



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas
en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero(a) Civil

AUTORES

Aliaga Quispe, Yefferson
ORCID: 0009-0006-1641-4015

Bautista Molina, Estefany Lesley
ORCID: 0000-0002-5533-4142

ASESOR

Huaman Guerrero, Nestor Wilfredo
ORCID: 0000-0002-7722-8711

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de los autores

Aliaga Quispe, Yefferson

DNI: 74967617

Bautista Molina, Estefany Lesley

DNI: 74812477

Datos de asesor

Huaman Guerrero, Nestor Wilfredo

DNI: 10281360

Datos del jurado

JURADO 1

Davila Fernandez, Susana Irene

DNI: 09147106

ORCID: 0000-0002-6949-1317

JURADO 2

Arevalo Lay, Victor Eleuterio

DNI: 04434662

ORCID: 0000-0002-2518-8201

JURADO 3

Tamara Rodriguez, Joaquin Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Aliaga Quispe Yefferson, con código de estudiante N°201810512, con DNI N°74967617, con domicilio en Av. Circunvalación 2641 (Referencia: Frente al mercado modelo de frutas, distrito San Luis, provincia y departamento de Lima-Lima, y Bautista Molina Estefany Lesley, con código de estudiante N° 201810492, con DNI N° 74812477, con domicilio en PJ Jesus Tamayo Diaz Mz. B Lt. 8A, distrito San Juan de Miraflores, provincia y departamento de Lima - Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

La presente tesis titulada: “Uso de ceniza de Bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas”

es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente M.Sc.Ing. Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc.; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 20 % de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumimos responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 19 de octubre de 2023



Aliaga Quispe Yefferson
DNI N°74967617



Bautista Molina Estefany Lesley
DNI N°74812477

INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN

Uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas
asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus
propiedades mecánicas

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	5%	8%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
2	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.uptc.edu.co Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
7	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repository.unipiloto.edu.co Fuente de Internet	<1%



Dra. Vargas Chang Esther Joni

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por bendecirme con una familia maravillosa, y por guiarme día a día en mi formación profesional. A mi asesor y a los docentes quienes me han impartido sus sabios conocimientos. A mis compañeros de pregrado, quienes siempre demostraron su amistad a lo largo de todo este tiempo.

Yefferson Aliaga Quispe

A Dios, por guiar mis pasos y permitirme llegar hasta este punto de mi vida. A mis padres, abuelos y tíos por apoyarme moralmente y ayudarme en los momentos que más necesitaba. Y a Jorge, por estar a mi lado dándome su apoyo constante.

Estefany Lesley Bautista Molina

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, por darnos fuerzas y motivarnos cada día.

A nuestra Universidad Ricardo Palma por todos los valores y conocimientos proporcionados a lo largo de la tesis.

A nuestro asesor M.Sc.Ing. Néstor Huamán por su apoyo a lo largo de esta investigación.

A la empresa SEOING E.I.R.L. por habernos facilitado los materiales y los equipos necesarios para poder realizar los ensayos.

Y a cada una de las personas que fueron parte de la realización de este proyecto de tesis.

Yefferson Aliaga y Estefany Bautista

ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos.....	2
1.1.1. Descripción del problema.....	2
1.1.2. Problema general.....	2
1.1.3. Problemas específicos	3
1.2. Objetivo general y específicos.....	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Delimitación de la investigación: Temporal, espacial y temática	3
1.3.1. Delimitación temporal.....	3
1.3.2. Delimitación espacial	3
1.3.3. Delimitación temática.....	3
1.4. Justificación e importancia	4
1.4.1. Justificación.....	4
1.4.2. Importancia.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes del estudio de investigación	5
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema	7
2.2.1. Investigaciones internacionales	7
2.2.2. Investigaciones nacionales.....	8
2.3. Bases teóricas vinculadas a las variables de estudio.....	9

2.3.1. Pavimento asfáltico.....	9
2.3.2. Mezclas asfálticas en caliente	13
2.3.3. Cemento asfáltico de petróleo (CAP)	16
2.3.4. Agregados pétreos – Filler	21
2.3.5. Ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA)	23
2.3.6. Metodología Marshall para el diseño de la MAC.....	28
2.4. Definición de términos básicos.....	30
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS.....	31
3.1. Hipótesis General.....	31
3.2. Hipótesis Específicas	31
3.3. Relación entre variables.....	31
3.3.1. Identificación de variables	31
3.3.2. Operacionalización de variables	31
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	33
4.1. Tipo y método de investigación.....	33
4.1.1. Método de investigación.....	33
4.1.2. Orientación de investigación	33
4.1.3. Enfoque de investigación.....	33
4.1.4. Fuente de información	33
4.2. Tipo de investigación.....	33
4.3. Nivel de investigación	33
4.4. Diseño de la investigación	33
4.5. Población de estudio	34
4.6. Diseño muestral	34
4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	34
4.8. Procedimiento para la recolección de datos.....	34
4.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	42
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA	
INVESTIGACIÓN	43
5.1. Recolección de datos	43
5.1.1. Agregados pétreos.....	43
5.1.2. CAP - Cemento asfáltico de petróleo	43
5.1.3. Ceniza de bagazo de caña de azúcar	44
5.1.4. Mezclas asfálticas en caliente	46

5.2. Procesamiento de datos.....	48
5.2.1. Ensayos de las MAC por el método Marshall	48
5.3. Resultados de los ensayos.....	50
5.3.1. Mezcla asfáltica en caliente convencional.....	50
5.3.2. Mezcla asfáltica en caliente con ceniza	53
5.4. Análisis y discusión de resultados	68
5.4.1. Comportamiento de la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica con CBCA.....	68
5.4.2. Porcentaje adecuado de ceniza de bagazo de caña de azúcar	72
5.4.3. MAC convencional y MAC modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar.....	78
5.5. Contrastación de hipótesis	81
5.5.1. Hipótesis específica 1	81
5.5.2. Hipótesis específica 2	83
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS.....	87
ANEXOS	91
Anexo A: Matriz de consistencia.....	91
Anexo B: Tamizado de los agregados pétreos y de la ceniza.....	92
Anexo C: Medición de cantidades de los agregados	92
Anexo D: Introducción de la ceniza de bagazo de caña de azúcar a la muestra.....	92
Anexo E: Peso siendo controlado para la adición del asfalto	93
Anexo F: Cemento asfáltico de petróleo en la muestra	93
Anexo G: Mezclado de las muestras.....	93
Anexo H: Muestras siendo compactadas	94
Anexo I: Especímenes compactados.....	94
Anexo J: Especímenes extraídos de los moldes.....	94
Anexo K: Informe de ensayo del asfalto PEN 60/70.....	95
Anexo L: Reporte de análisis del asfalto PEN 60/70.....	96
Anexo M: Ensayos de laboratorio del agregado fino	97
Anexo N: Ensayos de laboratorio del agregado grueso.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Histórico de investigaciones de la variable	6
Tabla 2 Gradaciones de las mezclas asfálticas en caliente	14
Tabla 3 Ensayos del agregado grueso	21
Tabla 4 Ensayos del agregado fino	22
Tabla 5 Porcentajes promedios de la composición química del tallo	25
Tabla 6 Parámetros de diseño según el tipo de tráfico	29
Tabla 7 Especificaciones para el VMA	30
Tabla 8 Matriz de operacionalización de variables	32
Tabla 9 Características del cemento asfáltico de petróleo	44
Tabla 10 Datos obtenidos de los ensayos de pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras de mac convencional.....	50
Tabla 11 Pesos específicos aparentes de cada briqueta convencional.....	51
Tabla 12 Resultados de los pesos específicos aparentes y pesos unitarios promedios de las muestras de mac convencional.....	51
Tabla 13 Pesos específicos teóricos máximos de las muestras de mac convencional....	52
Tabla 14 Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras de mac convencional....	52
Tabla 15 Resultados generales de la mezcla convencional	53
Tabla 16 Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 0.5% de ceniza.....	53
Tabla 17 Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 0.5% de ceniza.....	54
Tabla 18 Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 1.0% de ceniza.....	54
Tabla 19 Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 1.0% de ceniza.....	55
Tabla 20 Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 1.5% de ceniza.....	55
Tabla 21 Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 1.5% de ceniza.....	56
Tabla 22 Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 0.5% de ceniza	56
Tabla 23 Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 1.0% de ceniza	58
Tabla 24 Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 1.5% de ceniza	59
Tabla 25 Estabilidad y flujo con respecto al porcentaje de asfalto para un % CBCA....	61
Tabla 26 Estabilidad y flujo con respecto al porcentaje de ceniza para un %CAP	61
Tabla 27 Resultados generales de la mezcla con 0.5% ceniza	67

Tabla 28 Resultados generales de la mezcla con 1.0% ceniza	67
Tabla 29 Resultados generales de la mezcla con 1.5% ceniza	67
Tabla 30 Resultados generales de las mezclas modificadas para 0.5%, 1.0% y 1.5% de ceniza	74
Tabla 31 Resultados comparativos de la mezcla asfáltica convencional con la modificada.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Capas que conforman el pavimento asfáltico.....	10
Figura 2 Representación de los esfuerzos comprensionales.....	11
Figura 3 Representación de los esfuerzos tensionales.....	12
Figura 4 Esfuerzos comprensionales y tensionales de un pavimento asfáltico.....	13
Figura 5 Refinería del petróleo.....	17
Figura 6 Composición química del asfalto.....	18
Figura 7 Variación de consistencia (viscosidad) del asfalto.....	19
Figura 8 Cultivo de caña de azúcar.....	23
Figura 9 Tipos de tallos de la caña de azúcar.....	24
Figura 10 Estructura del tallo de la caña de azúcar.....	25
Figura 11 Derivados de la caña de azúcar.....	26
Figura 12 La ceniza a través de diferentes grados de temperatura.....	27
Figura 13 Representación del VMA en una briqueta de mezcla asfáltica compactada..	28
Figura 14 Granulometría para la mezcla asfáltica convencional.....	35
Figura 15 Curva granulométrica de la mezcla asfáltica convencional.....	35
Figura 16 Granulometría de la mezcla asfáltica con 0.5% de CBCA.....	36
Figura 17 Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 0.5% de CBCA.....	36
Figura 18 Granulometría de la mezcla asfáltica con 1.0% de CBCA.....	37
Figura 19 Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 1.0% de CBCA.....	37
Figura 20 Granulometría de la mezcla asfáltica con 1.5% de CBCA.....	38
Figura 21 Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 1.5% de CBCA.....	38
Figura 22 Briquetas compactadas convencionales.....	39
Figura 23 Briquetas compactadas modificadas con 0.5% CBCA.....	40
Figura 24 Briquetas compactadas modificadas con 1.0% CBCA.....	40
Figura 25 Briquetas compactadas modificadas con 1.5% CBCA.....	41
Figura 26 Agregados pétreos tamizados y usados para las mezclas asfálticas.....	43
Figura 27 Colocación del Bagazo de caña de azúcar en horno.....	45
Figura 28 Ceniza de bagazo de caña de azúcar obtenido.....	45
Figura 29 Granulometría de bagazo de caña de azúcar.....	46
Figura 30 Briquetas de mezcla asfáltica patrón.....	47
Figura 31 Briquetas de mezcla asfáltica en caliente con ceniza.....	47
Figura 32 Ensayo de densidad Bulk.....	48

Figura 33 Ensayo Rice	49
Figura 34 Briquetas puestas en baño maría	49
Figura 35 Ensayo de Estabilidad y flujo en las muestras	50
Figura 36 Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 0.5% CBCA	57
Figura 37 Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 0.5% CBCA	57
Figura 38 Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 1.0% CBCA	58
Figura 39 Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 1.0% CBCA	59
Figura 40 Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 1.5% CBCA	60
Figura 41 Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 1.5% CBCA	60
Figura 42 Gráfica de la estabilidad con respecto al % CBCA para un 5% CAP	62
Figura 43 Gráfica del flujo con respecto al % CBCA para un 5% CAP	62
Figura 44 Gráfica de la estabilidad con respecto al % CBCA para un 5.5% CAP	63
Figura 45 Gráfica del flujo con respecto al % CBCA para un 5.5% CAP	63
Figura 46 Gráfica de la estabilidad de acuerdo al % CBCA para un 6% CAP	64
Figura 47 Gráfica del flujo de acuerdo al % CBCA para un 6% CAP	64
Figura 48 Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP	69
Figura 49 Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP	70
Figura 50 Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP	71
Figura 51 Gráfica del flujo de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP	72
Figura 52 Gráfica de la estabilidad de muestras con CBCA para diferentes contenidos de asfalto	73
Figura 53 Gráfica de la estabilidad de muestras con CBCA para diferentes contenidos de asfalto	74
Figura 54 Estabilidad con 5.3% de CAP para los tres porcentajes de CBCA (0.5%, 1% y 1.5%)	75
Figura 55 Flujo con 5.3% de CAP para los tres porcentajes de CBCA (0.5%, 1% y 1.5%)	76

Figura 56 Relación entre el % vacíos y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar...	77
Figura 57 Relación entre la estabilidad y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar .	77
Figura 58 Relación entre el flujo y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar	78
Figura 59 Gráfica comparativa de estabilidad de la MAC convencional vs. MAC con 1% CBCA.....	79
Figura 60 Gráfica comparativa del flujo de la MAC convencional vs. MAC con 1% CBCA.....	80
Figura 61 Resultados estadísticos descriptivos de la estabilidad.....	81
Figura 62 Gráfica de la estabilidad media para cada uno de los tipos de muestra	82
Figura 63 Resultados estadísticos anova de la estabilidad	82
Figura 64 Resultados estadísticos descriptivos del flujo	83
Figura 65 Gráfica de la media del flujo para cada uno de los tipos de muestra	84
Figura 66 Resultados estadísticos anova del flujo	84

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas en la región de Lima a través de la metodología Marshall. Fue un diseño de metodología experimental, ya que los resultados se obtuvieron a través de ensayos de laboratorios, y se realizaron más de una medición para realizar comparativas y obtener los resultados. Se elaboraron 36 briquetas que fueron sometidas a las pruebas de laboratorio, 9 de ellas son de mezclas asfálticas convencionales con porcentajes de cemento asfáltico de 5%, 5.5% y 6%, las otras 27 briquetas de mezclas asfálticas modificadas con 0.5%, 1% y 1.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar para cementos asfálticos de 5%, 5.5% y 6%.

