e investigadores estudien su peculiar comportamiento ante la susceptibilidad térmica y al tiempo de aplicación de la carga.

El asfalto es un material que puede ser considerado elástico lineal a bajas temperaturas y altas frecuencias de carga, pero presenta propiedades plásticas y viscosas a temperaturas más altas y velocidades bajas, de ahí que comúnmente se considere como un material visco-elástico.

Otra característica importante del asfalto es la oxidación o envejecimiento provocada por la reacción de sus moléculas orgánicas con el oxígeno del medio ambiente. La oxidación del asfalto debilita su estructura, resultando un asfalto más duro y frágil.

2.1.2.2 Modificadores del cemento asfáltico

En la actualidad los altos índices de tráfico vehicular y el exceso de carga han inducido a que ciertos productos sean incorporados a la mezcla con la finalidad de mejorar alguna de sus propiedades ingenieriles.

Por lo anterior se ha originado dentro de la clasificación de cementos asfálticos al igual que para las emulsiones asfálticas la posibilidad de modificarlos mediante la disolución o incorporación de polímero, fibras, hidrocarburos o hule molido de neumáticos.

Las propiedades ingenieriles que buscan mejorar en el cemento asfáltico son:

- Resistencia a la ruptura por fatiga.
- Resistencia a la deformación permanente.
- Disminución a la fragilidad con temperaturas muy bajas.
- Aumento en la cohesión con altas temperaturas.
- Mejorar la resistencia al impacto.
- Disminuir el drenado de asfalto en mezclas de graduación abierta.
- Reducir el endurecimiento debido al envejecimiento.
- Disminuir la sensibilidad a la humedad.
- Mejorar la adherencia de los agregados.

2.1.2.3 Propiedades del cemento asfáltico

El uso eficiente de cualquier material implica conocer ampliamente las propiedades relacionadas a los fines para los cuales será destinado. El cemento asfáltico no es la excepción y como parte integrante de la mezcla asfáltica resultan decisivas sus propiedades químicas, mecánicas y reológicas

2.1.2.3.1 Propiedades químicas

Las propiedades químicas se refieren a la composición y estructura coloidal del cemento asfáltico. Algunos ensayos efectuados para evaluar estas propiedades son: ensayo de la mancha, solubilidad, contenido de agua, punto de inflamación y el contenido de cenizas. Las propiedades químicas a evaluar son:

- Composición.
- Estructura.

2.1.2.3.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son las relacionadas al comportamiento que tendrá el asfalto frente a tensiones o deformaciones al incorporarse a la mezcla asfáltica.

- Ductilidad.- La ductilidad de un cemento asfáltico es la capacidad a deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue y es directamente proporcional a la temperatura.
- Fragilidad.- La fragilidad se refiere a la resistencia al quiebre de una película de asfalto a bajas temperaturas.
- Cohesión.- La cohesión de un asfalto se le atribuye a su capacidad de mantener su estructura molecular unida ante las sollicitaciones de carga. Esta propiedad es relacionada a diferentes temperaturas con la medida de energía absorbida por la ruptura de una película por el efecto del impacto de un péndulo. La cohesión que brinda el asfalto a las mezclas está directamente relacionada con su susceptibilidad térmica.
- Rigidez.- La rigidez de un asfalto también depende de la temperatura a la que se registre la medición.
- Envejecimiento.- El cemento asfáltico al ser un derivado del petróleo posee en su composición química moléculas orgánicas que al contacto con el

oxígeno presente en el medio ambiente ocasiona su envejecimiento. El envejecimiento se produce más rápidamente a altas temperaturas y es responsable del endurecimiento prematuro del cemento asfáltico. La etapa más crítica de envejecimiento se produce durante las altas temperaturas requeridas para su mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, sin embargo durante sus años de servicio la oxidación es constante.

2.1.2.3.3 Propiedades reológicas

La reología describe como se deforma en el tiempo un cuerpo sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, y se puede definir como el estudio de los cambios en la forma y el flujo de la materia, abarcando elasticidad, viscosidad y plasticidad.

- Densidad.- La densidad es la relación de masa por unidad de volumen y es muy importante para el cálculo de vacíos en mezclas asfálticas compactadas. En el estudio del cemento asfáltico, su densidad depende de la temperatura, clasificación y proceso de refinación del asfalto. En general, el cemento asfáltico posee una densidad relativa muy cercana a la unidad, incrementando este valor de acuerdo al grado de penetración que esté presente.
- Viscosidad.- La viscosidad se define como la fricción interna de un fluido, causada por atracción molecular, la cual produce una resistencia al flujo. Para el cemento asfáltico es función de su temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas contribuye a la estimación de la susceptibilidad térmica. A mayor fricción, mayor es la cantidad de fuerza requerida para causar este movimiento, la cual es denominada fuerza de corte. Típicamente las temperaturas para los ensayos que estiman la viscosidad se especifican a 60°C y 135°C con la finalidad de proporcionar valores límite de consistencia.
- Consistencia.- La consistencia de un asfalto varía de estado sólido a líquido según la temperatura a la que se efectúe la medición. Los ensayos de viscosidad, penetración y punto de reblandecimiento evalúan esta propiedad, indicando como parte del resultado la temperatura del ensayo para su correcta interpretación. El ensayo de penetración obtiene empíricamente un parámetro

de la consistencia del cemento asfáltico, en función de la distancia que logra penetrar una aguja estandarizada bajo una carga y tiempo especificado.

- Susceptibilidad térmica.- La susceptibilidad térmica se refiere a la sensibilidad de otras propiedades del asfalto de acuerdo a la temperatura. La susceptibilidad térmica es una de las características más importantes del asfalto y gran parte de los modificadores del asfalto tienen por objetivo incrementar el rango dentro del cual el cemento asfáltico tendrá un comportamiento elástico.

Los ensayos realizados de la caracterización del cemento asfáltico son detallados en anexo.

2.1.3 Agregado pétreo empleado en mezclas asfálticas

El agregado pétreo es empleado en combinación con asfaltos de diversos tipos para preparar mezclas de utilidades muy diversas. Como los áridos constituyen normalmente el 90% en peso o más de la mezcla, sus propiedades tienen gran influencia sobre el producto terminado. Por lo tanto el control de las propiedades del agregado pétreo es tan importante como las del asfalto.

2.1.3.1 Características del material pétreo

El agregado pétreo, independientemente del origen, procedimiento para su obtención o mineralogía, debe proporcionar suficiente resistencia al corte bajo la aplicación de cargas repetidas por el tráfico.

Cuando la intensidad de la carga aplicada sobre una masa de agregado excede su resistencia al corte se genera un plano de falla, produciendo una deformación permanente. Por lo tanto, la resistencia al corte del agregado es sumamente importante en la estructura de la mezcla asfáltica porque proporciona principalmente la resistencia al ahuellamiento del pavimento.

Típicamente el agregado pétreo posee valores bajos de cohesión por sí solo, dado que la resistencia al corte está directamente relacionada con la fricción interna del material.

Los materiales resistentes presentan mayor dilatación que los más débiles a causa de su mayor ángulo de fricción interna y densificación.

Los ensayos efectuados al agregado pétreo tienen como objetivo asegurar una adecuada estructura con gran resistencia al corte, estudiando la forma, textura, granulometría, resistencia al desgaste, afinidad con el asfalto y sanidad del mismo.

Los ensayos de caracterización de los agregados que se realizaron en el presente trabajo están descritos en anexos.

2.1.3.2 Clasificación de acuerdo al proceso de obtención

La forma de explotación tiene una decisiva importancia para la obtención de agregados de calidad, llegándose incluso a obtener un agregado pétreo aceptable de un procedencia mediocre o viceversa. En función de los métodos utilizados para la obtención de los áridos se tienen las siguientes las siguientes variantes.

- Agregados naturales.- El agregado pétreo de origen natural es aquel que se emplea para la construcción de mezclas asfálticas tal y como se encuentra en su yacimiento. Son extraídos mediante la excavación de yacimientos de origen fluvial, cólico o marino. Dependiendo del lugar o tipo de yacimiento será la forma y gradación del material, teniendo en las arenas de río altos contenidos de grava, sedimentos y arcillas donde su forma redondeada se debe a que han sido transportados y rodados por el agua. Normalmente los agregados naturales no cumplen con los límites granulométricos recomendados por lo que deben ser cribados para posteriormente conformar una granulometría adecuada de diseño.
- Agregados procesados.- Actualmente se prefieren los agregados procesados debido a la forma fracturada de sus partículas que resulta de la trituración de rocas. Los agregados procesados conservan las mismas propiedades que las rocas de donde han sido obtenidos por lo que se tienen agregados sedimentarios, ígneos y metamórficos.
- Agregados artificiales o manufacturados.- Típicamente, los áridos de origen artificial provienen de procesos industriales de los cuales son un subproducto,

del tratamiento industrial de áridos naturales, de demoliciones o del reciclado de firmes existentes. La razón de utilizar agregado pétreo de origen artificial ha sido por consideraciones de tipo ambiental, energético y por la escasez de áridos naturales, así como, la necesidad de características especiales.

Entre los áridos artificiales que son subproductos de procesos industriales se encuentran las gangas y desechos de explotaciones mineras y de canteras, escorias cristalizadas de alto horno, escorias de acería, cenizas volantes de centrales térmicas, escorias de la incineración de residuos sólidos urbanos, desechos de industrias cerámicas y del vidrio. Existen también áridos artificiales que son conocidos como manufacturados. Este tipo de agregados son obtenidos a partir de procesos industriales pero regularmente de áridos naturales y su principal objetivo es lograr características especiales para capas de rodadura. Típicamente son usadas arcillas expandidas, sílice calcinada y bauxita calcinada.

2.1.4 Filler en mezclas asfálticas

El filler en mezclas asfálticas aglomera los distintos elementos del árido proporcionando la cohesión necesaria para aumentar la rigidez del material. Dicho filler (material que pasa el tamiz N° 200) posee ciertas características fundamentales que influyen en su comportamiento dentro de la mezcla como su mineralogía, forma y tamaño de sus partículas. La adición de llenante mineral al asfalto es una de las modificaciones que se hace para mejorar las características de éste, debido a comportamientos poco favorables en los pavimentos, su estado normal provoca en ocasiones fallas en carpetas asfálticas. La mineralogía del filler, como la de todos los agregados, es uno de los factores más importantes en el comportamiento de una mezcla asfáltica, es importante conocer los minerales que componen el llenante para determinar la influencia que tienen en la rigidez de las mezclas.

2.1.4.1 Elección del filler adecuado

En el momento de aplicación del filler deberá estar seco y exento de grumos. El material que pasa el tamiz N°200 sea el polvo mineral deberá cumplir con la siguiente regla: más del 50% deberá hacerlo por tamizado en seco con relación a la vía húmeda. El polvo mineral deberá ser no plástico o de baja plasticidad.

2.1.4.2 Efecto del filler como componente de las mezclas asfálticas

- Uno de los principales efectos que tiene el llenante mineral sobre los pavimentos es el aumento considerable de la durabilidad debido a que se reduce el contenido de vacíos y disminuye la penetración del agua a las capas.
- Al incrementarse el contenido de llenante aumenta la estabilidad de la mezcla hasta unos valores máximo, perdiendo luego la estabilidad gradualmente.
- Un aumento excesivo de llenante es la mezcla asfáltica también genera problemas en su comportamiento, consigue que el pavimento se endurezca demasiado y consecuentemente se vuelva frágil ocasionando fisuras en la capa asfáltica.

2.1.4.2.1 Agente estabilizante de ceniza de celulosa

Las cenizas de celulosa son un producto de origen vegetal y renovable. La principal fuente de celulosa es la madera, aunque también se obtiene de otras especies vegetales (paja, cereales, restos de podas, plantas herbáceas). Se trata de una sustancia con una superficie específica elevadísima. La molécula de celulosa presenta una inercia química muy alta, o sea, es poco propensa a reaccionar con otras sustancias, por lo que no altera las propiedades del betún. La compatibilidad con el betún es muy buena, por lo que en condiciones adecuadas la envuelta de las cenizas por éste es fácil y completa.

2.1.4.2.2 Agente estabilizante de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar

Según (Subirós Ruiz, 2000), Es el nombre común de esta especie de herbáceas, vivaces, de tallo leñoso de un género (*Saccharum*) de la familia de las gramíneas (*Gramineae*), originaria de la Melanesia y cuya especie fundamental es *Saccharum officinarum*. Fue introducida en Cuba por el año 1535 desde Santo Domingo. La caña de azúcar se cultiva mucho en países tropicales y subtropicales de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos, formados por numerosos nudos. Es un pasto gigante

emparentado con el sorgo y el maíz. La caña alcanza entre 3 y 6 m de altura y entre 2 y 5 cm de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo; El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis con hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud. En su parte superior encontramos la panocha, que mide unos 30 cm. de largo.

Según (Subirós Ruiz, 2000), El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad (familia) de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. Sin embargo, unos valores de referencia general pueden ser:

- Agua 73 - 76 %.
- sacarosa 08 - 15 %.
- fibra 11 - 16 %.

La sacarosa del jugo es cristalizada en el proceso como azúcar y la fibra constituye el bagazo una vez molida la caña.

2.1.4.2.3 Bagazo de caña de azúcar.

Según (Subirós Ruiz, 2000), se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de esta producción. Es un combustible natural para producir vapor en las fábricas azucareras Es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña.

Según (Subirós Ruiz, 2000), Cuando el bagazo sale del molino posee aproximadamente la siguiente composición:

- Humedad (50%).
- Sólidos solubles (5%).

- Sólidos insolubles o fibra cruda (45%).

Además, su composición química es la siguiente:

- Carbono: 47 %.
- Hidrógeno: 6,5 %.
- Oxígeno: 44 %.
- Cenizas: 2,5 %.

Estudios recientes han demostrado que los desechos de la industria azucarera principalmente ceniza de bagazo de caña de azúcar, tienen actividad puzolánica derivada de su alto contenido de sílice amorfa en este material.

2.1.4.2.3.1 Ceniza de la caña de azúcar

El bagazo es obtenido durante la molienda de la caña de azúcar para la extracción del jugo, luego es sometido a un proceso de combustión (400-500 °C) en hornos industriales para la producción de calor en el proceso de elaboración del azúcar; resultado de este proceso es una ceniza rica en sílice.

La ceniza reactiva es de color gris oscura. Es necesario pulverizar las partículas de ceniza para obtener granos más finos y luego tamizar por el tamiz N° 200

Imagen 1. Extracción de la ceniza de caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 2. Ceniza de caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Diseño de mezclas asfálticas- Método Marshall

2.2.1 Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y proporciónar los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Los pesos específicos de todos los agregados usados y el peso específico del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.2.1.1 Método Marshall

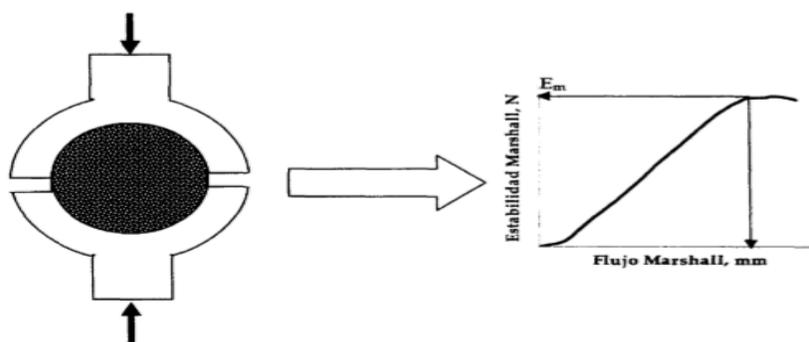
Desarrollado por Bruce Marshall quien colaboraba para el "Mississippi State Highway Department". Posteriormente, en 1943 fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de Norteamérica e incluido en la norma ASTM D 1559 y AASHTO T245.

El método Marshall se basa en el ensayo mecánico del mismo nombre. Consiste en la rotura de probetas cilíndricas de 101.6 mm. de diámetro y 63.5 mm. de altura a 60°C mediante la aplicación de una mordaza perimetral que ejerce una velocidad de deformación constante de 50.8 mm/min.

Su objetivo es determinar el contenido óptimo de asfalto que una mezcla densa requiere estableciendo un punto de equilibrio entre la durabilidad de la mezcla, que aumenta con el contenido de asfalto, y su estabilidad, que tras alcanzar un máximo descende con rapidez al aumentar dicho contenido de betún.

Se define como estabilidad Marshall a la carga de rotura de la probeta y como deformación o flujo Marshall al acortamiento diametral hasta el momento de rotura. Ambos valores son obtenidos de la curva que resulta al graficar la secuencia del ensayo.

Figura 1. Recopilación de información para el ensayo Marshall



2.2.1.1.1 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

2.2.1.1.1.1 Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma ASTM D1188, en caso contrario, se recurre a la norma ASTM D2726.

2.2.1.1.1.2 Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60^{\circ}+1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F}+ 1.8^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Con el equipo de prueba listo, se removerá el espécimen a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse con el valor de estabilidad Marshall. Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor del flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25mm (1/100") será el valor del flujo Marshall.

2.2.1.1.1.3 Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad vacío para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica del total del agregado se calcula de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la

gravidad específica del asfalto y la gravidad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

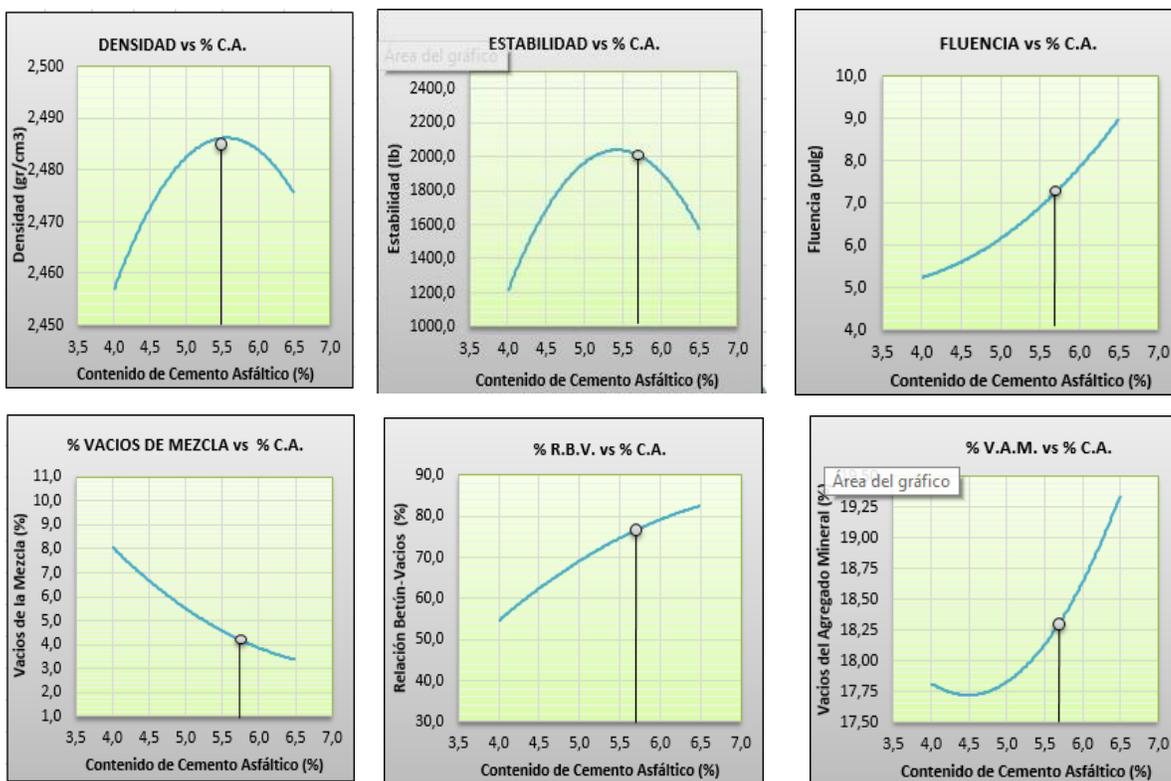
Con los datos obtenidos se dibujan las gráficas en las que se coloca, en las abscisas el porcentaje de asfalto y en las ordenadas la densidad aparente, la relación de vacíos, la estabilidad Marshall, el flujo y los vacíos del agregado mineral.

Se reporta como el contenido óptimo de asfalto al promedio del contenido de asfalto que le corresponden las mejores propiedades de densidad aparente, estabilidad Marshall y relación de vacíos en la mezcla.

Una ventaja del método Marshall es la peculiar atención que le da a la densidad y a los vacíos en la mezcla asfáltica. Este análisis asegura la apropiada proporción volumétrica de los componentes de la mezcla asfáltica lo que logra diseños durables. Otra ventaja es que requiere de equipos relativamente económicos y portables con lo que se logra un adecuado control de la calidad en campo.

Sin embargo, el método para la compactación de las probetas es criticado pues afirman no reproduce los procedimientos seguidos en la etapa de construcción del pavimento. Adicionalmente, la estimación de la resistencia al corte mediante la estabilidad Marshall tampoco refleja lo que ocurre en un pavimento real bajo tránsito. Las anteriores deficiencias del método pueden resultar en mezclas asfálticas propensas al ahuellamiento.