Como resultados, las mezclas asfálticas al modificarse tienden a tener un mejor comportamiento y utilizarse un menor contenido de asfalto que las mezclas convencionales, en caso del % vacíos disminuye un 20% al utilizarse la ceniza. En el flujo, la MAC modificada con ceniza de bagazo de la caña de azúcar no tuvo mucha variación, ya que solo aumentó en un 3% con respecto a la convencional; por último, la estabilidad aumentó un 10.6% en la mezclas modificadas. Por lo que se concluyó que la adición del 1.0% de ceniza de bagazo de caña de azúcar contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente para carreteras de la región de Lima, ya que posee un comportamiento puzolánico generando mayor durabilidad y resistencia a la tracción.

Palabras clave: Propiedades mecánicas, estabilidad, fluencia, metodología Marshall.

ABSTRACT

The objective of this research work was to determine the percentage of sugarcane bagasse ash in hot asphalt mixtures for the improvement of their mechanical properties in the Lima region through the Marshall methodology.

It was an experimental methodology design, since the results were obtained through laboratory tests, and more than one measurement was carried out to make comparisons and obtain the results. 36 briquettes were made that were subjected to laboratory tests, 9 of them are conventional asphalt mixtures with asphalt cement percentages of 5%, 5.5% and 6%, the other 27 briquettes are modified asphalt mixtures with 0.5%, 1% and 1.5% sugar cane bagasse ash for 5%, 5.5% and 6% asphalt cements.

As a result, asphalt mixtures when modified tend to have better behavior and use a lower asphalt content than conventional mixtures; in the case of empty % it decreases by 20% when ash is used. In the flow, the MAC modified with sugarcane bagasse ash did not have much variation, since it only increased by 3% with respect to the conventional one; Finally, stability increased by 10.6% in the modified mixtures. Therefore, it was concluded that the addition of 1.0% of sugarcane bagasse ash contributes to the improvement of the mechanical properties of hot asphalt mixes for roads in the Lima region, since it has a pozzolanic behavior, generating greater durability and tensile strength.

Keywords: Mechanical properties, stability, creep, Marshall methodology.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los proyectos de infraestructura vial cumplen un papel fundamental dentro de una sociedad, ya que estos son los encargados de generar vías de comunicación entre diferentes ciudades, colaborando con el crecimiento y desarrollo de un país. Por ello es necesario que las carreteras cuenten con las mejores condiciones para satisfacer las necesidades básicas en las actividades de transporte. Sin embargo, sabemos que hoy en día el Perú cuenta con carreteras deficientes y en tan corto tiempo, por lo que en la presente tesis se ha visto la necesidad de una búsqueda de nuevas alternativas para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, de tal manera que proporcione un mejor rendimiento ante las cargas externas y se obtenga una mayor durabilidad en el tiempo.

Una de estas alternativas que sugiere la investigación es el uso de la ceniza de bagazo de la caña de azúcar, puesto que se ha realizado estudios donde se demuestra que la ceniza tiene propiedades que mejoran el comportamiento de diferentes materiales en el sector de la construcción; por lo que se pretende en el presente trabajo de tesis encontrar qué porcentaje de ceniza de bagazo de la caña de azúcar puede mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente para la región de Lima a través de la metodología Marshall.

La investigación se realiza en base a 5 capítulos:

En el primer capítulo se plantea y describe los problemas generales y específicos del estudio, al igual que se delimita la información y se justifica el motivo del estudio.

En el segundo capítulo se muestran los fundamentos teóricos que forman como base al estudio, estos son los antecedentes, investigaciones anteriores, estructuración teórica y la definición de términos básicos.

El tercer capítulo abarca la elaboración de hipótesis y el estudio de la variable dependiente e independiente.

El cuarto capítulo da a presentar la metodología de todo el trabajo de investigación, describe y especifica cómo fue el proceso de la elaboración de la tesis y cuáles fueron las herramientas a utilizar para la recolección de datos.

Por último, en el quinto capítulo se indican los resultados obtenidos tras haberse realizado los ensayos y los cálculos correspondientes al estudio para así poder analizarlos y finalmente generar conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos

1.1.1. Descripción del problema

Las carreteras han sido parte primordial en el desarrollo de los países, por lo que es necesario que se encuentren en óptimas condiciones; sin embargo, hoy en día muchos de los pavimentos en el país se encuentran en deterioradas situaciones a lo largo de todo el territorio, vemos como las capas pavimentadas se muestran en mal estado. Estas deficiencias son reflejadas por medio de fallas en el pavimento (fisuras, grietas y deterioros).

Existen dos tipos de pavimentos mayormente utilizados en el país, el flexible y rígido; siendo el pavimento flexible parte del estudio de la investigación, especialmente, las mezclas asfálticas en caliente. Estas forman parte de una de las capas del paquete estructural de los pavimentos flexibles, y la gran preocupación en ellas es que tienen un contacto directo con la rodadura de los vehículos, por lo que al ser expuesta es más vulnerable a sufrir deterioros y daños constantemente.

Las mezclas asfálticas están compuestas por agregados pétreos (gruesos y finos), relleno mineral (filler) y cemento asfáltico, en un aproximado de 90%, 4% y 6% respectivamente (Padilla, 2004). Cada elemento mencionado anteriormente es de suma importancia para un óptimo comportamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afectaría la capa pavimentada, por lo que un mal diseño o mala preparación de la mezcla asfáltica hace que sus propiedades mecánicas sean desfavorables.

Día a día observamos que las carpetas de rodadura (mezclas asfálticas en caliente) fallan antes de lo previsto y no resisten lo suficiente al efecto de las cargas, una propiedad relacionada a esta resistencia es la estabilidad, que toma un papel primordial dentro de nuestra investigación, ya que es la propiedad mecánica evaluada para que la capacidad de deformarse de la mezcla sea menor y la resistencia de cargas mayor a lo convencional.

1.1.2. Problema general

¿Cuál es el porcentaje de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas en la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023?

1.1.3. Problemas específicos

- a. ¿En qué medida varía la estabilidad con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall?
- b. ¿En qué medida varía la fluencia con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall?

1.2. Objetivo general y específicos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas para la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Determinar la estabilidad con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.
- b. Determinar la fluencia con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

1.3. Delimitación de la investigación: Temporal, espacial y temática

1.3.1. Delimitación temporal

Está delimitado en base al tiempo de elaboración de la investigación, comprendido en un periodo de medio año (6 m.), entre el mes de mayo y noviembre del año 2023, realizando las actividades de recolección de datos, elaboración de especímenes y ejecución de pruebas de laboratorio.

1.3.2. Delimitación espacial

La investigación está delimitada para ser aplicada en carreteras de tráfico pesado donde su ubicación geográfica sea la región de Lima.

1.3.3. Delimitación temática

El estudio de la tesis comprende en el análisis de las propiedades mecánicas (estabilidad y fluencia) de una mezcla asfáltica en caliente con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en comparación a las mezclas asfálticas en caliente convencionales teniendo como base investigaciones anteriores y manuales como el Manual de carreteras EG-2013 y el Manual de ensayo de materiales, 2016.

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación

En el ámbito técnico, este proyecto de tesis contribuirá con el mejoramiento del comportamiento de las mezclas convencionales a través del uso de nuevas materias primas como lo es la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

En lo social, ayudará a que la infraestructura vial cuente con un mejor equipamiento, de tal manera que nuestra comunidad tenga una transitabilidad más segura y duradera.

En lo ambiental, el uso de un residuo orgánico incentiva la práctica del reuso, permitiendo una reducción de huella de carbono en el medio ambiente y el ahorro de los recursos.

En lo teórico, la evaluación de las propiedades mecánicas con el uso de la ceniza aportará nuevos conocimientos para entender cómo la estabilidad y el flujo pueden variar en una mezcla al adicionarse un nuevo agente modificador.

En lo metodológico, la elaboración de mezclas asfálticas con el uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar una vez demostrada su validez de mejorar sus propiedades mecánicas, incita a poder generar e investigar nuevas metodologías de diseño para las mezclas asfálticas utilizando este nuevo material.

1.4.2. Importancia

Muchas de las carreteras hoy en día se encuentran en mal estado sin haber cumplido su tiempo de vida útil, por ello es de suma importancia investigar y demostrar nuevas alternativas de solución para mejorar la resistencia de los pavimentos, sobre todo de las carpetas asfálticas que son las más propensas a daños. La búsqueda de nuevas opciones de solución en la actualidad va de la mano con la sostenibilidad, por ello se buscó una propuesta de residuo orgánico que no solo mejore propiedades mecánicas de las mezclas sino que formen parte importante de una construcción sostenible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio de investigación

Uno de los materiales más utilizados y versátiles dentro de los proyectos civiles es el asfalto. Dentro de los principales usos de este material en la ingeniería civil está la pavimentación de carreteras, llamada pavimentación asfáltica, que hoy en día es utilizada dentro de innumerables países.

La historia del asfalto radica en el año 4000 a.C, en la civilización Sumeria, donde empezaron a construir los primeros caminos con ladrillos utilizados en sus palacios para las nuevas vías de las ciudades. Para el año 3500 a.C, al norte de la India utilizaban ladrillos al igual que los Sumerios, sin embargo decidieron utilizar el bitumen (asfalto) para evitar filtraciones entre el espaciado de los ladrillos y así impermeabilizar la superficie. Entre los años 1400 y 600 a.C. ya se utilizaba la palabra "asfalto" derivada de la lengua asiria. Años después, a inicios del siglo XIX, su uso se centró en las zonas de vía terrestre, por ello para el año 1870, se empezó el desarrollo del asfalto y su aplicación directa en las carreteras con la construcción del primer pavimento asfáltico del mundo, ubicado en New Jersey. Para contribuir con los avances del diseño de las mezclas asfálticas, se realizaron diferentes ensayos y pruebas con el fin de comprender mejor el comportamiento del asfalto. Uno de los diseños más conocidos y utilizados hoy en día, es el de Bruce Marshall que realizó una metodología para encontrar la cantidad adecuada de asfalto dentro de una mezcla.

Con el crecimiento de la industria de mezclas asfálticas, surgieron innovadoras investigaciones para el mejoramiento de sus propiedades, esto se dio a través de la adición de diferentes modificadores (polímeros, fibras, cenizas, etc), dando como resultados la mejora en su durabilidad y resistencia.

Uno de los modificadores que garantizamos en la presente tesis, es el caso de la ceniza de bagazo de la caña de azúcar. La caña de azúcar se considera como una materia prima importante utilizada en la producción de variedades de productos, esto ha aumentado el interés en realizarle nuevos estudios.

En la Tabla 1 se muestra un recopilado de las investigaciones que se han realizado hasta el día de hoy acerca del uso de la ceniza de caña de azúcar en la industria de la construcción:

Tabla 1*Histórico de investigaciones de la variable*

Investigación	Autores	Año	País
Estudio de las cenizas volantes en mezclas asfálticas	Reyes O. Camacho R. Troncoso J.	2006	Colombia
Aditivo de ceniza de bagazo de caña de azúcar para concretos	Chagas G. Moraes E. Toledo R.	2008	-
Ceniza de bagazo de caña de azúcar en reemplazo al agregado fino en concreto	Araújo S. Couto F. Franke K. Petermann J. Sales A.	2011	Brasil
Ceniza de bagazo de caña y cal en suelos compactados para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas	Alavéz R. Altamirano D. Gochi Y. Martínez J. Montes P.	2012	México
Ceniza de bagazo de caña en morteros de cemento	Rodriguez J.	2014	México
Ceniza de bagazo de caña como polvo mineral en mezclas asfálticas en caliente	Zainudín M. Khairuddin H. Peng C. Khadijah S. Misnin A. Murniati S.	2016	Suiza
Fibra natural de caña de azúcar en mezclas asfálticas MDC-19	Bejarano J. Caicedo C.	2017	Colombia
Ceniza orgánica como relleno mineral en mezclas asfálticas en caliente	Matos L.	2018	Perú
Filler de ceniza de bagazo de caña de azúcar en mezclas asfálticas	Espinosa Y. Mazutier L. Simbaqueva N.	2019	Colombia
Fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar en mezclas asfálticas SMA	Mariano G.	2021	Perú

Nota. Elaboración propia

Vemos en la Tabla 1 cómo a lo largo de la historia ha existido un interés por el uso de este material, dando como resultados positivos en la mejora de diferentes materias de la construcción como suelos, concreto y mezclas asfálticas en caliente.

En el Perú aún no existen proyectos realizados con ceniza de bagazo de la caña de azúcar, por lo que a la fecha no hay normativa nacional respecto a esta tecnología pero queda demostrado de forma teórica que sería un buen modificante para el mejoramiento de las características de los materiales.

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1. Investigaciones internacionales

Huwae, Parera y Tanijaya (2016) en su investigación traducida con nombre “Ceniza de bagazo como filler en mezcla HRS (Laminada en caliente)” de la Universidad Paulus Christian de Indonesia menciona que la investigación busca analizar de qué manera influye las cenizas de bagazo como filler dentro de la mezcla HRS. Dando como resultados que la ceniza puede ser aplicada como filler, ya que se obtuvieron altos valores de los ensayos de estabilidad de la metodología Marshall con 1205.040 kg, en el flujo de 4.427mm, en la relación estabilidad/flujo de 273,717 kN/mm, VMA de 20.249%, VFA de 74.21% y VIM de 5.22%.

Abd y Hdabi (2016) en su investigación traducida de la Universidad de Kufa, “Características de mezcla asfáltica en caliente con materiales de desecho de la industria azucarera como relleno mineral” pretende realizar una evaluación del efecto de las mezclas asfálticas en caliente al agregarse materiales de Residuos de Azúcar (SW) tomando en cuenta los requisitos de la Comisión Estatal de Carreteras y Puentes (SCRB, R9). La investigación tuvo como resultados que hubo un mejorío en las características de la mezcla con un ligero aumento en la estabilidad Marshall, indicando que la aplicación de materiales de desecho como relleno mineral (filler) en MAC tiene muchas ventajas por su impacto económico y ambiental, además que mejora las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente.

Bejarano y Caicedo (2017) en su tesis con título “Análisis del comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC. 19 con fibra natural de caña de azúcar” de la Universidad Católica de Colombia, busca examinar las propiedades y la reacción de una mezcla asfáltica patrón MDC-19 al agregarle las fibras de cañas de azúcar a través de diversas dosificaciones para determinar qué porcentaje de la mezcla resultante presenta una mejora significativa. Donde finalmente concluye que al modificar el concreto

asfáltico patrón, este mejora tanto las características físicas como la parte mecánica de la muestra.

Simbaqueva, Espinosa y Mazutier (2019) en su investigación de la Universidad Piloto de Colombia, “Estudio de una mezcla asfáltica modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar de Cundinamarca como llenante natural” tiene como objetivo la evaluación de las características física-mecánicas y el garantizamiento de su durabilidad mediante el efecto de las cargas monotónicas. Sus resultados mencionan que la mezcla asfáltica modificada con ceniza en forma de filler mineral tiene un mejor comportamiento que la mezcla asfáltica convencional, los resultados reportaron que las mezcla asfálticas modificadas tuvieron en sus partículas una mejor cohesión. Mientras que en la adherencia analizada por el desgaste y la relación de la resistencia a la tracción se observa un menor valor.

2.2.2. Investigaciones nacionales

Matos (2018) dentro de su trabajo de tesis “Influencia de la adición de ceniza orgánica como filler en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente-Huancayo, 2018”; busca saber cómo afecta el uso de la ceniza de materiales orgánicos en forma de filler en los parámetros mecánicos dentro de una MAC patrón. Donde concluye que el adicionamiento del 2% de la ceniza orgánica en la mezcla mejora la propiedad de estabilidad, y que el usar cenizas orgánicas entre el 2% y el 3% en mezclas asfálticas mejora sus propiedades.

Farfan y Flores (2019) en su investigación “Análisis y propuesta de carpeta asfáltica con la tecnología (S.M.A) modificada con fibra natural de caña de azúcar, Cusco 2018” de la Universidad Andina del Cusco, busca evaluar las características física-mecánicas de las mezclas asfálticas S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar y compararla con una que se le adicione fibra de celulosa comercial. Donde se determinó las gradaciones óptimas para las mezclas, el porcentaje de asfalto, la cantidad de los agentes estabilizantes para realizar las briquetas de muestra. Por lo que se verificó que la fibra natural de caña de azúcar puede ser adicionada en una mezcla asfáltica SMA.

Adauto (2019) en su investigación de maestría “Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz”, de la Universidad Ricardo Palma tiene como finalidad determinar los comportamientos mecánicos de una MAC con el uso de cenizas de la caña de maíz para demostrar que la resistencia del pavimento tiene un aumento. Se dio como resultados que el porcentaje del uso de ceniza ideal fue de 0.5% con un 6% del ligante asfáltico. Luego, que el comportamiento de la fluencia y la estabilidad mejoraron al agregarse las cenizas de cañas de maíz con un 1%

de la convencional. Por último, la adición de 0.2%, 0.5% y 1% la resistencia de la muestra al deterioro por humedad inducida incrementa hasta un 3.3%, 6.0% y 4.1% respectivamente.

Gelí (2021) en su proyecto de tesis de maestría “Mezcla asfáltica SMA, fibra, ceniza del bagazo de caña de azúcar y su desempeño mecánico”, de la Universidad Ricardo Palma, pretende determinar de qué manera la estructura de las mezclas asfálticas SMA modificadas pueden mejorar mecánicamente su trabajo por medio de las pruebas y ensayos de laboratorio. Los resultados fueron que las cenizas de bagazo de caña de azúcar no tienen la capacidad de disminuir el deterioro por humedad de la susceptibilidad; y en el caso de la fluencia, la mezcla asfáltica modificada tiene un valor que cumple con las especificaciones de la norma, aunque haya tenido un valor superior que la mezcla asfáltica tradicional, por lo que sufre más deformación.

Yalico (2022) en su trabajo de tesis “Influencia de la fibra de bagazo de caña en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica Chiclayo-Lambayeque” busca analizar la influencia de la fibra de bagazo de caña en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. Dio como resultado que la granulometría para ambos diseños se encontraron dentro de los valores de una MAC-2, y en cada uno de los tipos de tráfico que se evaluaron se mostró mejoras, un claro ejemplo es en el caso del tránsito pesado, que la investigación arrojó que el % Vacíos es de 4.2%, el % V.M.A es del 15.9, el peso unitario fue de 2.348 gr/cm³, el índice de rigidez de 3120.2 kg/cm, una estabilidad de 1709.7 kg, un flujo de 3.5 mm y un contenido de asfalto de 5.45%, los valores cumplieron con los parámetros de la normativa MTC E 504/ ASTM D 1559.

2.3. Bases teóricas vinculadas a las variables de estudio

2.3.1. Pavimento asfáltico

Son estructuras que cuentan con un revestimiento asfáltico o carpeta de rodadura, la que se apoya sobre dos capas no rígidas llamadas base y sub base. En general, un pavimento convencional está confirmado por las siguientes capas:

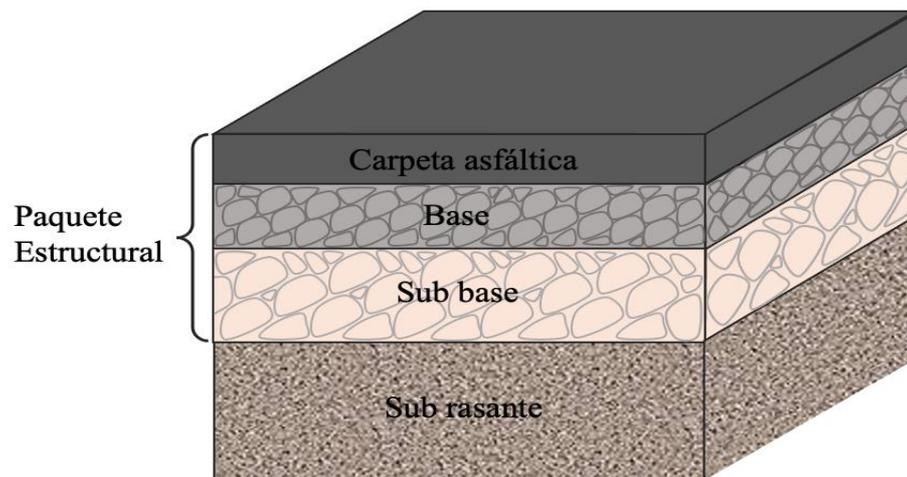
- Carpeta asfáltica: Brinda una superficie estable y uniforme para el tránsito. Además de ello, obstruye el paso del agua al paquete estructural interno del pavimento. En general, la carpeta de rodadura de mayor calidad se construye con mezcla asfáltica producida y colocadas con mezclas asfálticas en caliente.
- Base granular: Transmite las cargas de la carpeta hacia la sub base, por lo que debe tener un suficiente espesor para una buena resistencia estructural.

- Sub base granular: Cumple la función de soportar los esfuerzos transmitidos de la carga de los vehículos desde la carpeta asfáltica hasta la base y proteger a esta capa del terreno natural, de modo que si este material ingresa en la base, le produciría cambios volumétricos por medio de las condiciones de humedad ocasionando una baja resistencia a la base.
- Subrasante: Es la parte del terreno de fundación donde se asienta el paquete estructural del pavimento asfáltico. Cuando este terreno natural no tiene la capacidad soporte suficiente debe ser mejorado a través de estabilizaciones químicas y/o mecánicas al fin de obtener un mayor valor de su CBR. (Huamán, 2023)

En la Figura 1 se muestra al pavimento conformado por la capas mencionadas:

Figura 1

Capas que conforman el pavimento asfáltico



$$\text{Espesor: } E_{\text{Carpeta asfáltica}} < E_{\text{Base}} < E_{\text{Sub base}}$$

Nota. Elaboración propia

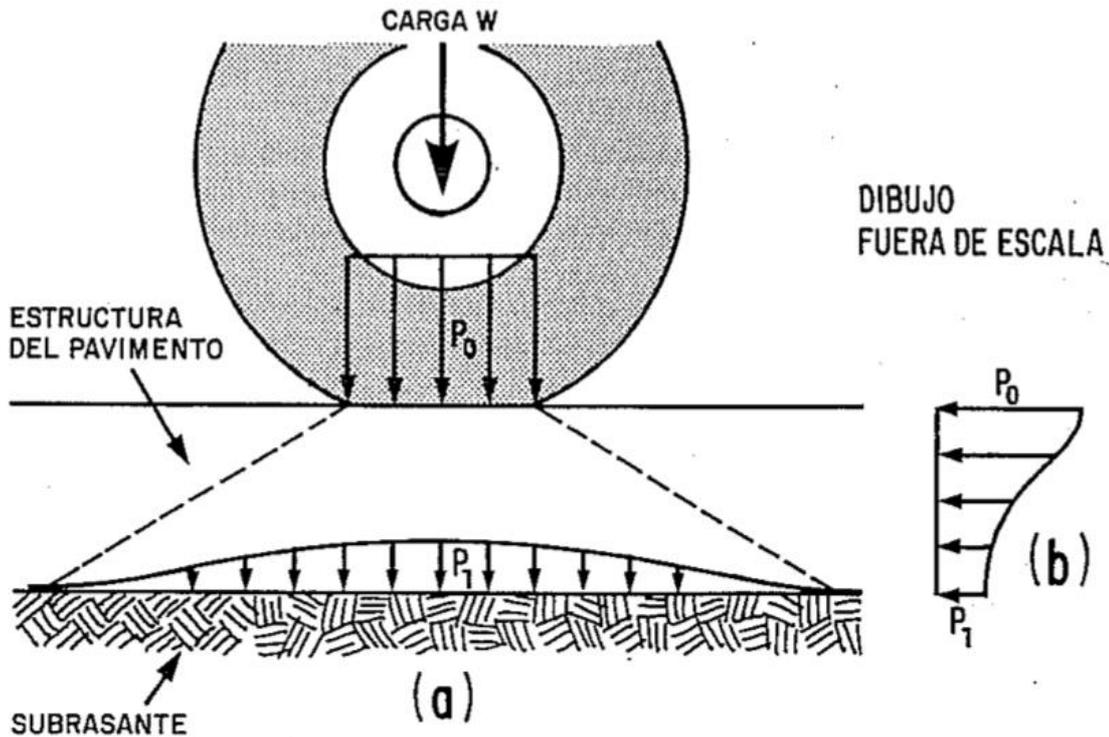
Por otro lado, podemos encontrar dos tipos de esfuerzos dentro de los pavimentos asfálticos: Compresionales y tensionales.

- Esfuerzos compresionales o verticales: Causadas por las cargas de los neumáticos del tráfico en la estructura se da de tal manera que las capas de revestimiento y bases reciben las tensiones verticales ocasionadas por la compresión del suelo de fundación absorbiendo tensiones cizallantes. Cabe recalcar que estos esfuerzos son los que producen las fallas estructurales del pavimento, como los ahuellamientos, hundimientos, etc. En la Figura 2 vemos como la carga del neumático (w) al encuentro

con el pavimento genera un esfuerzo en una respectiva área (forma triangular (a)) donde se distribuyen los esfuerzos compresionales. Al lado derecho (b) vemos como la intensidad del esfuerzo pasa por todo el paquete estructural del pavimento de tal manera que cuando se llega al nivel de subrasante el esfuerzo será cero.