CURVAS MÉTODO MARSHALL
MUESTRA CON CEMENTO ASFÁLTICO 85/100
TEMPERATURA DE MEZCLADO 160 ° C



2.3 Método Universal de Caracterización de Ligantes (método UCL)

El método UCL ha sido desarrollado pensando en la caracterización de los ligantes desde el punto de vista de su utilización en carreteras. No se ha tenido en cuenta su consistencia, su composición, su viscosidad, sino aquellas características que están relacionadas con las propiedades que debe proporcionar el ligante a la mezcla para su adecuado comportamiento en el firme. Es decir, de un ligante bituminoso nos interesa:

- Su poder aglomerante. Cohesión que proporciona a la mezcla.
- Su fluencia/fragilidad. Susceptibilidad térmica. El comportamiento mecánico de los ligantes bituminosos varía con la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. A temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el ligante puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o

tiempos cortos de aplicaciones de carga, el ligante se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad.

- Su durabilidad/adhesividad. La acción del agua produce un efecto de desenvuelta, siendo muy importante conocer la adhesión del ligante al árido en presencia de agua (adhesividad).
- Su durabilidad/envejecimiento. Por acción del aire, del calor y de los rayos ultravioletas se va produciendo una oxidación y envejecimiento del ligante, haciéndose éste cada vez más duro y frágil.

Se basa en la aplicación de un único ensayo, el ensayo cántabro de pérdida por desgaste, capaz de caracterizar, de forma sencilla y precisa, las propiedades más importantes del ligante evaluadas sobre el producto que tendremos realmente en la práctica, ya en contacto con el árido después del mezclado y compactado, y no sobre el material original, que no ha experimentado calentamiento alguno.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado para valorar la cohesión de las mezclas bituminosas de granulometría abierta, siendo suficientemente sensible para detectar variaciones en el comportamiento de estas mezclas cuando se modifican los porcentajes de los materiales que las componen, adoptándose para la caracterización y dosificación de las mezclas porosas.

Así mismo, el ensayo cántabro de pérdida por desgaste se ha mostrado como un ensayo rápido, sencillo y suficientemente sensible, que permite evaluar las propiedades fundamentales de los ligantes: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y envejecimiento, así como las características del mástic filler betún.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste permite también valorar, de acuerdo con el procedimiento desarrollado, la adhesividad árido-ligante, así como la resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos por la acción de los rayos ultravioletas y los agentes atmosféricos: aire, calor, agua, etc. También empleado en la valoración de la calidad del mástic-filler-betún, permitiendo así comprobar el efecto beneficioso que puede tener el empleo de fillers especiales o la incorporación de fibras.

Se dio a este procedimiento el nombre de universal por ser aplicable a cualquier betún. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste consiste en introducir en el molino del ensayo de Los Ángeles una probeta Marshall y someterla al ensayo de desgaste sin ningún tipo de carga abrasiva. Durante el ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta, determinándose tras un número de revoluciones de 300, la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento, al peso inicial:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

Donde:

P_c = Pérdidas al Cántabro.

P_i = Peso inicial en gramos.

P_f = Peso final en gramos.

El ensayo cántabro, por ser un ensayo experimental, no determina ningún parámetro fundamental de la mezcla, como podría ser el ángulo de rozamiento, el módulo, etc., pero sí da una idea clara de la capacidad del ligante para mantener unidos los áridos en la mezcla, y cómo, cuando estas uniones son dúctiles y tenaces, las pérdidas son bajas, y cuando resultan frágiles o poco consistentes, las pérdidas aumentan. Cada aplicación de carga en el firme o cada vuelta en la máquina de Los Ángeles dan lugar a un proceso de deterioro. Hay una parte de esta energía de deterioro que es absorbida en la deformación elástica del material, otra parte se elimina en su deformación plástica y el resto es la que produce su fisuración o rotura. Las condiciones de ensayo de la probeta varían según la variable estudiada: susceptibilidad térmica, adhesividad o envejecimiento.

Se evalúan cuatro propiedades funcionales que los ligantes han de aportar al comportamiento de las mezclas bituminosas:

Cohesión - susceptibilidad térmica – adhesividad - resistencia al envejecimiento.

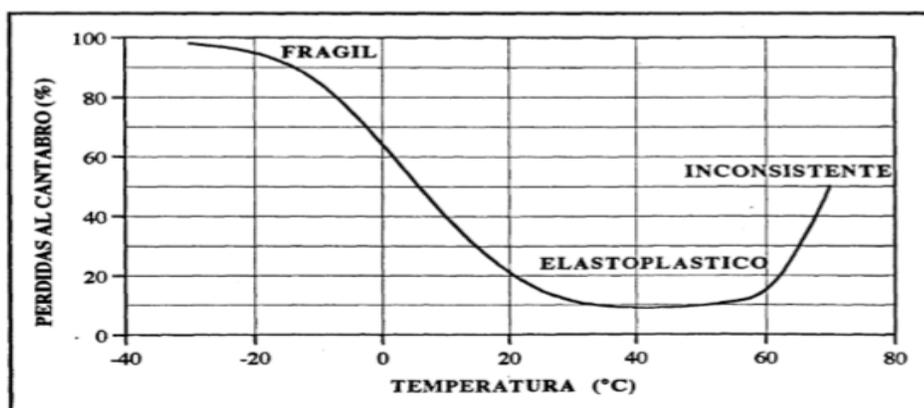
2.3.1 Cohesión/poder aglomerante

La cohesión de un ligante, su poder aglomerante, es lo que permite a la mezcla resistir los esfuerzos del tráfico.

2.3.2 Susceptibilidad térmica

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas, figura.

Figura 2. Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (Curvas de Estado)



Esta variación del comportamiento del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del ensayo cántabro de pérdida por desgaste. La determinación, en condiciones especiales, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, pone de manifiesto el comportamiento frágil del ligante, altas pérdidas al cántabro, su comportamiento elasto-plástico, pérdidas bajas al cántabro, y su inconsistencia, fuerte incremento de las pérdidas.

Mediante la determinación de la curva pérdidas al cántabro-temperatura (curva de estado) se puede evaluar la susceptibilidad térmica de un ligante y comprobar su comportamiento, diferenciando el comportamiento de los betunes modificados.

Si evaluamos la cohesión que un determinado ligante proporciona a una mezcla mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste, las pérdidas obtenidas dependerán de la temperatura a la que se realice el ensayo. La mayor o menor susceptibilidad térmica de un ligante hará que al variar la temperatura de ensayo obtengamos mayores o menores pérdidas, consecuencia de la mayor o menor cohesión que el ligante proporciona a la mezcla.

Esta idea nos indica la posibilidad de aplicar el ensayo cántabro de pérdida por desgaste para evaluar la variación del comportamiento del ligante con la temperatura, esto es, para valorar su susceptibilidad térmica.

Como es bien conocido, los ligantes bituminosos son materiales termoplásticos que presentan un intervalo de plasticidad reducido, comportándose a bajas temperaturas como productos frágiles y quebradizos, y a temperaturas moderadamente elevadas como productos viscosos.

Además de las propiedades plásticas, los ligantes bituminosos, dependiendo de su grado de pectización, presentan cierta elasticidad, relativamente pequeña en los betunes tipo sol y algo más pronunciado en el tipo gel. A temperaturas moderadamente elevadas esta elasticidad prácticamente desaparece, y el betún se deforma permanentemente y fluye.

Por lo tanto, al variar la temperatura, un mismo betún presenta características asimilables a las de un cuerpo frágil, elasto-plástico o viscoso. Esta variación del estado del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

2.3.3 Adhesividad

El procedimiento desarrollado se basa en determinar el incremento de las pérdidas en el ensayo cántabro tras un período de inmersión en agua de la probeta. Este periodo es de 24 horas a 60°C o de 4 días a 49°C. Es importante señalar que la granulometría de la

mezcla patrón es muy abierta, sin finos ni polvo mineral, con lo que el ensayo evalúa realmente la adhesividad del betún a las partículas del árido empleado.

2.3.4 Envejecimiento

El envejecimiento del ligante se hace directamente en la mezcla, en película fina, dada la alta porosidad de la granulometría empleada y la ausencia de finos y polvo mineral. Se introduce la probeta en una estufa de aire forzado a la temperatura de 80 ó 163°C, y se ensaya tras diferentes periodos de permanencia.

CAPÍTULO III
CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Desarrollo de la investigación

Para dar inicio al trabajo sobre el de análisis experimental sobre la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas, primeramente empezamos con la caracterización del material pétreo y el cemento asfáltico, de tal manera que estos cumplan con las especificaciones establecidas por norma. Posteriormente la fabricación de briquetas utilizando el método Marshall. Finalmente aplicando el método UCL mediante el ensayo cántabro.

3.2 Ubicación banco de materiales

3.2.1 Ubicación banco de agregados y cemento asfáltico

Los agregados y el cemento asfáltico utilizados en el presente proyecto son de la Empresa Constructora Erika Srl. en la ciudad de Tarija, Bolivia ubicado a Km. 8 carretera a San Lorenzo Zona: Rancho Sud

Imagen 3. Ubicación Empresa Constructora Erika SRL

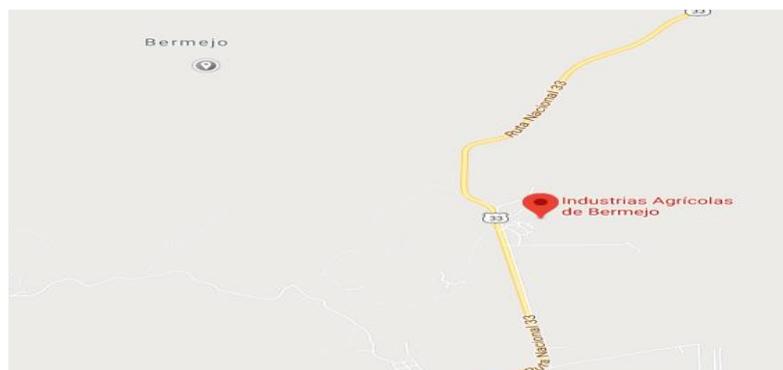


Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Ubicación banco de ceniza de celulosa

La ceniza de la caña de azúcar utilizada en el presente proyecto fue traída de Las Industrias Agrícolas de Bermejo S.A. - IABSA, que se encuentra a 190 kilómetros de la ciudad Capital. Ubicada en la localidad del mismo nombre, Bermejo, fronteriza con Argentina.

Imagen 4. Ubicación de Industrias Agrícolas de Bermejo S.A.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Ubicación de laboratorio

El presente trabajo se realizó en los laboratorios de nuestra U.A.J.M.S., ubicado en la zona El Tejar de la ciudad de Tarija.