Figura 2

Representación de los esfuerzos compresionales



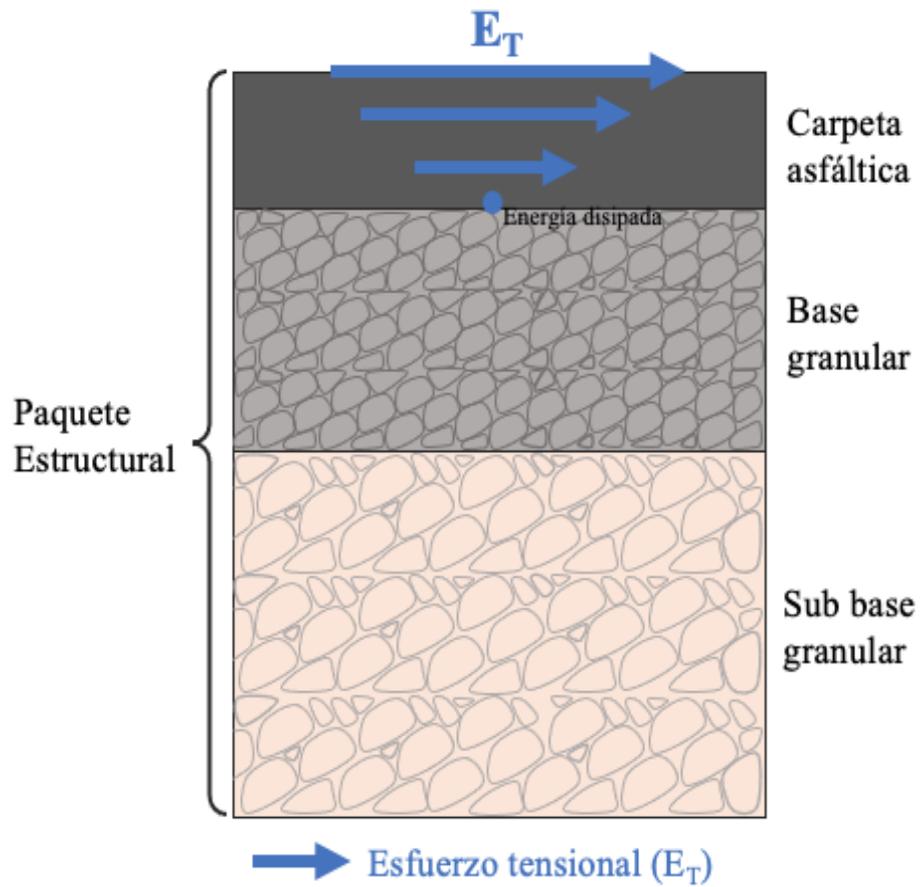
Nota. Comisión Permanente del Asfalto (1985).

- Esfuerzos tensionales u horizontales: Aquellos que son emitidos por el paso de los vehículos y que se trasmite a través de toda la carpeta asfáltica teniendo su punto de aplicación final en la parte inferior del material bituminoso (carpeta de rodadura) y cuando llega a la base granular se disipa la energía ya que el suelo no trabaja con esfuerzos tensionales. Estos esfuerzos son los que producen las fallas funcionales en la carpeta de rodadura, tal como las fisuras longitudinales y/o transversales, piel de cocodrilo, desprendimientos, etc.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de los esfuerzos tensionales a lo largo de la carpeta asfáltica.

Figura 3

Representación de los esfuerzos tensionales

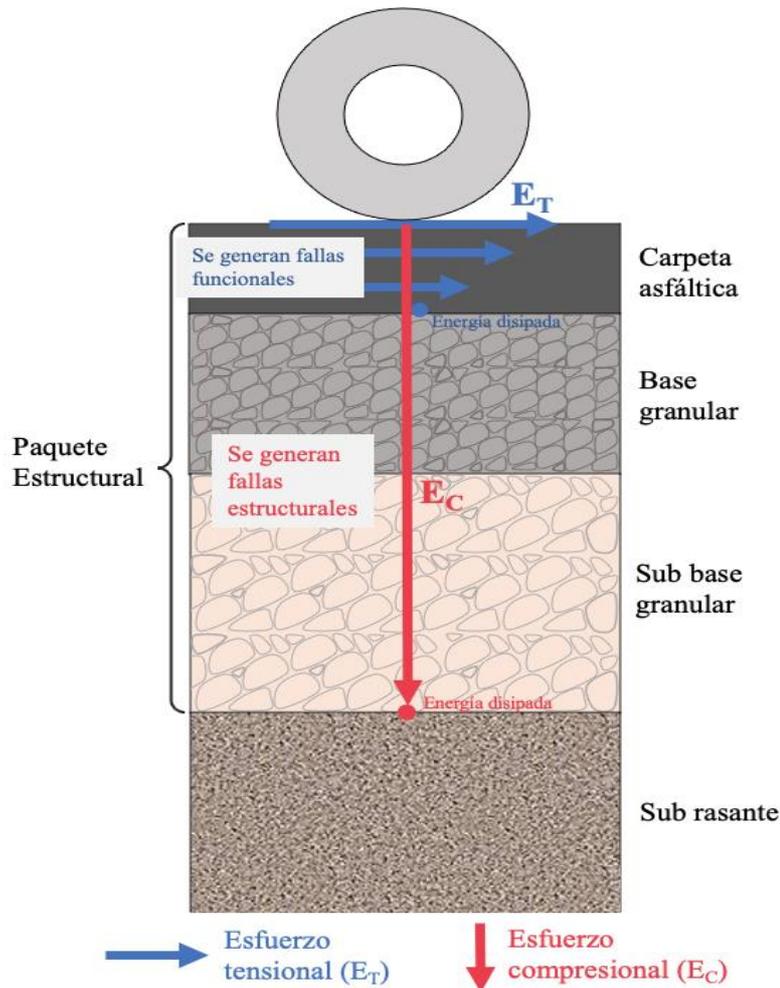


Nota. Elaboración propia

En la Figura 4 vemos cómo trabajan los dos esfuerzos compresionales y tensionales dentro del pavimento por medio de la carga de los vehículos.

Figura 4

Esfuerzos comprensionales y tensionales de un pavimento asfáltico



Nota. Elaboración propia

2.3.2. Mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas son las que dan origen a las carpeta asfálticas del pavimento, están compuestas de la combinación de agregados pétreos, ligante asfáltico y aditivo en ciertos casos. Existen distintos tipos de mezclas asfálticas, ya sea mezclas frías, tibias y calientes, las cuales pueden ser convencionales o modificadas tanto en su estructura química como mecánica. Estas mezclas se diseñan en laboratorio para ser fabricados en planta y luego trasladados a obra, aquí son colocados y compactados para conformar la carpeta asfáltica que puede ser de un espesor determinado al diseño del paquete estructural.

Las mezclas asfálticas en caliente o también conocidas como MAC, son denominadas de esta manera ya que al momento de mezclar los agregados, el ligante asfáltico (CAP)

necesita encontrarse a altas temperaturas para tener la fluidez adecuada. Su composición consta de la siguiente forma:

$$\text{MAC} = \text{CEMENTO ASFÁLTICO} + \text{AGREGADOS PÉTREOS (PIEDRA + ARENA)} + \text{FILLER}$$

En la Tabla 2 se especifica los diferentes tipos de MAC que existen teniendo en cuenta el tamaño del agregado y el huso granulométrico que se utilice:

Tabla 2

Gradaciones de las mezclas asfálticas en caliente

N° Malla	% Pasante		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
Malla 1"	100	-	-
Malla 3/4"	80-100	100	-
Malla 1/2"	67 a 85	80 a 100	-
Malla 3/8"	60 a 77	70 a 88	100
Malla N°4	43 a 54	51 a 68	65 a 87
Malla N°10	29 a 45	38 a 52	43 a 61
Malla N°40	14 a 25	17 a 28	16 a 29
Malla N°80	8 a 17	8 a 17	9 a 19
Malla N°200	4 a 8	4 a 8	5 a 10

Nota. Manual de carreteras (2013): Especificaciones técnicas: Generales para construcción. Pág. 561

Como observamos en la Tabla 2, las MAC-1 son las que utilizan con agregado de mayor tamaño, mientras que la MAC-3 tiende a usarse agregado de menor diámetro.

a. Propiedades de las mezclas asfálticas en caliente

Esta mezcla se encuentra expuesta a las cargas de los vehículos y a los fenómenos ambientales como al cambio de temperatura. Una de sus funciones más relevantes es ser una capa impermeabilizante de tal manera que proteja a las otras capas del pavimento; por otro lado, esta debe proporcionar al vehículo una zona uniforme por donde transitar, que sea resistente, confortable y segura.

Para obtener una mezcla en óptimas condiciones, debe poseer las siguientes propiedades:

- Estabilidad: Capacidad de deformarse de la mezcla, está relacionada con su resistencia ante las cargas externas, es necesario que las MAC cuenten con una buena resistencia para el soporte de los esfuerzos tensionales y compresionales. Esta estabilidad están en relación con los parámetros de fricción (por los agregados que tienden a friccionar

al rosarse) y parámetros de cohesión (en la unión de los agregados con el mástico asfáltico).

- Durabilidad: Habilidad de perdurar en el tiempo soportando factores como el desintegrar de los agregado y la variación en las características del asfalto (el asfalto envejece) (Instituto de asfalto, 1982).
- Impermeabilidad: Capacidad de evitar la entrada del aire y agua en la mezcla. “Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada” (Instituto de asfalto, 1982, p.67).
- Flexibilidad: Propiedad de un pavimento asfáltico de adaptarse a algún movimiento y asentamiento causado por la subrasante sin que haya grietas (Instituto de asfalto, 1982).
- Trabajabilidad: Es la facilidad de la mezcla para ser puesta y compactada. Esta propiedad viene del asfalto.
- Resistencia a la fatiga: Resistencia a la flexión repetida bajo cargas de tránsito (Instituto de asfalto, 1982, p.19). Las fallas con mucha incidencia en una carpeta sfáltica son las fisuras, estas se pueden dar por medio de orígenes: Fatiga, que se da en temperaturas promedio a 20°C y por infradiseño (mal diseño del pavimento), y contracción térmica.
- Resistencia al deslizamiento: Es la capacidad de disminuir los deslizamientos de las ruedas de los vehículos. Una carpeta asfáltica que sea áspera y rugosa podrá resistir más el deslizamiento que una lisa (Instituto de asfalto, 1982).

Teniendo en cuenta las propiedades generales de las mezclas asfálticas en caliente, estas también cuentan con propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas con las cargas exteriores que puedan soportar. Las propiedades mecánicas de las mezclas son: Estabilidad y fluencia.

En una mezcla asfáltica en caliente se espera que conserve durante su vida útil sus propiedades mecánicas, como es la estabilidad, relacionada con la resistencia a las cargas de los vehículos y la fluencia, que es la longitud de deformación de la mezcla en función de la carga soportada.

b. Proceso en planta y puesta en obra

Las plantas de asfalto son un conjunto de maquinarias mecánicas y electrónicas, en donde los agregados finos y gruesos son mezclados, calentados, secados y unidos al cemento asfáltico en altas temperaturas (aproximadamente a 150 °C) para dar como resultado la mezcla asfáltica en caliente (Huamán, 2023).

El equipo y maquinaria que se utilizará para la implementación de la carpeta asfáltica deberá de encontrarse con la calidad establecida en el proyecto. Dentro de los equipos necesarios para su construcción se encuentra la pavimentadora, el rodillo liso doble rola y el rodillo neumático.

El concreto asfáltico fabricado es entregado a los vehículos transportadores, que los colocan en las pavimentadoras para que se deposite uniformemente sobre la vía. Luego, se compacta con rodillos mientras se mantienen las temperaturas especificadas.

Previo a la iniciación de la ejecución de la carpeta asfáltica, la zona en la que será colocada debe estar debidamente terminada y nivelada, sin algún material extraño, polvo o encharcamientos en ella (SCT, 2008).