3.4 Caracterización del material pétreo

3.4.1 Obtención de muestra

Siguiendo el procedimiento de la norma, del método para extraer y preparar muestras AASSHTO T2-91, se toma las muestras de tal manera que se verifica que tenga las características requeridas, tanto de material grueso y fino.

Por producto de la chancadora se pudo obtener material granular de 3/4'', 3/8 '' y también se obtuvo muestra de arena natural.

Imagen 5. Obtención de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Selección de material

Una vez realizado la toma de muestras, procedemos a realizar una verificación visual del estado de la misma, de manera que se obtuvo que vaciar las muestras en el laboratorio para realizar una buena distribución de las mismas para realizar los diferentes ensayos.

3.4.3 Caracterización de los agregados

Todo el detalle de la caracterización de los agregados se encuentra en anexos, en este capítulo solo se muestra los resultados y las imágenes del desarrollo de la práctica.

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

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de los áridos de diferentes tamaños.

Imagen 6. Tamizado mediante el equipo de ROP-TAP



Fuente: Elaboración propia.

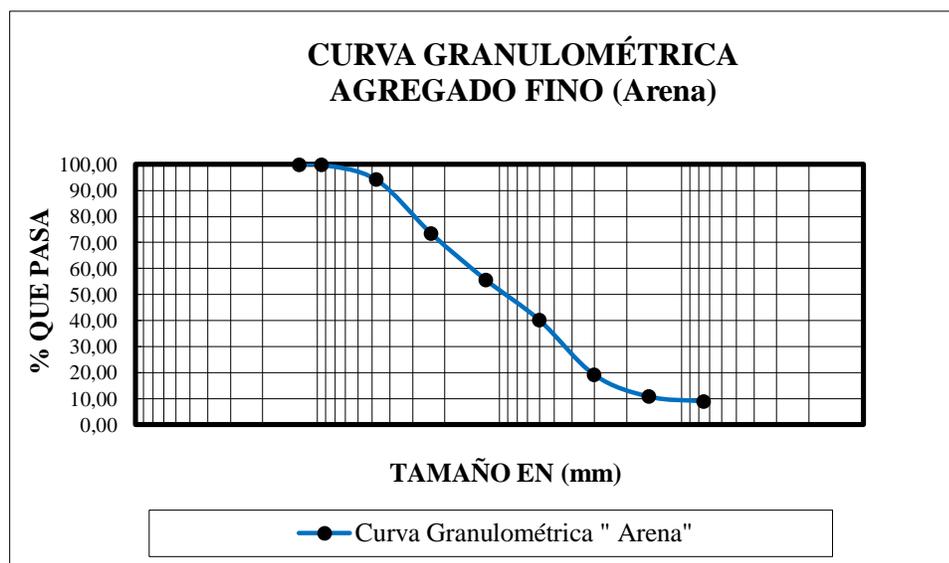
A continuación se presenta los resultados de la práctica de caracterización de los agregados grueso y fino.

Tabla 7. Granulometría agregado fino (Arena)

PESO TOTAL (gr.)		963,33			
TAMICES	TAMAÑO (mm)	PESO RET. RET.	RET. ACUM	% RET	% QUE PASA DEL TOTAL
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	54,89	54,89	5,70	94,30
N°8	2,36	200,24	255,13	26,48	73,52
N°16	1,18	172,09	427,22	44,35	55,65
N°30	0,60	149,01	576,23	59,82	40,18
N°50	0,30	202,08	778,31	80,79	19,21
N°100	0,15	119,62	897,93	89,21	10,79
N°200	0,075	23,98	921,91	91,00	9,00
BASE	-	21,60	943,51	97,94	2,06
SUMA		943,5			
PÉRDIDAS		19,8			
MF =		3,97			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 1. Curva granulométrica del agregado fino



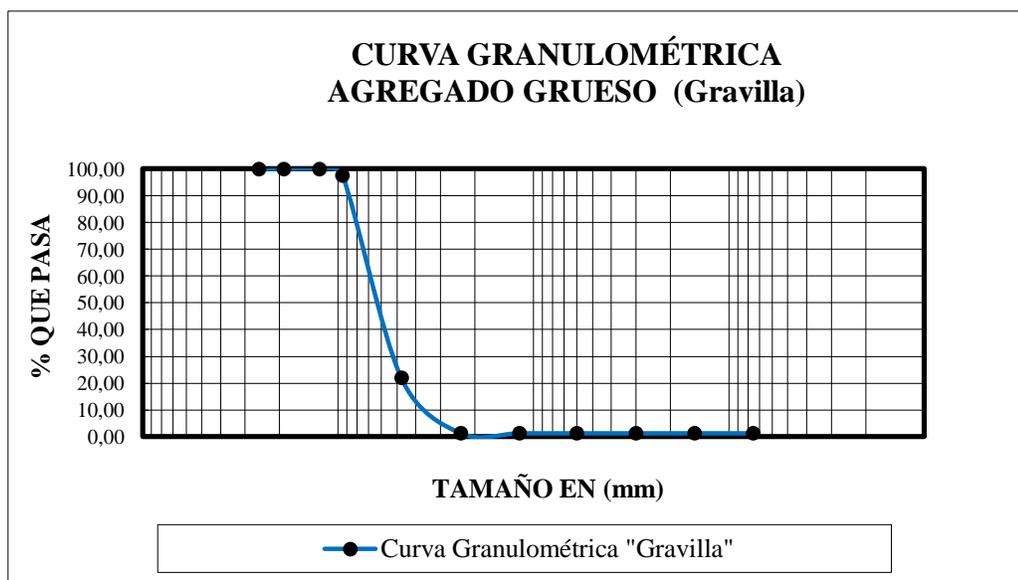
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Granulometría agregado grueso (Gravilla)

PESO TOTAL (gr.)			5000		
TAMICES	TAMAÑO (mm)	PESO RET.	RET. ACUM	% RET	% QUE PASA DEL TOTAL
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	2,50	2,50	0,05	99,95
3/8"	9,50	119,00	121,50	2,43	97,57
N°4	4,75	3780,00	3901,50	78,03	21,97
N°8	2,36	1034,00	4935,50	98,71	1,29
N°16	1,18	0,00	4935,50	98,71	1,29
N°30	0,60	0,00	4935,50	98,71	1,29
N°50	0,30	0,00	4935,50	98,71	1,29
N°100	0,15	0,00	4935,50	98,71	1,29
N°200	0,075	0,00	4935,50	98,71	1,29
BASE	-	64,20	4999,70	99,99	0,01
SUMA		4999,7			
PÉRDIDAS		0,3			
MF =		6,73			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2. Curva granulométrica agregado grueso (Gravilla)



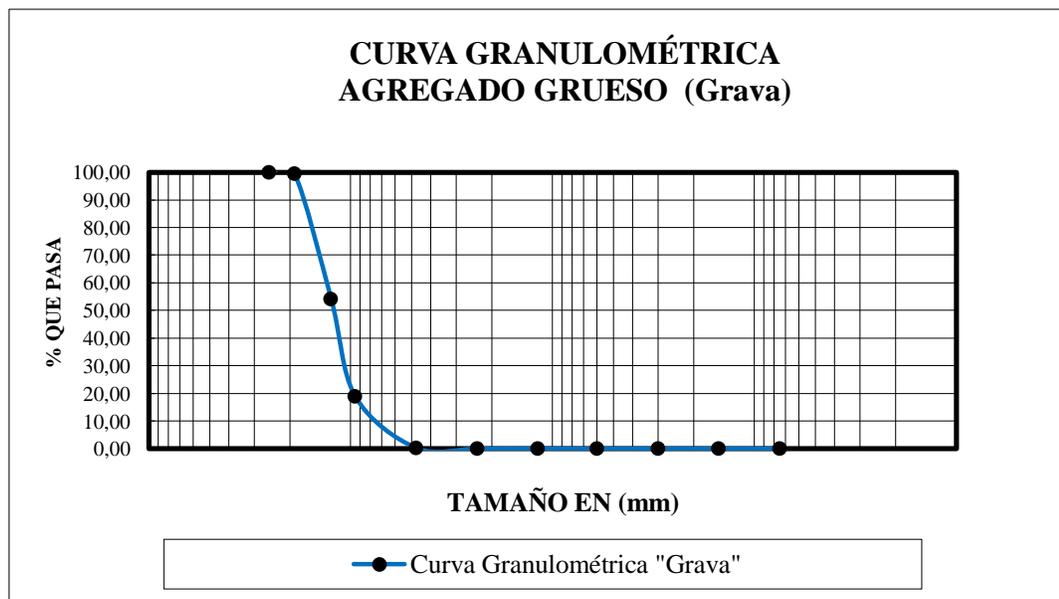
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Granulometría agregado grueso (Grava)

PESO TOTAL (gr.)			5000		
TAMICES	TAMAÑO (mm)	PESO RET.	RET. ACUM	% RET	% QUE PASA DEL TOTAL
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	27,00	27,00	0,54	99,46
1/2"	12,5	2260,00	2287,00	45,74	54,26
3/8"	9,50	1760,50	4047,50	80,95	19,05
N°4	4,75	931,20	4978,70	99,57	0,43
N°8	2,36	15,70	4994,40	99,89	0,11
N°16	1,18	0,00	4994,40	99,89	0,11
N°30	0,60	0,00	4994,40	99,89	0,11
N°50	0,30	0,00	4994,40	99,89	0,11
N°100	0,15	0,00	4994,40	99,89	0,11
N°200	0,075	0,00	4994,40	99,89	0,11
BASE	-	4,90	4999,30	99,99	0,01
SUMA		4999,3			
PÉRDIDAS		0,7			
MF =		7,80			

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 3. Curva granulométrica agregado grueso (Grava)



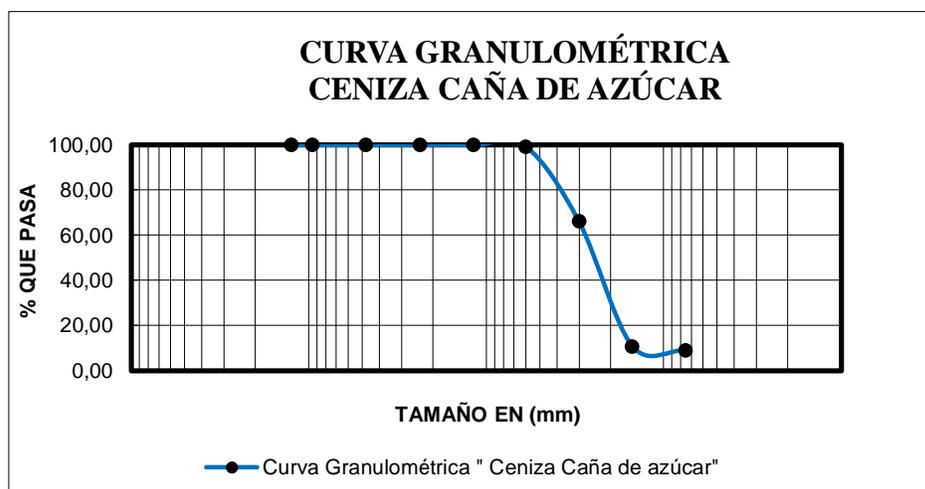
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Granulometría ceniza caña de azúcar