2.3.3. Cemento asfáltico de petróleo (CAP)

El cemento asfáltico de petróleo es el nombre que se le da al asfalto que es utilizado para sectores industriales y de construcción (Comisión Permanente del Asfalto, 1985). Este asfalto de petróleo es un material cementante bituminoso cuyo color característico es negro que cambia de consistencia a medida que se expone a diversas condiciones ambientales (ASTM, como se citó en Minaya y Ordoñez, 2006).

a. Proceso de obtención del asfalto

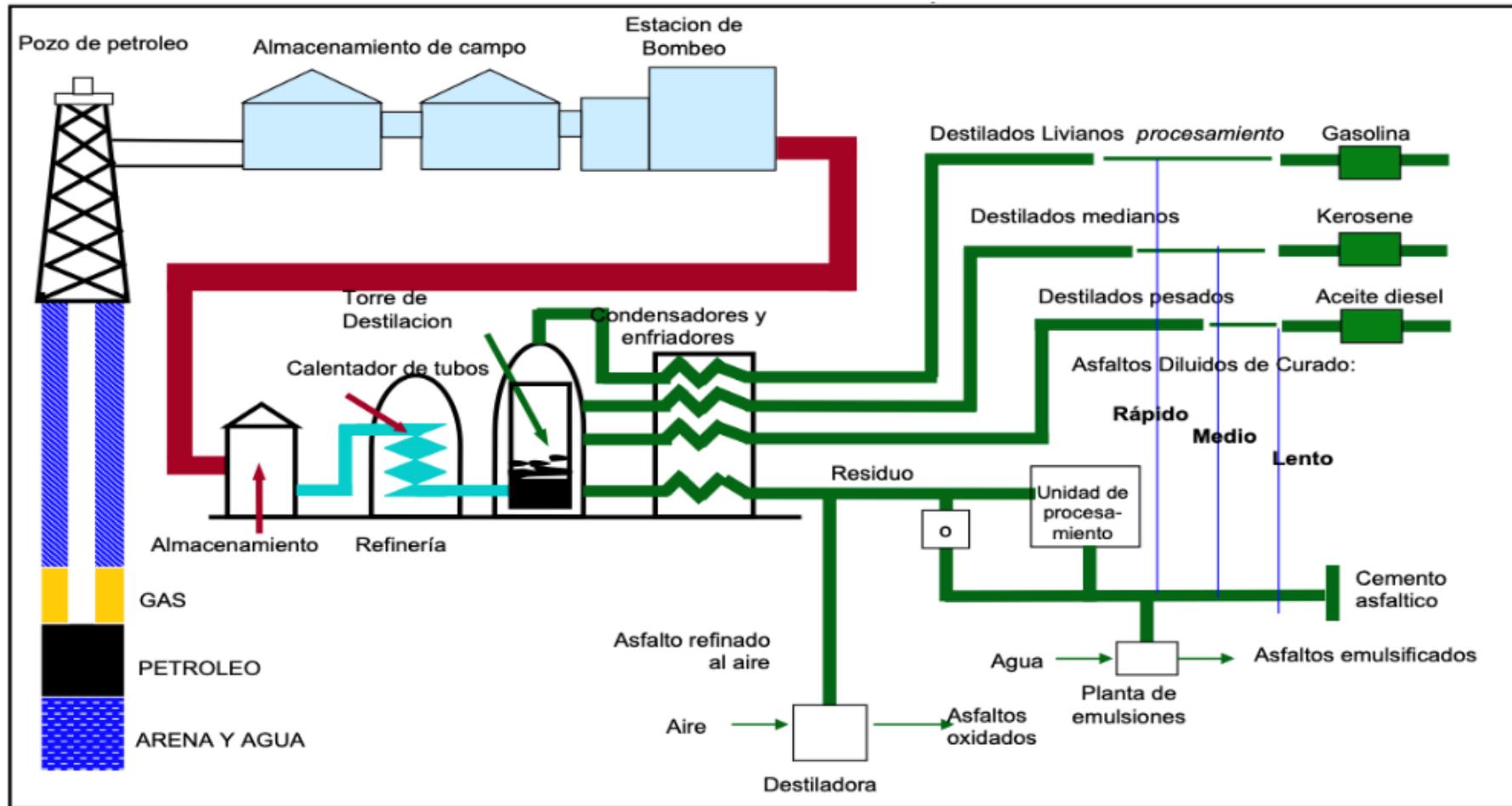
El asfalto proviene del petróleo, la gran parte de los petróleos crudos poseen pequeñas cantidades de asfalto (Comisión Permanente del Asfalto, 1985), en base a esto, lo podemos obtener de forma natural en depresiones de la corteza terrestre a través de Lagos de Asfalto o impregnadas en los poros de las rocas asfálticas como las Gilgonitas (Huamán, 2023). Sin embargo, también lo podemos obtener mediante el proceso de refinación del petróleo, que de hecho es la forma más utilizada hoy en día para la obtención del asfalto.

El petróleo crudo es extraído a través de grandes pozos, almacenado y llevado al proceso de refinería, en esta parte el petróleo es puesto a altas temperaturas para su destilación haciendo que se descomponga de tal manera que libere solventes como gasolina (liviano), kerosene (medio), diesel (pesado), y finalmente se obtenga el cemento asfáltico (destilación más pesada) (Minaya y Ordoñez, 2006, p. 44).

En la Figura 5 se observa el proceso de la obtención del asfalto mediante la refinería del petróleo .

Figura 5

Refinería del petróleo



Nota. Minaya, S. y Ordoñez, A. (2006) Diseño moderno de pavimentos asfálticos.

Cuando el cemento asfáltico que se ha obtenido es combinado con los otros solventes derivados del petróleo, se obtienen los asfaltos diluidos, recortados o también llamado cutbacks. Los cuales podemos tener tres:

- RC (Curado rápido): CAP + gasolina
- MC (Curado medio): CAP+ kerosene
- LC (Curado lento): CAP + diesel

Estos pueden ser utilizados para las mezclas asfálticas en caliente. Sin embargo, la combinación del CAP con agua y un agente emulsificante pueden servir para mezclas asfálticas en frío, estos tienen como nombre asfaltos emulsificados.

b. Composición química

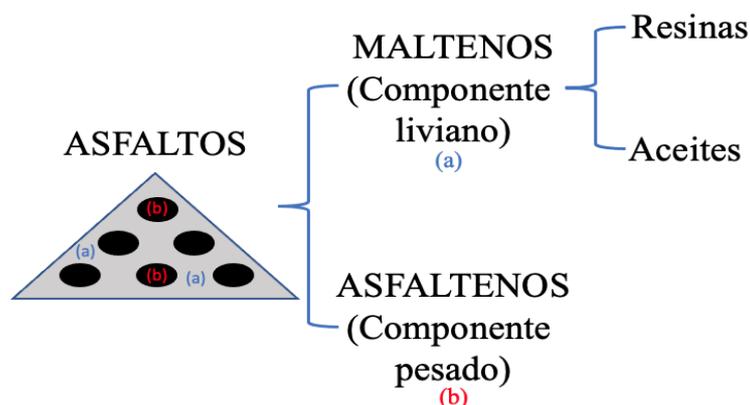
El asfalto es un material compuesto por una serie de hidrocarburos con la unión de residuos de azufre, oxígeno, nitrógeno y entre otros elementos. Cuenta con dos fracciones principales en la que se puede separar: Maltenos (fracción ligera, (a)) y Asfaltenos (fracción pesada, (b)) (Huamán, 2023).

- Los maltenos son líquidos viscosos que influyen en las propiedades elásticas del asfalto, está compuesto por resinas y aceites. La resina suele ser un líquido pesado de color oscuro que brinda las características cementantes del asfalto; mientras que con los aceites, estos son de un color más claro y funciona como medio de desplazamiento para los asfaltenos y las resinas, genera la deformabilidad del asfalto y lo hace más trabajable.
- Los asfaltenos le da el color negro a los asfaltos, al igual que su dureza. No interviene en la adherencia de los agregados pétreos (Huamán, 2023).

Estos elementos están representados en la Figura 6, para un mayor entendimiento de la composición química el asfalto.

Figura 6

Composición química del asfalto



Nota. Elaboración propia

c. Comportamiento mecánico

El comportamiento del asfalto va en función a los elementos que lo componen y según lo visto en el punto anterior, la proporción de asfaltenos, resinas y aceites influyen considerablemente en sus propiedades (Huamán, 2023).

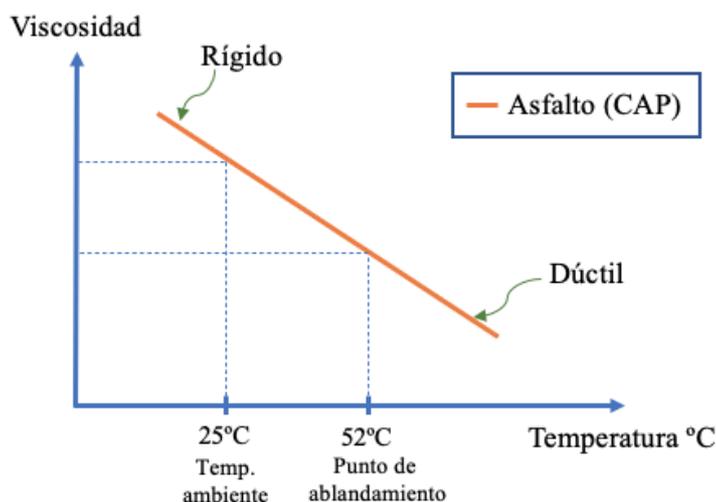
Existen diferentes condiciones reológicas que caracterizan al asfalto:

- Consistencia: “El asfalto a temperatura ambiente es un material negro, pegajoso, semi solido y altamente viscoso” (Tecnología del asfalto, p.A11). El asfalto es considerado un material termosplástico, esto indica que su comportamiento va en relación a la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga (Minaya y Ordoñez, 2006). Cuando es expuesto a una alta temperatura tiene una menor rigidez, el asfalto tiende a derretirse, se comporta como un fluido con poca consistencia. A medida que la temperatura va bajando, el asfalto puede agrietarse volviéndose más rígido y quebradizo (Minaya y Ordoñez, 2006).

La Figura 7 representa gráficamente como la consistencia del asfalto va cambiando de acuerdo a la temperatura en la que se encuentre.

Figura 7

Variación de consistencia (viscosidad) del asfalto



Nota. Elaboración propia

- Durabilidad: Posee propiedades de tener una alta resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales (Huamán, 2023). El cemento asfáltico debe tener la

capacidad para que sus características originales se mantengan durante el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica (Sequeira y Cervantes, 2014).

- Adherencia: Capacidad cementante para envolverse y pegarse a las partículas de los agregados al realizarse las mezclas asfálticas.
- Cohesión: Brinda una íntima ligación entre los agregados, capaz de resistir una “acción mecánica de desagregado” al aplicarse la carga de los transportes (Huamán, 2023). Capacidad de mantener la unión entre todos los agregados (Sequeira y Cervantes, 2014).
- Impermeabilizante: Los CAP poseen propiedades impermeables, por lo que deben encontrarse libres de cantidades de agua. Si es que se encuentra algún contenido de agua puede suceder por el inadecuado transporte del cemento asfáltico. Esta propiedad garantiza que un pavimento sea funcional y óptimo contra la penetración de agua (Huamán, 2023).

d. Debilidades del asfalto

Dentro de las características que demuestran deficiencias en el cemento asfáltico encontramos las siguientes:

- Susceptibilidad térmica: El asfalto es muy deformable a los cambios de temperatura, por lo que genera una variación en sus propiedades (Huamán, 2023). Si los cementos asfálticos poseen un alto grado de susceptibilidad térmica no son recomendables debido a que si se encuentra a altas temperaturas y su viscosidad tiende a ser muy baja (muy blando) pueden suceder incidentes en el proceso del mezclado y compactación, y a largo plazo generar ahuellamientos si es que la temperatura de servicio es alta (Condezo et al., 2017). Y si en caso, la temperatura es muy baja, su viscosidad puede terminar siendo alta y ocasionar a la mezcla fisuras por contracciones térmicas a bajas temperaturas de servicio. Y si en caso, temperatura es muy baja, su viscosidad puede terminar siendo alta y ocasionar a la mezcla fisuras por contracciones térmicas a bajas temperaturas de servicio (Condezo et al., 2017).
- Envejecimiento: El CAP sufre envejecimiento al encontrarse a la intemperie, ya sea por la oxidación o la foto degradación (Huamán, 2023). Como lo indican Vargas y Reyes (2010) citando a Youtcheff y Jones (1994), “El envejecimiento se da entre la reacción de los grupos lábiles del asfalto con el contacto del oxígeno” (p. 27). Esta característica modifica las propiedades del material, y por consecuente altera la durabilidad del pavimento asfáltico (Vargas y Reyes, 2010).

- Recuperación elástica: Tiene bajos niveles de recuperación elástica, esto hace que su rango de utilidad sea limitado (Huamán, 2023).

2.3.4. Agregados pétreos – Filler

Los agregados utilizados en la fabricación de las mezclas asfálticas por lo general constituyen del 90% a 95% del peso total de la mezcla, mientras que el cemento asfáltico comprende del 5% al 10%. Se necesitan agregados de gran calidad para tener una mezcla óptima, que sea fuerte y con un adecuado comportamiento, ya que estará expuesta a cargas concentradas y a tensiones elevadas (Comisión Permanente del Asfalto, 1985).

Los agregados deben de contar con una naturaleza de tal manera que al combinarse con el cemento asfáltico pueda unirse sin desprenderse aunque tenga contacto con el agua o se le apliquen las cargas del tránsito (MTC, 2013). Para la mezcla se recomienda el uso de agregados que tengan características hidrofóbicas, es decir que repelen el agua y puedan tener mayor afinidad con el cemento asfáltico.

a. Agregado grueso

Se denomina de esta manera por el tamaño característico de la partícula, son porciones de agregado retenido dentro del tamiz N°4 (4.75mm) (MTC, 2013). Son obtenidos de la trituración de las rocas o escorias o de gravas o ya sea de la unión de estas; las partículas deben ser alargadas y chatas, y deben de estar limpias de polvo, tierra o alguna sustancia que pueda interferir en la unión con el cemento asfáltico (MTC, 2013). En la Tabla 3 se encuentran las especificaciones y requerimientos que deben cumplir los ensayos:

Tabla 3

Ensayos del agregado grueso

Ensayo	Especificaciones
	≤3000 msnm
Durabilidad	<18%
Abrasión de Los Ángeles	<40%
Adherencia	95
Índice de Durabilidad	>35%
Partículas chatas y alargadas	<10%
Caras fracturadas	85/50
Sales Solubles Totales	<0.5%
Absorción	<1%

Nota. Manual de carreteras (2013): Especificaciones técnicas: Generales para construcción. Pág 560.