PESO TOTAL (gr.)		500			
TAMICES	TAMAÑO (mm)	PESO RET. RET.	RET. ACUM	% RET	% QUE PASA DEL TOTAL
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº8	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº16	1,18	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº30	0,60	3,35	3,35	0,67	99,33
Nº50	0,30	165,80	169,15	33,83	66,17
Nº100	0,15	182,00	351,15	89,21	10,79
Nº200	0,075	103,70	454,85	91,00	9,00
BASE	-	44,30	499,15	99,83	0,17
SUMA		499,2			
PÉRDIDAS		0,9			
MF =		2,15			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4. Curva granulométrica ceniza caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.2 Peso unitario de los agregados

Imagen 7. Peso unitario de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta los resultados de la práctica

Peso unitario de los agregados grueso y fino

Tabla 11. Peso Unitario agregado grueso (Grava)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm³)
1	1,38	1,51
2	1,36	1,53
3	1,38	1,54
PROMEDIO	1,37	1,52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Peso unitario agregado grueso (Gravilla)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm³)
1	1,39	1,52
2	1,39	1,53
3	1,39	1,54
PROMEDIO	1,39	1,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Peso unitario agregado fino (Arena)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm³)
1	1,42	1,50
2	1,43	1,52
3	1,44	1,54
PROMEDIO	1,43	1,52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Peso Unitario Ceniza Caña de azúcar

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm³)
1	1,025	1,160
2	1,026	1,162
3	1,028	1,163
PROMEDIO	1.03	1,16

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3 Peso específico de los agregados

3.4.3.3.1 Peso específico de los agregados grueso (Grava y gravilla)

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

Imagen 8. Agregados lavados y saturados con agua por 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 9. Agregado secado superficialmente



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 10. Obtención del peso sumergido en agua



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 11. Obtención del peso sumergido en agua



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la práctica:

Tabla 15. Peso específico agregado grueso (Grava)

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,65	2,70	2,79	1,87
2	2,65	2,70	2,79	1,96
3	2,65	2,70	2,79	1,91
PROMEDIO	2,65	2,70	2,79	1,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Peso específico agregado grueso (Gravilla)

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,59	2,67	2,80	2,93
2	2,59	2,67	2,81	3,00
3	2,59	2,67	2,82	3,07
PROMEDIO	2,59	2,67	2,81	3,00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3.2 Peso específico del agregado fino

Se realizó el ensayo según la norma, con tres muestras y se siguieron los pasos como se muestran a continuación:

Imagen 12. Muestra lavada y saturada en agua por 24 horas



Fuente: Elaboración Propia.

Imagen 13. Secado superficial con secadora



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 14. Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 15. Colocar en un matraz 500 gr de material, llenar agua y pesar



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 16. Sacar la muestra del matraz y dejar secar en el horno para posterior pesar



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 17. Peso específico agregado fino (Arena)

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,72	2,77	2,85	1,62
2	2,71	2,75	2,84	1,70
3	2,71	2,76	2,86	1,80
PROMEDIO	2,71	2,76	2,85	1,71

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.4 Ensayo de desgaste de Los Ángeles ASTM C-131

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Procedimiento del ensayo:

Imagen 17. Lavar y secar la muestra en el horno a una temperatura de 105-110 °C



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 18. Pesar los materiales retenidos en las cantidades del método que corresponden



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 19. Introducir la muestra y las cargas abrasivas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 20. Tamizar la muestra, para luego lavar y dejar en el horno a secar y pesar



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 18. Agregado grueso (Grava)

GRADACIÓN	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
B	5000	3892,8	22,14	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Agregado grueso (Gravilla)

GRADACIÓN	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
C	5000	3806,9	23,86	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Caracterización del cemento asfáltico

Todo el detalle de la caracterización del cemento asfáltico se encuentra en anexos, en este capítulo solo se muestra los resultados y las imágenes del desarrollo de la práctica

3.5.1 Ensayo de penetración

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos.

Procedimiento de la práctica:

Imagen 21. Colocar el betún en taras



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 22. Colocar las muestras en baño María a 25°C por 30 min.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 23. Realizando las lecturas



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 20. Ensayo de penetración

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							MÍNIMO	MÁXIMO
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm)	Lectura Nº1	mm.	92	94	98			
	Lectura Nº2		97	93	95			
	Lectura Nº3		91	99	92			
	Promedio		93	95	95	95	85	100

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Ensayo de ductilidad

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada.

Resultados de la práctica:

Tabla 21. Ensayo de ductilidad

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						MÍNIMO	MÁXIMO
Ductilidad a 25°C	cm.	115	105	107	109	>100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland

El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

Imagen 24. Muestra en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 25. Muestra en ensayo pasando la llama de fuego



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 22. Ensayo punto de inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						MÍNIMO	MÁXIMO
Punto de Inflamación	°C	280	290	295	288	>232	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola

Imagen 26. Engrasado de los anillos y base para evitar que se pegue



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 27. Verter el cemento asfáltico en los anillos



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 28. Poner los anillos en el poseedor y colocar hielo alrededor del vaso para poder bajar la temperatura hasta los 5° C.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 29. Colocar las guías centradoras y las bolas de acero. Luego calentar.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 30. Controlar la temperatura



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 23. Ensayo punto de ablandamiento

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						MÍNIMO	MÁXIMO
Punto de ablandamiento	°C	44,0	47,0	43,0	45	43	53

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Peso específico

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Imagen 31. Determinar el peso de los picnómetros vacíos



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 32. Calibrar y pesar cada picnómetro



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 33. Verter el cemento asfáltico en cada picnómetro



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 34. Llenar con agua destilada cada uno de los picnómetros



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 35. Dejar en baño maría por 30 minutos también en agua destilada sacar



Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la práctica:

Tabla 24. Ensayo peso específico

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						MÍNIMO	MÁXIMO
Peso Picnómetro	grs.	32,70	31,80	32,50			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	57,30	55,80	57,20			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	55,80	56,50	56,20			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62,80	62,30	62,90			
Peso Específico	grs./cm ³	1,02	1,00	1,01	1,01	1,00	1,05

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

El procedimiento es el mismo para los tipos de mezcla.

Imagen 36. Pesar los agregados, las cantidades necesarias



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 37. Calentar los agregados y mezclar



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 38. Introducir la mezcla a los moldes



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 39. Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 40. 18 Briquetas con filler del tamizado del agregado



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 41. 18 Briquetas con filler procedente de la caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

3.6.1 Determinación de la densidad, estabilidad y fluencia Marshall

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

- Determinación de la densidad

Imagen 42. Medir sus alturas y pesar en su estado seco al aire libre



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 43. Sumergir las briquetas en agua durante 5 min a 25 °C y pesar las briquetas saturadas con superficie seca.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 44. Determinar su peso sumergido en el agua



Fuente: Elaboración propia.

- Determinación de la estabilidad y fluencia

Imagen 45. Poner en baño María a 60°C por 35 min cada briqueta. Después colocar en la mordaza



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 46. Lectura de estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la planilla: Para las dos clases de mezclas, el desarrollo es el mismo. Lo único que cambia es el filler.

3.6.2 Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico.-

Se procede a realizar las curvas del método Marshall, todo el detalle y procedimiento que se realiza para la elaboración de la planilla Marshall se encuentra en anexos.

Para las dos clases de mezclas el procedimiento es el mismo, lo único que varía es el tipo de filler, las cantidades son las mismas:

Tabla 25. Porcentaje óptimo de cemento asfáltico sin ceniza

	ENSAYO	VALOR DE DISEÑO	% DE C.A.
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Estabilidad Marshall (Lb)	4661,23	5,71
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,44	5,51
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,72
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,64

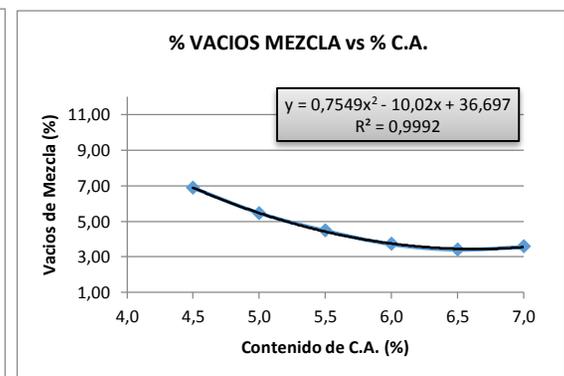
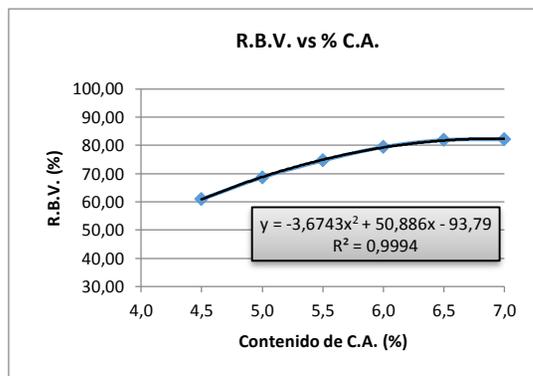
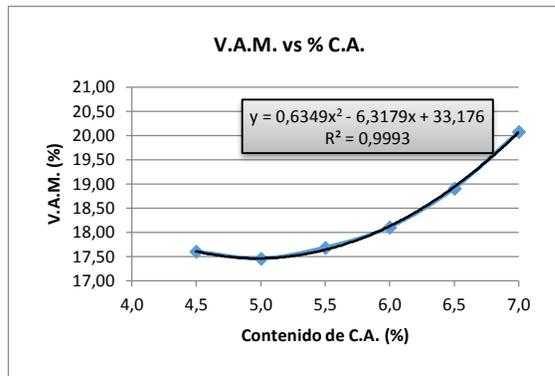
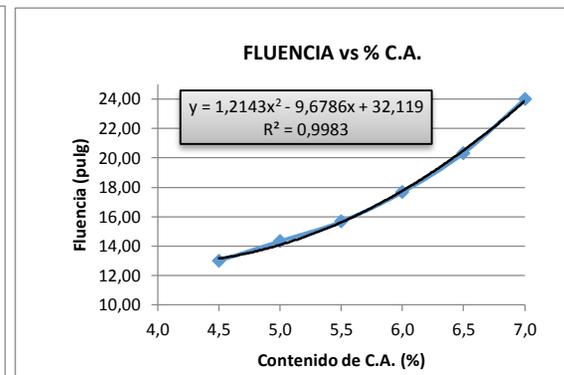
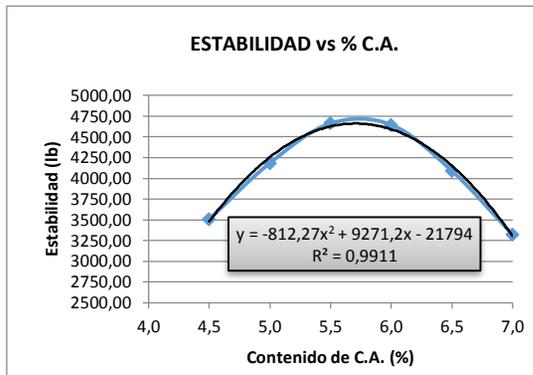
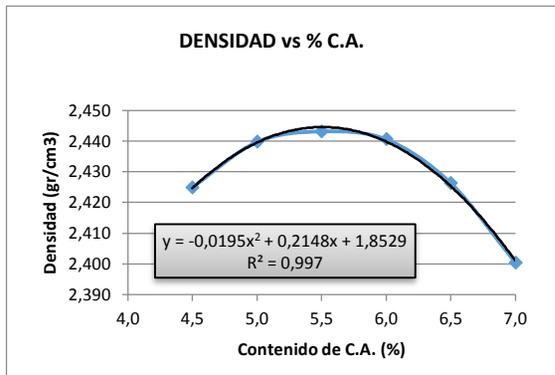
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Porcentaje óptimo de cemento asfáltico con ceniza

	ENSAYO	VALOR DE DISEÑO	% DE C.A.
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Estabilidad Marshall (Lb)	4894,20	6,33
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,44	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,45
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,79

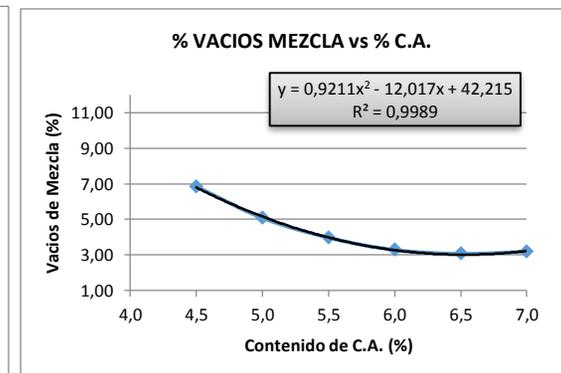
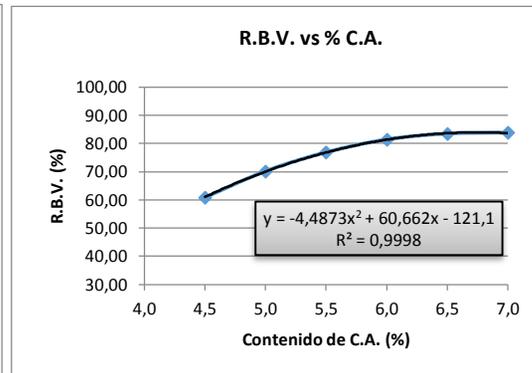
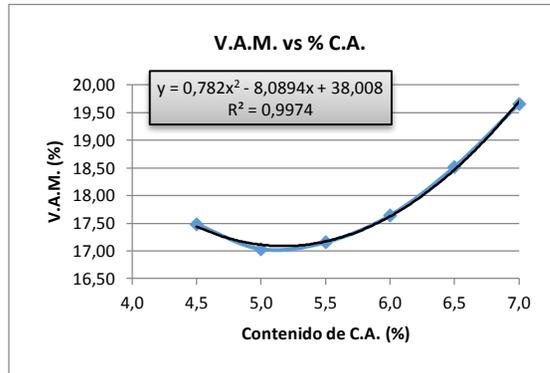
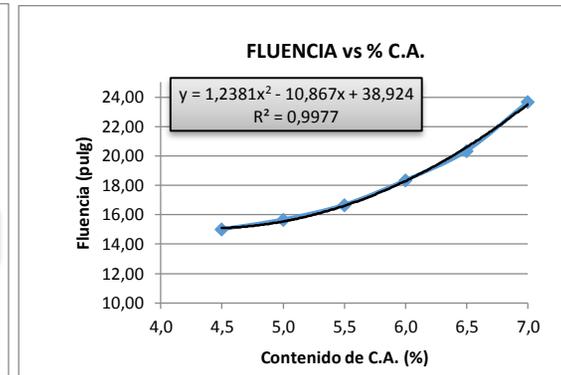
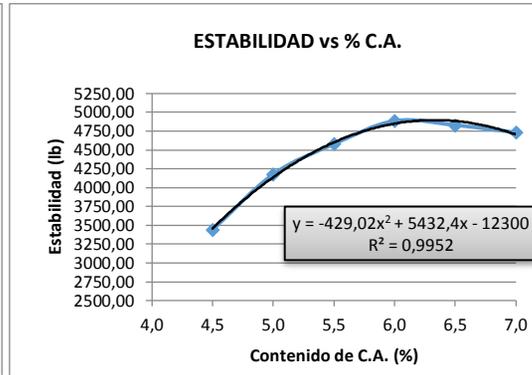
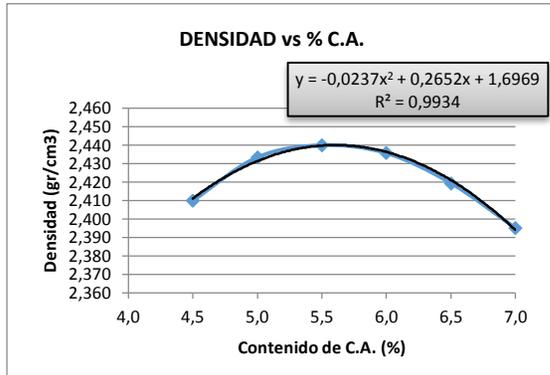
Fuente: Elaboración propia.

CURVAS MÉTODO MARSHALL PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia

**CURVAS MÉTODO MARSHALL CON CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR
PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO**



Fuente: Elaboración propia.

3.7 Método UCL

3.7.1 Diseño y preparación de las mezclas

Para realizar el análisis de la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas se fabricó 48 briquetas, de los cuales fueron diseñadas en 2 clases de 24 cada uno. La primera de las series corresponde a una mezcla sin adición de ceniza de celulosa en donde el filler utilizado es material de recuperación del tamizado del agregado, el polvo mineral. En la otra serie de probetas se sustituye totalmente el filler por la ceniza de la caña de azúcar.

Imagen 47. Briquetas con contenido óptimo para el método UCL



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Acondicionamiento de las muestras

Para realizar la evaluación de la susceptibilidad térmica de las mezclas, las briquetas son sometidas a la temperatura de 25 °C como nombra en el ensayo del cántabro, de ahí se hace variaciones de temperaturas de -10 °C y +10 °C, dando así temperaturas de: -5 °C, 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C, 60 °C y 80 °C. Para ello, previo al ensayo cántabro, cada una de las series de briquetas fabricadas se divide en 8 grupos de 3 briquetas. Estos grupos se mantienen durante 24 horas a la temperatura con la cual ingresarán al tambor de Los Ángeles que se encuentra a 25°C. Mediante esta metodología se consigue asemejar condiciones climáticas extremas de temperatura y temperaturas a las que pueden estar sometidas las mezclas asfálticas durante su vida útil.

Imagen 48. Briquetas a temperaturas de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Y $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 49. Briquetas en el horno



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 50. Briquetas en el horno a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 51. Briquetas en el horno a 35 °C durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 52. Briquetas en el horno a 45 °C durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 53. Briquetas en el horno a 60 °C durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 54. Briquetas en el horno a 60 °C durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Ensayo cántabro de pérdida por desgaste

Imagen 55. Máquina de abrasión Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 56. Briquetas en la máquina de Los Ángeles a 300 revoluciones



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 57. Briquetas saliendo de la máquina de Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Ensayo del cántabro (Filler natural –sin ceniza de celulosa)

Nº	TEMPERATURA ° C	PESO INICIAL Pi	PESO FINAL Pf	%DESGASTE	PROMEDIO %DESGASTE
1	-5	1191,50	1030,80	13,49	13,73
2	-5	1199,20	1034,70	13,72	
3	-5	1193,70	1026,80	13,98	
4	5	1182,80	1077,10	8,94	8,58
5	5	1196,80	1095,20	8,49	
6	5	1187,20	1088,50	8,31	
7	15	1192,40	1118,90	6,16	6,22
8	15	1193,50	1104,80	7,43	
9	15	1179,30	1119,60	5,06	
10	25	1189,70	1169,30	1,71	1,87
11	25	1192,10	1168,20	2,00	
12	25	1193,10	1170,60	1,89	
13	35	1194,10	1185,20	0,75	0,66
14	35	1194,90	1187,90	0,59	
15	35	1193,50	1185,70	0,65	
16	45	1193,50	1188,00	0,46	0,60
17	45	1184,30	1176,40	0,67	
18	45	1190,70	1182,70	0,67	
19	60	1191,20	1175,90	1,28	1,66
20	60	1196,40	1178,70	1,48	
21	60	1197,30	1170,70	2,22	
22	80	1195,60	980,40	36,67	36,64
23	80	1194,50	965,10	36,62	
24	80	1192,80	960,20	36,64	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Ensayo del cántabro (Filler ceniza de celulosa)

Nº	TEMPERATURA ° C	PESO INICIAL Pi	PESO FINAL Pf	%DESGASTE	PROMEDIO %DESGASTE
A	-5	1197,90	1017,60	15,05	15,91
B	-5	1198,10	988,20	17,52	
C	-5	1192,00	1011,40	15,15	
D	5	1194,40	1060,50	11,21	12,42
E	5	1195,20	1024,10	14,32	
F	5	1193,30	1053,30	11,73	
G	15	1193,20	1085,10	9,06	7,79
H	15	1187,90	1100,70	7,34	
I	15	1076,80	1001,90	6,96	
J	25	1197,90	1142,80	4,60	4,07
K	25	1193,10	1139,30	4,51	
L	25	1190,90	1154,00	3,10	
LL	35	1187,70	1160,20	2,32	2,08
M	35	1198,40	1167,80	2,55	
N	35	1197,90	1181,60	1,36	
O	45	1198,90	1167,50	2,62	2,13
P	45	1192,70	1170,10	1,89	
Q	45	1194,80	1172,30	1,88	
R	60	1194,90	1179,50	1,29	1,11
S	60	1196,50	1185,70	0,90	
T	60	1199,00	1185,20	1,15	
U	80	1196,40	985,80	30,78	30,75
V	80	1197,80	976,80	30,69	
W	80	1195,70	984,10	30,78	

Fuente: Elaboración propia.