A modo de excepción, para el ensayo de absorción la norma acepta porcentajes superiores si es que se demuestra que las mezclas asfálticas cuentan con un óptimo comportamiento de durabilidad. Para el valor de “85/50” dentro del ensayo de Caras fracturadas hace referencia a que el 85% del agregado grueso posee fracturada una cara, mientras que el 50% cuenta con dos de sus caras fracturadas.

b. Agregado fino

Estos agregados contienen partículas finas y es el material comprendido entre los tamices N° 4 y N°200 (4.75 mm y 75 μ m) y provienen solo de la arena de trituración o de la mezcla de ella junto con arena natural. Este agregado deberá ser duro, y con una superficie rugosa y angular, a la misma vez debe permanecer libre de alguna sustancia para no impedir la adherencia con el cemento asfáltico (MTC, 2013).

La proporción necesaria del agregado fino para la mezcla será establecida en el cálculo de su diseño, y previo a esto, el agregado debe de cumplir con las especificaciones mostradas en la Tabla 4:

Tabla 4

Ensayos del agregado fino

Ensayo	Especificaciones
	≤ 3000 msnm
Equivalente de arena	60%
Angularidad del agregado fino	30
Azul de metileno	<8
Índice de plasticidad	NP
Índice de durabilidad	>35
Índice de plasticidad	<4
Sales solubles totales	<0.5%
Absorción	<0.5%

Nota. Manual de carreteras (2013). Pág 560.

Para el ensayo de absorción, la norma aceptará un porcentaje mayor solo si se asegura la propiedad de durabilidad en la mezcla.

c. Filler

Es un polvo mineral o llenante que pasa por el tamiz N°200 (75 μm) que proviene de algún producto comercial o del proceso de triturar los agregados, estos pueden ser la cal hidratada, cemento portland, polvo de roca o escoria, ceniza fina o loes (MTC, 2013). Este filler debe ser un material no plástico y su peso unitario aparente debe estar entre 0.5 a 0.8 g/cm³, mientras que su coeficiente de emulsibilidad debe ser menor a 0.6 (MTC, 2013).

Su uso dentro de las MAC tiene como objetivo complementar la granulometría de los agregados finos.

La mezcla de los tres materiales explicados, tiene que cumplir con las especificaciones de la norma, esta debe estar limpia y libre de arcilla, por último se aceptará que el límite de partículas deleznable sea el 1%.

2.3.5. Ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA)

a. Caña de azúcar

Es una planta herbácea y terrestre de gran tamaño con un conjunto de raíces fibrosas poco profundas, cultivada en los países con climas tropicales y subtropicales (Rein, 2012). Es considerada una de las plantas más eficientes, puesto que genera gran cantidad de hojas y tallos (caña), y en su edad madura, el 50% de su biomasa es en modo de fibra y azúcar. En la Figura 8 observamos una zona de cultivación de la caña de azúcar.

Figura 8

Cultivo de caña de azúcar



Nota. Instituto Colombiano Agropecuario – ICA

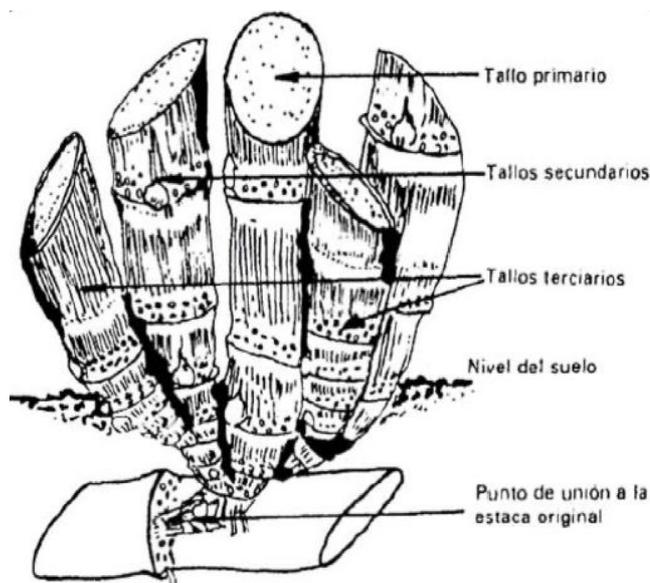
“El Perú es un país productor de caña de azúcar desde el siglo XVI” (MIDAGRI, 2017, p. 3). En los últimos años, en el país la producción de la caña de azúcar ha llegado a alcanzar más de 9 millones de toneladas, siendo los departamentos con mayor producción La Libertad (4.705.541 t), Lambayeque (2.267.691 t), Lima (1.525.491 t), Áncash (910.075 t) y Arequipa (55.598 t).

b. Estructura y composición química de la caña

“La caña de azúcar está compuesta por tallos, hojas, inflorescencias y semillas” (Mozambani et al., 2006, citado por Marasca et al., 2015, p. 24). La caña (tallos) crece en modo de mata, ya que sus tallos se desarrollan una y otra vez por varios años, de forma ramificada y leñosa. La extensión de sus tallos está en base a las propiedades ambientales del lugar en que se encuentra y la cantidad en la que se utilice (Lopez, 2015). En la Figura 9 se muestra como los tallos son clasificados en primarios, secundarios o terciarios.

Figura 9

Tipos de tallos de la caña de azúcar

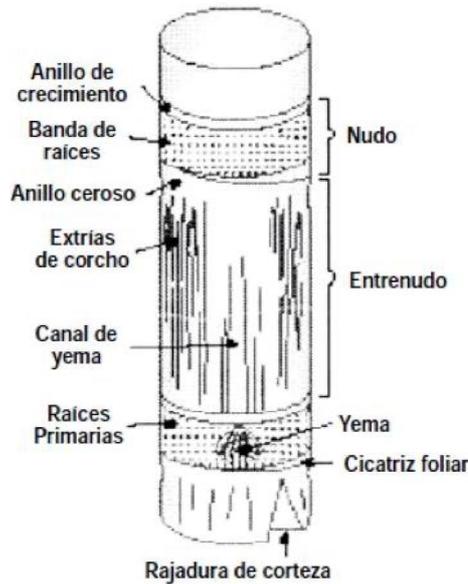


Nota. Osorio, 2007; citado por Lopez (2015). Pág 19.

El tallo tiene una sección transversal de forma circular, no posee ramificaciones en todo su largo, pero cuenta con nudos espaciados entre 150 a 200 mm y a la vez por entrenudos (Blackburn, 1984, citado por Lopez, 2015). En la Figura 10 observamos detalladamente la estructura del tallo de la caña de azúcar.

Figura 10

Estructura del tallo de la caña de azúcar



Nota. Osorio, 2007; citado por Lopez (2015). Pág 19.

El tallo es el elemento más importante de la caña de azúcar y el de mayor interés comercial puesto que aquí se encuentra acumulado el azúcar. Su composición química puede variar de acuerdo a su edad fisiológica, condiciones de temperatura, tipo y forma de cultivo (Marques et al., 2001, citado por Marasca et al., 2015). Sin embargo se puede tener un promedio de su composición plasmado en la Tabla 5.

Tabla 5

Porcentajes promedios de la composición química del tallo

Componentes químicos	Porcentaje
Agua	73 a 76
Sólidos	24 a 27
Sólido soluble (Brix)	10 a 16
Fibras (Seca)	11 a 16

Nota. Meade y Chen, 1977; citado en la investigación de Chaves (2004). Pág 3.

Los tallos están compuestos de agua, sólidos solubles (Sacarosa, azúcares reductores, etc, estos son conocidos como Brix) y fibra (Celulosa y glucosa), donde el agua junto con los sólidos solubles vienen a ser el jugo de la caña de azúcar.

En general, los tallos están compuestos por jugo en un 84% a 89% y fibra seca de 11% a 16%.

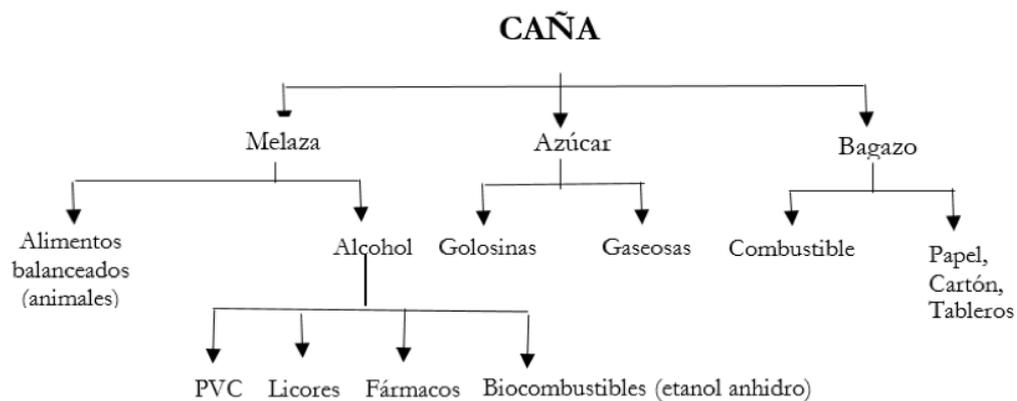
c. Bagazo de caña de azúcar

A lo largo de los años, la caña de azúcar ha sido utilizada para producir azúcar; sin embargo, esta planta también es considerada una gran fuente de materia prima para diferentes tipos de productos (GEPLACEA, 1988; ICIDCA-GEPLACEA-PNUD, 1988; Waganoff et al., 2013; citado en Helfgott, 2016).

Entre ellos tenemos al bagazo, que es el residuo de la caña tras molerla y extraerle todo el jugo. Su uso principal es el de ser combustible, en muchos casos puede obtenerse nuevos productos para brindar insumos en diferentes sectores industriales, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Derivados de la caña de azúcar



Nota. Helfgott (2016)

El bagazo posee 50% de humedad, 5% de sólidos solubles y 45% de sólidos insolubles o fibra cruda. Esta fibra cruda o materia seca se compone de celulosa, hemicelulosa y lignino, y un poco cantidad de ceniza y sacarosa (Rein, 2012).

Desde el punto físico, este tiene un gran contenido de humedad y cuenta con partículas de diferentes tamaños. Por lo que, su manipulación necesita que sea adecuada y eficiente, ya sea en el sector industrial como materia prima o como recurso energético (Roca et al., 2006).

d. Ceniza de bagazo de caña de azúcar

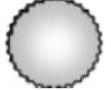
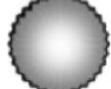
Son partículas quemadas del bagazo, puede utilizarse como material de relleno o aportar en la elaboración de ladrillos o bloques de concreto (Rein, 2012). “ Es utilizado para

mejorar las propiedades mecánicas de hormigones por su característica puzolánica siendo añadido en el cemento como parte de la mezcla” (Mansaneira, Schwantes, Barreto & Martins, 2017; Ramírez, 2020; citado en Palomino y Torres, 2021, p.33).

Esta ceniza también es considerada como un desecho agroindustrial que se da a través del quemado del bagazo de la caña en hornos industriales, en la Figura 12 podemos observar como el bagazo va cambiando de acuerdo al aumento de temperatura. (Mansaneira, Schwantes, Barreto & Martins, 2017; Ramírez, 2020; citado en Palomino y Torres, 2021).

Figura 12

La ceniza a través de diferentes grados de temperatura

	A 100°C se presenta una pérdida inicial de masa, resultante de la evaporación de agua absorbida.
	A 350°C inicia una ignición del material más volátil, aquí es donde inicia la quema del bagazo.
	Entre 400° a 500°C el carbón residual y los óxidos se forman, se observa una pérdida más importante de masa, después de esta etapa la ceniza se convierte en amorfa, rica en sílice.
	El uso de temperaturas por arriba de los 700°C puede llevar a la formación de cuarzos, y niveles aún más elevados de temperatura, pueden crear otras formas cristalinas.
	Encima de los 800°C, la sílice presente en la ceniza del bagazo de caña de azúcar es esencialmente cristalino.

Nota. Obtenido de Chavez C. (2017)

- Composición y propiedades: La ceniza del bagazo cuenta químicamente con una serie de compuestos como el Sílice (SiO_2), aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), esto hace que pueda tener un comportamiento puzolánico (Javed et al., 2020, citado por Palomino y Torres, 2021). Si fuera en algún caso que se adicionara ceniza en el diseño de concreto, el efecto puzolánico haría la reducción del calor de hidratación de los cementos, aumentaría la resistencia al daño por cloruros y sulfatos, y de manera general, mejoraría la durabilidad del concreto (Ribeiro, 2011, citado por Palomino y

Torres, 2021). De este modo, vemos cómo la ceniza de bagazo de caña de azúcar puede considerarse satisfactoriamente dentro de la industria de construcción civil.

2.3.6. Metodología Marshall para el diseño de la MAC

Esta metodología fue planteada por el ingeniero Bruce Marshall con el objetivo de encontrar la cantidad óptima de cemento asfáltico dentro de una mezcla asfáltica.

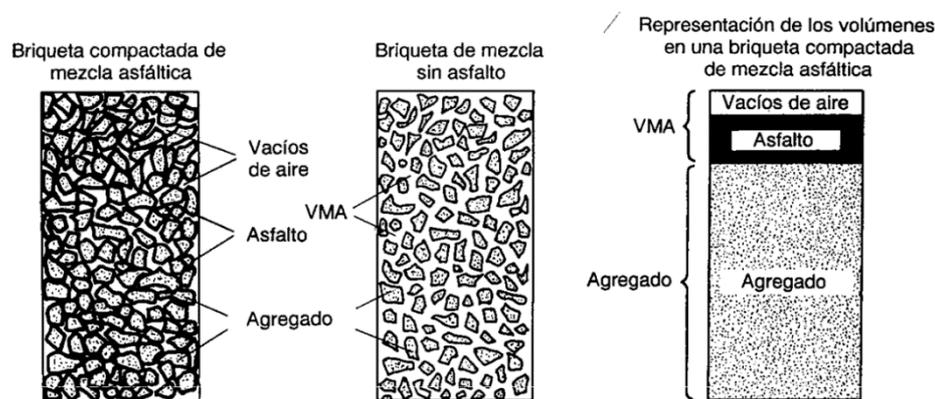
En el método se utiliza una cierta cantidad de briquetas, cada una con la misma característica en sus agregados, pero con distintas cantidades de ligante asfáltico en la mezcla. Marshall dentro de su metodología considera diferentes parámetros para un buen diseño de la mezcla asfáltica:

- Porcentaje de vacíos de aire: Son considerados los espacios de aire que existen entre los agregados de la briketa. Si el porcentaje de vacíos es baja, la mezcla será mucho menos permeable (Rolando, 2002).
- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM): Son los espacios no solo de aire, sino también los espacios que están con cemento asfáltico. Este porcentaje tiene como objetivo medir la durabilidad a través de la cantidad de ligante asfáltico. Si una mezcla tiene muchos VMA, puede ingresar más asfalto ya que habrá mayores espacios disponibles (Rolando, 2002).

En la Figura 13 observamos la composición de una briketa de mezcla asfáltica para comprender su porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Figura 13

Representación del VMA en una briketa de mezcla asfáltica compactada



Nota. Instituto de asfalto, Series de manuales No. 22 (1982)

- Contenido de asfalto: La cantidad de asfalto dentro de la mezcla debe ser la adecuada para obtener las mejores cualidades de la mezcla, este contenido va en relación de la granulometría de los agregados pétreos.
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA): “El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto” (SCT, 2008, p.24).
- Densidad: Es el peso unitario de las mezclas asfálticas compactadas. Si se tiene una mayor densidad, el pavimento tiende a tener un rendimiento más durable.

Uno de los datos más importantes del diseño son los que se obtienen del ensayo de estabilidad y flujo:

- Estabilidad: Capacidad de resistencia a desplazamientos y deformaciones ante las cargas de los vehículos (Instituto de asfalto, 1982). La estabilidad según Marshall es la carga máxima que puede resistir la probeta a 60° C. cuando se realiza la prueba de rotura a compresión.
- Fluencia: Es la longitud de la deformación que hay en la briqueta en centésimas de pulgadas. Esta deformación se da en el diámetro de la probeta por efectos de la plasticidad a través del ensayo de estabilidad. La fluencia se mide desde que la carga está en cero hasta el momento en que la briqueta soporte su carga máxima.

Dentro de cada parámetro de diseño de la mezcla asfáltica en caliente según Marshall, consideramos el tráfico estimado para la operación del proyecto. En la Tabla 6 podemos observar los parámetros a considerar según el tipo de tráfico:

Tabla 6

Parámetros de diseño según el tipo de tráfico

Especificaciones	Tránsito Liviano	Tránsito Mediano	Tránsito Pesado
Compactación, cantidad de golpes en cada cara de la briqueta	35	50	75
Estabilidad N, (kg)	>4530 (461.9)	>5440 (554.7)	>8150 (831.1)
Flujo 0.01 pulgadas, (mm)	8 (2) a 20 (5)	8 (2) a 16 (4)	8 (2) a 14 (3.5)
Porcentaje de vacíos	3 a 5		
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	Ver Tabla		
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70 a 80	65 a 78	65 a 75

Nota. Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción”, Tabla 423-06

En la Tabla 7 se indica el porcentaje de vacíos en el agregado mineral que contiene la muestra de acuerdo al tamaño máximo de la malla que se utilice.

Tabla 7

Especificaciones para el VMA

Tamaño máximo In (mm.)	VMA Mínimo, por ciento		
	3	4	5
Nº 16 (1.18 mm)	21.5	22.5	23.5
Nº 8 (2.36 mm)	19	20	21
Nº 4 (4.75 mm)	16	17	18
3/8" (9.50 mm)	14	15	16
1/2" (12.50 mm)	13	14	15
3/4" (19.00 mm)	12	13	14
1" (25.00 mm)	11	12	13
1.5" (37.50 mm)	10	11	12
2" (50 mm)	9.5	10.5	11.5
2.5" (63 mm)	9	10	11

Nota. Adaptado de Huamán (2023). Unidad 4: Mezclas asfálticas.

2.4. Definición de términos básicos

- a. Ligante asfáltico: Material que sirve para adherir elementos ya que cuenta con características aglomerantes, son de apariencia de color oscuro y está conformada por hidrocarburos (Padilla, 2004).
- b. Mástico asfáltico: Mortero muy delgado de la combinación del filler con el asfalto, esto mejora la adherencia y cohesión con los agregados (Huamán, 2023).
- c. IMDA: Representa el promedio aritmético de los volúmenes de vehículos diarios en una sección de la vía para todos los días del año, previsibles o presentes. Su conocimiento proporciona una comprensión cuantitativa de la relevancia del camino en la sección en cuestión y permite realizar los cálculos de factibilidad económica (MTC, 2014).
- d. Plantas asfálticas: Es la conformación de diferentes maquinarias electrónicas y mecánicas para mezclar agregados previamente templados, secados con CAP para obtener a altas temperaturas una MAC (Huamán, 2023).

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis General

El porcentaje óptimo de ceniza de bagazo de caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente mejorará sus propiedades mecánicas para la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023.

3.2. Hipótesis Específicas

- a. El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar mejora la estabilidad en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall
- b. El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar disminuye la fluencia en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

3.3. Relación entre variables

3.3.1. Identificación de variables

- Variable independiente: Ceniza de bagazo de caña de azúcar

Son las partículas quemadas del bagazo, que puede utilizarse como material de relleno o aportar en la elaboración de elementos de construcción. La ceniza del bagazo cuenta químicamente con una serie de compuestos como el Sílice (SiO_2), aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), esto hace que pueda tener un comportamiento puzolánico.

- Variable dependiente: Propiedades mecánicas

Las mezclas asfálticas tienen diferentes propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas con las cargas exteriores que puedan soportar. Las propiedades mecánicas de las mezclas son: Estabilidad y fluencia.

3.3.2. Operacionalización de variables

Tabla 8

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	ÍNDICE	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO	HERRAMIENTAS	ÍTEMS
Ceniza de bagazo de la caña de azúcar	Son las partículas quemadas del bagazo, que puede utilizarse como material de relleno o aportar en la elaboración de elementos de construcción (Rein, 2012). La ceniza del bagazo cuenta químicamente con una serie de compuestos como el Sílice (SiO ₂), aluminio (Al ₂ O ₃) y óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), esto hace que pueda tener un comportamiento puzolánico.	La utilización como puzolana de los desechos de la agricultura requiere calcinación previa, pero la actividad puzolánica varía sustancialmente como resultado de las condiciones de calcinación y la naturaleza de los materiales de origen que se utilizarán.	Actividad puzolánica	Calcinación	Temperatura	°C	Cuantitativa continua	Horno industrial	Investigaciones antecedentes	Indicado en los formatos
				Naturaleza de la ceniza	Cantidad de adición	gr		Diseño de mezcla asfáltica en caliente	MTC SECCIÓN 423	
Propiedades Mecánicas	Las mezclas asfálticas tienen diferentes propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas con las cargas exteriores que puedan soportar. Las propiedades mecánicas de las mezclas son: Estabilidad y fluencia.	En una mezcla asfáltica en caliente se espera que conserve durante su vida útil sus propiedades mecánicas, como es la estabilidad, relacionada con la resistencia a las cargas de los vehículos y la fluencia, que es la longitud de deformación de la mezcla en función de la carga soportada.	Estabilidad	Resistencia	Carga soportada	Kg	Cuantitativa continua	Ensayo Marshall	MTC E 504 ASTM-D6926 ATM D 6927	
			Fluencia	Deformación	Longitud	mm				

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y método de investigación

4.1.1. Método de investigación

El método de la presente investigación es de forma deductiva, ya que validamos nuestra hipótesis general para luego tener la constatación de nuestras específicas.

4.1.2. Orientación de investigación

Es una investigación de forma aplicada porque está destinada a aplicar soluciones a problemas; en este caso, el de mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a través del uso de la caña de azúcar.

4.1.3. Enfoque de investigación

La tesis es de enfoque cuantitativa, ya que realizamos una medición de datos sólidos procesados y controlados, medimos qué cantidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar puede optimizar las propiedades mecánicas de las MAC.

4.1.4. Fuente de información

La fuente es de forma retrolectiva, porque tomamos en consideración fuentes con información existente, ya sea de antecedentes, manuales, normas para la realización del marco.

4.2. Tipo de investigación

Es descriptivo tal que describiremos cómo actúa las propiedades mecánicas de una mezcla en caliente, como la estabilidad – flujo, resistencia a la deformación, de tal manera se podrá ver si disminuye o aumenta sus propiedades.

4.3. Nivel de investigación

Es de enfoque descriptivo ya que se utilizará gráficas y tablas granulométricas que permitan analizar los resultados obtenidos para así poder dar respuesta a las interrogantes planteadas de dicha investigación.

4.4. Diseño de la investigación

Es de un diseño experimental, ya que se pudo manejar el uso de la variable independiente, a través de ensayos de laboratorios y con ello ver qué cantidad de porcentaje de ceniza era la adecuada; de diseño longitudinal, porque se realizaron más de una medición para realizar comparativas y obtener los resultados; y prospectiva porque la recolección de datos se realizó después de ya tener planificado el estudio (al saber los ensayos adecuados y el diseño de la mezcla definido).

4.5. Población de estudio

La población de nuestra investigación se encuentra comprendida por las mezclas asfálticas en caliente para carreteras de tráfico pesado en la ciudad de Lima.

4.6. Diseño muestral

Se encuentra comprendida por 36 briquetas que serán sometidas a los ensayos de laboratorio, 9 de ellas son de mezclas asfálticas convencionales y las otras 27 a briquetas de mezclas asfálticas modificadas con ceniza de bagazo de la caña de azúcar.

4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se realizó los diseños de mezclas asfálticas en caliente a través la Metodología Marshall, donde se encontró la estabilidad y fluencia de las mezclas que luego se obtuvo y analizó los resultados según las especificaciones AASHTO. Los instrumentos para la recolección de datos que utilizamos fueron planillas y formatos de los ensayos considerando las especificaciones que se encuentran dentro de la norma.

4.8. Procedimiento para la recolección de datos

Dentro de la realización de la presente investigación, se tomaron en cuenta una serie de pasos conformado por los siguientes puntos:

- a. Obtención de los agregados, ceniza de bagazo de caña de azúcar y cemento asfáltico de petróleo

Los agregados pétreos fueron obtenidos de la cantera Seoing; en el caso de la ceniza, se obtuvo el bagazo de caña de azúcar y luego se procedió a quemarlo; por último, el cemento asfáltico de petróleo fue un PEN 60/70.

- b. Diseño de la MAC convencional

Se realizó el diseño teniendo en cuenta las granulometrías de cada uno de los agregados y las especificaciones de los tipos de MAC (Tabla 2), dando como resultado una MAC-2.