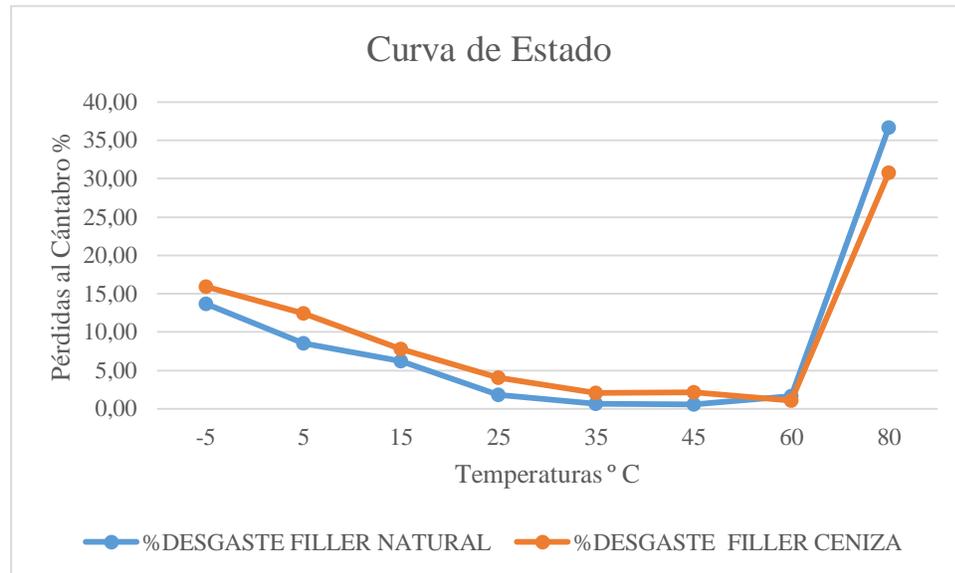
3.7.4 Curva de estado.

Tabla 29. Resultado de % desgaste de los dos tipos de mezclas

N°	TEMPERATURA ° C	% DESGASTE SIN CELULOSA	% DESGASTE CON CELULOSA
1	-5	13,73	15,91
2	5	8,58	12,42
3	15	6,22	7,79
4	25	1,87	4,07
5	35	0,66	2,08
6	45	0,60	2,13
7	60	1,66	1,11
8	80	36,64	30,75

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5. Curva de estado



Fuente: Elaboración propia.

3.8 Análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica

Se realiza el análisis de precios unitarios por metro cubico para la mezcla asfáltica que tiene el filler del agregado pétreo y para la mezcla que contiene la ceniza de celulosa como filler de aportación al mastico bituminoso.

El precio a tener en cuenta es el costo de producción, el cual es uno los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería civil, por lo tanto, mientras más eficiente sea, menor será la inversión de los recursos en la producción de la mezcla y por ende menor será la cuantía de los gastos.

A continuación se muestra la planilla de precios unitarios de las dos tipos de mezclas asfálticas. La primera que es la mezcla con el filler sin la ceniza de celulosa y la segunda sustituyendo totalmente el filler del agregado pétreo por la ceniza de celulosa.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO

Proyecto: Carpeta de concreto asfáltico con filler del agregado pétreo

Actividad: Colocado de Carpeta

Cantidad: 1,00

Unidad: m3

Moneda: Bolivianos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1.- MATERIALES				
Grava triturada 3/4"	m3	0,23	170,00	39,10
Grava triturada 3/8"	m3	0,23	170,00	39,10
Arena triturada	m3	0,45	190,00	85,50
Filler natural	m3	0,05	190,00	9,50
Cemento asfáltico	Kg	116,55	11,00	1282,05
Diesel	Lt	18,00	3,72	66,96
TOTAL MATERIALES				1522,21
2.- MANO DE OBRA				
Chofer	hr	0,0012	15,14	0,02
Operador de equipo pesado	hr	0,8201	23,28	19,09
Operador de equipo liviano	hr	0,0820	18,30	1,50
Operador en planta	hr	0,0900	23,28	2,10
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,0280	15,14	0,42
Capataz	hr	1,8000	22,60	40,68
Peón	hr	0,0720	11,98	0,86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64,67
BENEFICIOS SOCIALES=% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA		65,00%		42,04
IMPUESTOS AL VALOR AGREGADO= % DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES		14,94%		15,94
TOTAL MANO DE OBRA				122,65
3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Cargador frontal de ruedas	hr	0,00010	421,2900	0,04
Compactador rodillo liso autotrop	hr	0,03500	301,36	10,55
Escoba mecánica autopropulsado m2/hr	hr	0,02800	67,93	1,90
Planta de calentamiento de asfalto Tn	hr	0,09000	962,34	86,61
Compactador neumático	hr	0,08400	332,33	27,92
Terminadora de asfalto	hr	0,07500	669,34	50,20
Volqueta 12 m3	hr	0,00100	223,06	0,22
HERRAMIENTAS (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)		5,00%		3,23
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				180,68
4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (% DE 1+2+3)		24,00%		438,13
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				438,13
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD (% DE 1+2+3+4)		10,00%		226,367
TOTAL UTILIDAD				226,367
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO IT (% DE 1+2+3+4+5)		3,09%		76,9420
TOTAL IMPUESTOS				76,9420
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)				2566,97

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO

Proyecto: Carpeta de concreto asfáltico con filler de ceniza de celulosa

Actividad: Colocado de Carpeta

Cantidad: 1,00

Unidad: m3

Moneda: Bolivianos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1.- MATERIALES				
Grava triturada 3/4"	m3	0,23	170,00	39,10
Grava triturada 3/8"	m3	0,23	170,00	39,10
Arena triturada	m3	0,45	190,00	85,50
Filler natural	m3	0,05	220,00	11,00
Cemento asfáltico	Kg	116,55	11,00	1282,05
Diesel	Lt	18,00	3,72	66,96
TOTAL MATERIALES				1523,71
2.- MANO DE OBRA				
Chofer	hr	0,0012	15,14	0,02
Operador de equipo pesado	hr	0,8201	23,28	19,09
Operador de equipo liviano	hr	0,0820	18,30	1,50
Operador en planta	hr	0,0900	23,28	2,10
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,0280	15,14	0,42
Capataz	hr	1,8000	22,60	40,68
Peón	hr	0,0720	11,98	0,86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64,67
BENEFICIOS SOCIALES=% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA		65,00%		42,04
IMPUESTOS AL VALOR AGREGADO= % DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES		14,94%		15,94
TOTAL MANO DE OBRA				122,65
3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Cargador frontal de ruedas	hr	0,00010	421,2900	0,04
Compactador rodillo liso autotrop	hr	0,03500	301,36	10,55
Escoba mecánica autopropulsado m2/hr	hr	0,02800	67,93	1,90
Planta de calentamiento de asfalto Tn	hr	0,09000	962,34	86,61
Compactador neumático	hr	0,08400	332,33	27,92
Terminadora de asfalto	hr	0,07500	669,34	50,20
Volqueta 12 m3	hr	0,00100	223,06	0,22
HERRAMIENTAS (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)		5,00%		3,23
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				180,68
4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (% DE 1+2+3)		24,00%		438,49
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				438,49
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD (% DE 1+2+3+4)		10,00%		226,553
TOTAL UTILIDAD				226,553
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO IT (% DE 1+2+3+4+5)		3,09%		77,0052
TOTAL IMPUESTOS				77,0052
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)				2569,08

3.9 Análisis de resultados

En el análisis resultado primeramente está la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico, para ambos se hizo su caracterización.

Los resultados obtenidos están dentro de los límites establecidos, cumpliendo así los requisitos para poder fabricar las mezclas asfálticas.

El porcentaje óptimo de asfalto se determinó mediante el ensayo Marshall, con una energía de compactación de 75 golpes por cara.

Tabla 30. Dosificación de mezclas asfálticas en caliente

DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
TEMPERATURA DE MEZCLADO 160 °C

Peso Total de Briqueta (gr)	1200			Porcentaje de Briqueta	100%		
Ponderación de Grava (%)	25			Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%		
Ponderación de Gravilla (%)	25			Porcentaje de Agregado	Y=100 - X		
Ponderación de Arena (%)	45						
Ponderación de Filler (%)	5						
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)		4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)		95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *		54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *		286,50	285,00	283,50	282,00	280,50	279,00
Peso de Gravilla (gr) *		286,50	285,00	283,50	282,00	280,50	279,00
Peso de Arena (gr) *		515,70	513,00	510,30	507,60	504,90	502,20
Peso de Filler (gr) *		57,30	57,00	56,70	56,40	56,10	55,80
Peso total de la briqueta (gr) *		1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

El contenido óptimo de asfalto de diseño de la mezcla, se determina aplicando la metodología del ensayo Marshall. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos, aplicando herramientas Excel, sistema graficador, se realiza graficas que obedezcan, la tendencia más fiel posible a los puntos obtenidos en el ensayo.

Planilla de resultados Marshall-mezcla sin ceniza de celulosa

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,5	2,425	3505,90	13,00	6,88	60,92	17,60
5,0	2,440	4183,26	14,33	5,47	68,67	17,45
5,5	2,443	4661,82	15,67	4,48	74,66	17,68
6,0	2,440	4645,39	17,67	3,72	79,45	18,10
6,5	2,426	4090,56	20,33	3,41	81,94	18,91
7,0	2,401	3320,28	24,00	3,57	82,21	20,08
Media (X)	2,43	4067,87	17,50	4,59	74,64	18,30
Desviación estándar (S)	0,016	561,22	4,10	1,36	8,46	1,017
Rango Superior	2,401	3320,28	13,00	3,41	60,92	17,45
Rango Inferior	2,443	4661,82	24,00	6,88	82,21	20,08

Fuente: Elaboración propia.

Planilla de resultados Marshall-mezcla con ceniza de celulosa

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4,5	2,410	3438,58	15,00	6,83	60,92	17,49
5,0	2,433	4175,30	15,67	5,08	70,15	17,04
5,5	2,440	4577,29	16,67	3,98	76,82	17,16
6,0	2,436	4884,57	18,33	3,29	81,35	17,65
6,5	2,419	4828,84	20,33	3,08	83,40	18,52
7,0	2,395	4730,48	23,67	3,19	83,77	19,66
Media (X)	2,42	4439,18	18,28	4,24	76,07	17,92
Desviación estándar (S)	0,017	552,26	3,27	1,47	9,01	1,001
Rango Superior	2,395	3438,58	15,00	3,08	60,92	17,04
Rango Inferior	2,440	4884,57	23,67	6,83	83,77	19,66

- A partir de la curva de estabilidad Vs % de asfalto, se determina el valor máximo de estabilidad y con esta se determina el primer valor de % de asfalto para las dos tipos de mezclas igual a 5,71 % y 6,33 %.
- En la curva de densidad Vs % de asfalto, se determina el valor máximo de densidad y se determina el segundo % de asfalto para las dos tipos de mezclas igual a 5,51 % y 5,59 %.
- En la curva de vacíos de la mezcla Vs % de asfalto. Se determina el tercer valor de % de asfalto para las dos tipos de mezclas igual a 5,72 % y 5,45 %.

Tabla 23. Porcentaje óptimo de cemento asfáltico sin celulosa

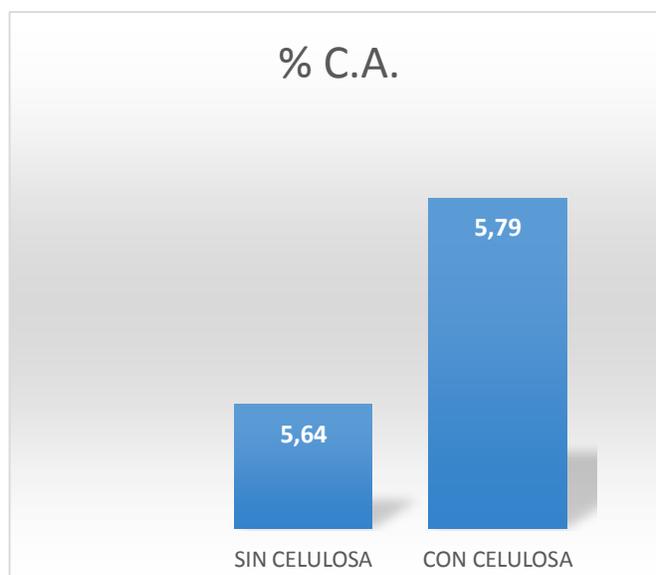
	ENSAYO	VALOR DE DISEÑO	% DE C.A.
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Estabilidad Marshall (Lb)	4661,23	5,71
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,44	5,51
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,72
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Porcentaje óptimo de cemento asfáltico con celulosa

	ENSAYO	VALOR DE DISEÑO	% DE C.A.
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Estabilidad Marshall (Lb)	4894,20	6,33
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,44	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,45
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,79

Fuente: Elaboración propia.



Con los tres valores de % de asfalto obtenidos de las tres graficas anteriores se realiza un promedio aritmético igual a 5,64 % para la mezcla con filler natural y 5,79 % para la mezcla con filler de ceniza de caña de azúcar. Valor que es aceptable en el diseño de mezclas asfálticas.

Los resultados obtenidos en el ensayo al cántabro son los siguientes.

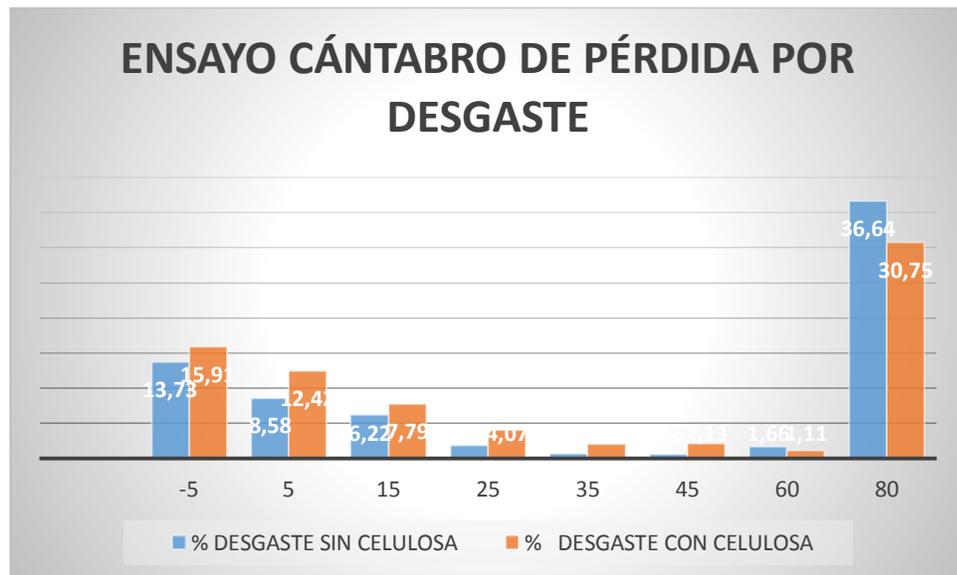
Tabla 29. Resultado de % desgaste de los dos tipos de mezclas

Nº	TEMPERATURA ° C	% DESGASTE SIN CELULOSA	% DESGASTE CON CELULOSA
1	-5	13,73	15,91
2	5	8,58	12,42
3	15	6,22	7,79
4	25	1,87	4,07
5	35	0,66	2,08
6	45	0,60	2,13
7	60	1,66	1,11
8	80	36,64	30,75

Fuente: Elaboración propia.



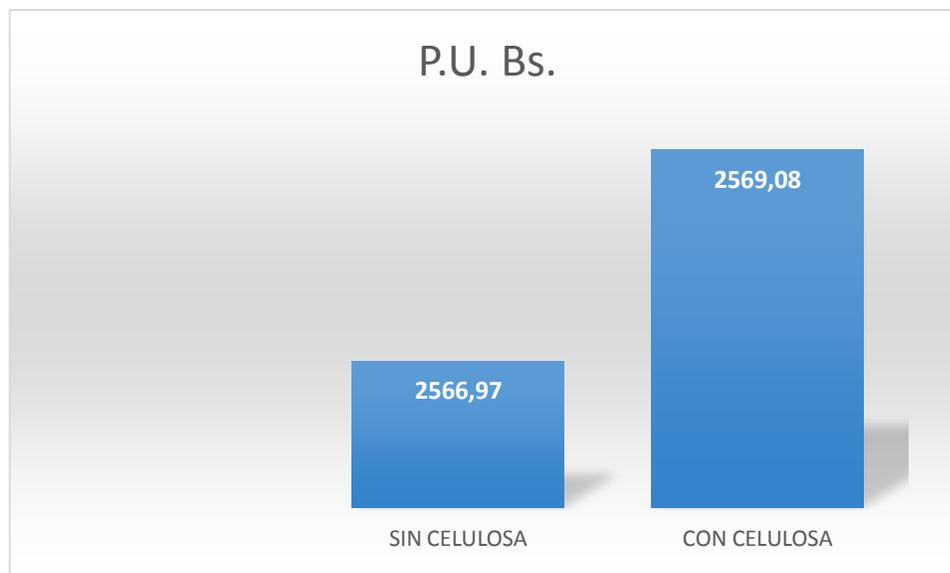
Al momento de sacar las briquetas de la máquina de los Ángeles se pudo observar que las briquetas sometidas a temperaturas frías salían con polvo, y las sometidas a temperaturas calientes, el cemento asfáltico se pegaba en las paredes de la máquina.



En la gráfica se observa como es el comportamiento de cada mezcla sometiéndola a diferentes temperaturas, se observa claramente el % de desgaste.

A bajas temperaturas se observa que existe mayor perdida en las mezclas fabricadas con ceniza de celulosa, a temperaturas medias ambas temperaturas se comportan similar, pero si existe un aumento con la ceniza de celulosa, pero se ve el cambio al aumentar la temperatura, siendo menor la pérdida para las que tienen celulosa.

Por ultimo un análisis de costo de las tipos de mezclas



Se tiene dos precios, para la primera mezcla sin ceniza de celulosa un precio unitario por metro cubico es de Bs. 2566.97, y para la segunda mezcla con la adición de la celulosa un precio unitario por metro cubico de Bs. 2569.08, este último es la variación ya que incluye el precio de transporte, que varía de acuerdo al lugar donde se encuentra la ceniza de celulosa, en este caso se encuentra en la ciudad de Bermejo, más propiamente del ingenio azucarero. La variación del precio no es tan significativa solo varia Bs. 2,11.

CAPITULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En el presente trabajo se han cumplido con los objetivos planteados debido a que se llega a obtener resultados que nos permite comprobar susceptibilidad térmica de dos mezclas asfálticas mediante el método UCL mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.
- En síntesis general se obtuvieron resultados comparativos que nos muestran ciertas propiedades y características de las dos mezclas asfálticas que es la el filler natural y la del filler de ceniza de celulosa.
- Se elaboraron briquetas mediante el método Marshall. Estableciendo el C.A. para cada una de las mezclas y éstas cumplen con los parámetros fijados por la normativa la cual dio como el contenido optimo del 5.6 % para la mezcla sin la celulosa, y el 5.79 % para la mezcla con la adición de la ceniza de celulosa.
- La adición de ceniza de celulosa como material de relleno en el mástico bituminoso ofrece respuestas similares a las mezclas fabricadas con filler de la misma naturaleza que el material granular.
- Si bien, los resultados obtenidos sobre las pérdidas al cántabro para las mezclas con adición de ceniza bajo condiciones variables de temperatura son bastante prometedores, no se logra obtener aun un desempeño que iguale a las mezclas fabricadas con filler natural bajo estas condiciones.
- Las mezclas que contenían ceniza presentaron para todo el rango de temperaturas analizadas un comportamiento similar e incluso mejor en algunos casos que la mezcla sin ceniza, en particular a elevadas temperaturas de 60 °C Y 80 °C, estas serían de gran importancia de utilizar para mejorar las capacidades cohesivas y de baja susceptibilidad térmica de las mezclas.
- En el análisis de precios unitarios se obtuvo para la primera mezcla sin ceniza de celulosa un precio unitario por metro cubico es de Bs. 2566.97, y para la segunda mezcla con la adición de la celulosa un precio unitario por metro cubico de Bs. 2569.08

4.2 Recomendaciones

- Realizar el mezclado de los agregados y el cemento asfáltico de la manera más homogénea posible para evitar la variabilidad de los resultados de la mezcla en distintos ensayos que se realicen para la investigación.
- Anticiparse al comportamiento de los materiales bajo ciertas condiciones de esfuerzos e intemperismo es la clave para saber qué tan buena puede ser la respuesta de estos en una función específica dentro de una determinada obra.
- En cualquier proyecto el ingeniero civil está en la obligación de realizar todos los estudios necesarios para determinar las propiedades y características de los materiales que se van a utilizar, ya que de esta manera se pueden optimizar costos, conservando la estética adecuada y sobre todo mantener el más alto grado de seguridad para los usuarios.
- El método valora el comportamiento de los cementos asfálticos como parte integrante de la mezcla asfáltica, mediante la evaluación de sus propiedades fundamentales a través del ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste.
- Los resultados de esta investigación deben ser sin duda la puerta de entrada a futuras líneas de investigación en donde se debe analizar el comportamiento de la ceniza bajo distintas condiciones de servicio para determinar su adecuada utilización en la Ingeniería Vial.