En las Figura 14 y Figura 15 se muestra el diseño de la curva granulométrica para las mezclas convencionales:

Figura 14

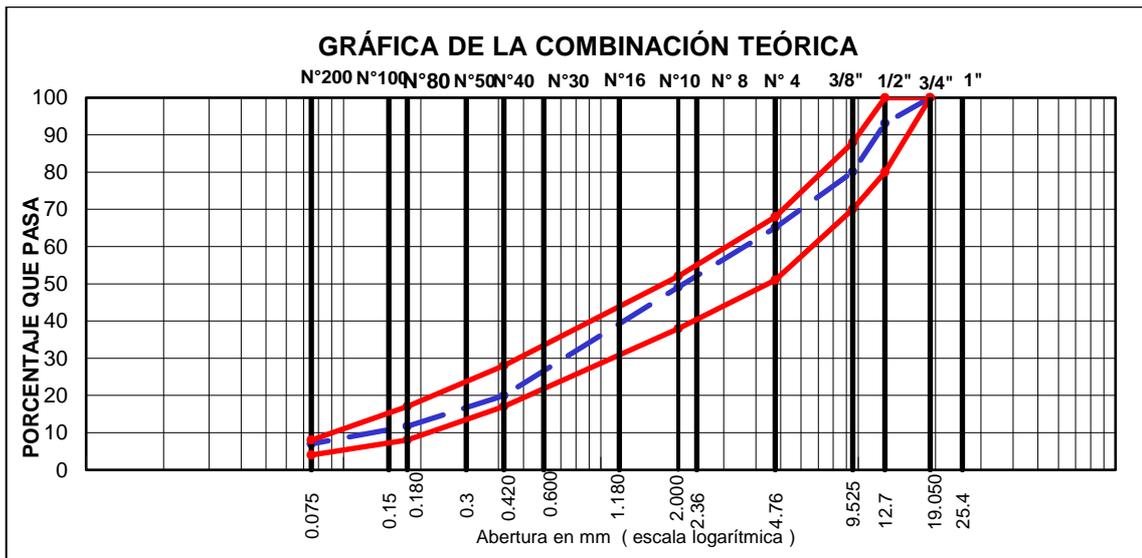
Granulometría para la mezcla asfáltica convencional

TAMICEZ		Mezcla MAC - 2				
		Grava Triturada	Arena Triturada	Comb. Teórica	Especific. MAC - 2	
		< 3/8"	< 1/4"			
		36.0%	64.0%			
1 1/2"	38.100			100.0		
1	25.400			100.0		
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	80.8	100.0	93.1	80	100
3/8"	9.525	44.6	100.0	80.1	70	88
# 4	4.760	3.3	99.7	65.0	51	68
# 8	2.360	0.0	84.2	53.9		
# 10	2.000	0.8	76.2	49.1	38	52
# 16	1.180	0.0	56.0	35.8		
# 30	0.600	0.0	38.6	24.7		
# 40	0.420	0.0	31.2	20.0	17	28
# 50	0.300	0.0	25.3	16.2		
# 80	0.177	0.0	18.4	11.7	8	17
# 100	0.150	0.0	16.2	10.4		
# 200	0.075	0.0	10.9	7.0	4	8

Nota. Elaboración propia

Figura 15

Curva granulométrica de la mezcla asfáltica convencional



Nota. Elaboración propia

c. Diseño de la MAC modificada

Se hizo el diseño con la granulometría de los agregados anteriores, solo que se le consideró la granulometría de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, como se muestran en las Figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21:

Figura 16

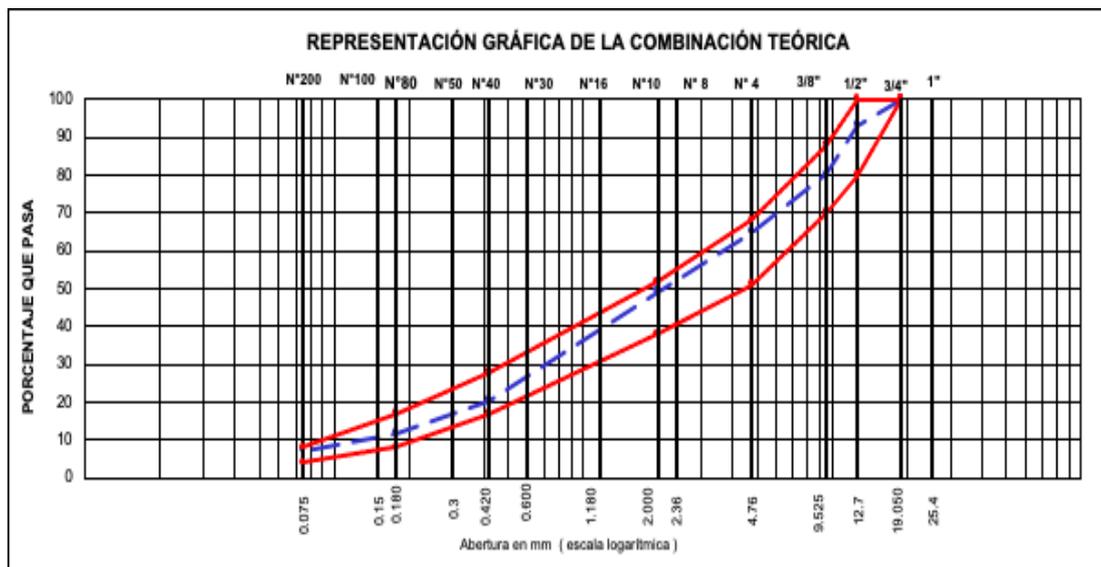
Granulometría de la mezcla asfáltica con 0.5% de CBCA

TAMICEZ					Mezcla MAC - 2		
		Ceniza de bagazo de la caña de azúcar	Grava Triturada < 3/8"	Arena Triturada < 1/4"	Comb. Teórica	Específic. MAC - 2	
						0.5%	36.0%
1 1/2"	38.100				100.0		
1	25.400				100.0		
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	100.0	80.8	100.0	93.1	80	100
3/8"	9.525	100.0	44.6	100.0	80.1	70	88
# 4	4.760	100.0	3.3	99.7	65.0	51	68
# 8	2.380	100.0	0.0	84.2	54.0		
# 10	2.000	100.0	0.8	76.2	49.2	38	52
# 16	1.180	100.0	0.0	56.0	36.1		
# 30	0.600	84.7	0.0	38.6	24.9		
# 40	0.420	69.9	0.0	31.2	20.2	17	28
# 50	0.300	57.6	0.0	25.3	16.3		
# 80	0.177	40.5	0.0	18.4	11.9	8	17
# 100	0.150	38.5	0.0	16.2	10.5		
# 200	0.075	37.2	0.0	10.9	7.1	4	8

Nota. Elaboración propia

Figura 17

Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 0.5% de CBCA



Nota. Elaboración propia

Figura 18

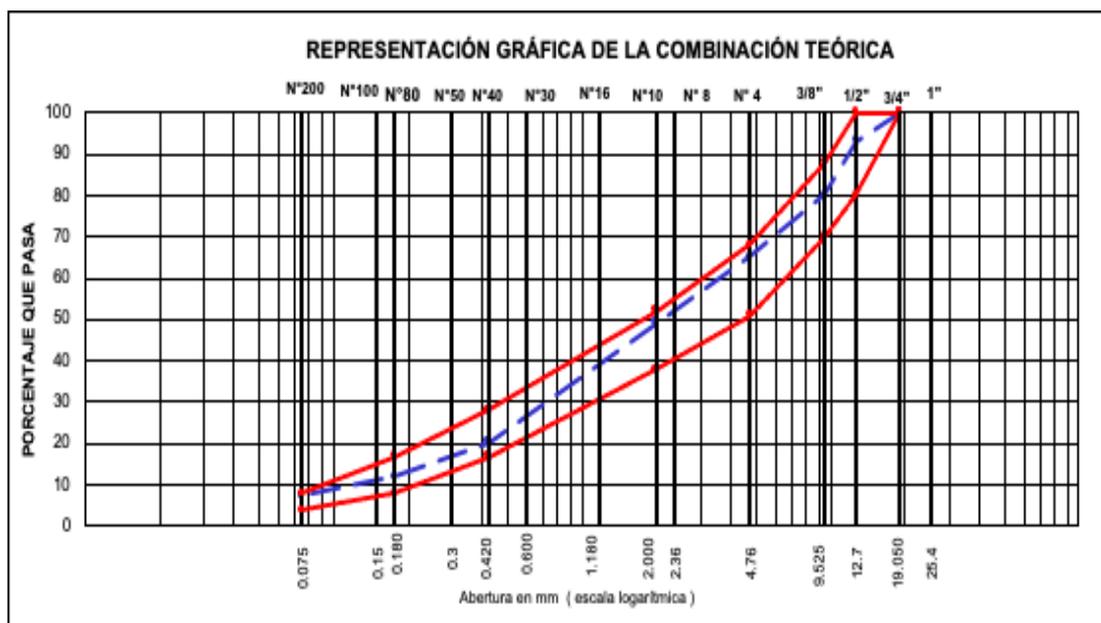
Granulometría de la mezcla asfáltica con 1.0% de CBCA

TAMICEZ					Mezcla MAC - 2		
		Ceniza de bagazo de la caña de azúcar	Grava Triturada < 3/8"	Arena Triturada < 1/4"	Comb. Teórica	Especific. MAC - 2	
		1.0%	36.0%	63.0%			
1 1/2"	38.100				100.0		
1	25.400				100.0		
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	100.0	80.8	100.0	93.1	80	100
3/8"	9.525	100.0	44.6	100.0	80.1	70	88
# 4	4.760	100.0	3.3	99.7	65.0	51	68
# 8	2.360	100.0	0.0	84.2	54.0		
# 10	2.000	100.0	0.8	76.2	49.3	38	52
# 16	1.180	100.0	0.0	56.0	36.3		
# 30	0.600	84.7	0.0	38.6	25.2		
# 40	0.420	69.9	0.0	31.2	20.4	17	28
# 50	0.300	57.6	0.0	25.3	16.5		
# 80	0.177	40.5	0.0	18.4	12.0	8	17
# 100	0.150	38.5	0.0	16.2	10.6		
# 200	0.075	37.2	0.0	10.9	7.3	4	8

Nota. Elaboración propia

Figura 19

Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 1.0% de CBCA



Nota. Elaboración propia

Figura 20

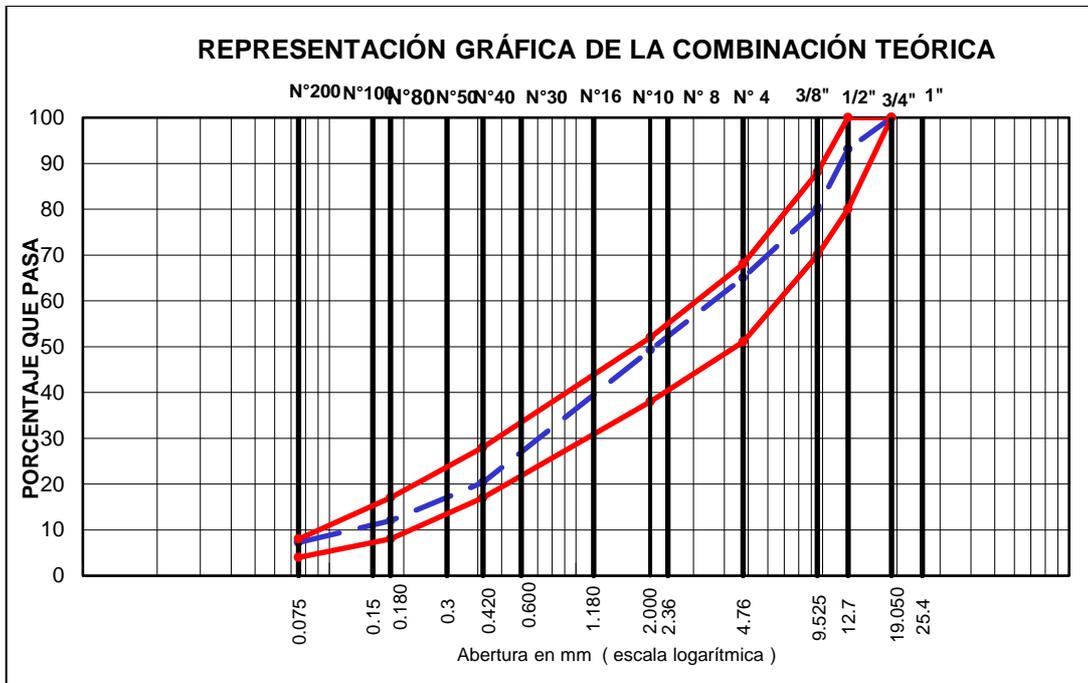
Granulometría de la mezcla asfáltica con 1.5% de CBCA

TAMICEZ					Mezcla MAC - 2		
		Ceniza de bagazo de la caña de azúcar	Grava Triturada < 3/8"	Arena Triturada < 1/4"	Comb. Teórica	Específic. MAC - 2	
		1.5%	36.0%	62.5%			
1 1/2"	38.100				100.0		
1	25.400				100.0		
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	100.0	80.8	100.0	93.1	80	100
3/8"	9.525	100.0	44.6	100.0	80.1	70	88
# 4	4.760	100.0	3.3	99.7	65.0	51	68
# 8	2.380	100.0	0.0	84.2	54.1		
# 10	2.000	100.0	0.8	76.2	49.4	38	52
# 16	1.180	100.0	0.0	56.0	36.5		
# 30	0.600	84.7	0.0	38.6	25.4		
# 40	0.420	69.9	0.0	31.2	20.6	17	28
# 50	0.300	57.6	0.0	25.3	16.7		
# 80	0.177	40.5	0.0	18.4	12.1	8	17
# 100	0.150	38.5	0.0	16.2	10.7		
# 200	0.075	37.2	0.0	10.9	7.4	4	8

Nota. Elaboración propia

Figura 21

Curva granulométrica de la mezcla asfáltica con 1.5% de CBCA



Nota. Elaboración propia

d. Preparación de las briquetas

Al tener nuestro diseño y las cantidades definidas para realizar la mezcla de cada muestra, se procedió a realizar las briquetas empezando por el secado de los agregados en una temperatura de 105°C a 110°C y luego su medición de acuerdo al diseño, luego se agregó la ceniza y por último, el cemento asfáltico de petróleo, ambos previamente calentados. Al tener listo las mezclas, se procedió a compactarlas de acuerdo al tipo de tráfico evaluado. En las siguientes imágenes podemos ver las briquetas compactadas elaboradas por mezclas asfálticas de forma convencional como las que se elaboraron con adición de ceniza.

En la Figura 22 se observa las briquetas convencionales de 5%, 5.5% y 6% de asfalto que se elaboraron.

Figura 22

Briquetas compactadas convencionales



Nota. Elaboración propia

En la Figura 23 se muestran las 9 briquetas elaboradas y modificadas con el 0.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 23

Briquetas compactadas modificadas con 0.5% CBCA



Nota. Elaboración propia

En la Figura 24 se encuentran las briquetas elaboradas y modificadas con el 1% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 24

Briquetas compactadas modificadas con 1.0% CBCA



Nota. Elaboración propia

En la Figura 25 se observan las briquetas que fueron realizadas con el 1.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 25

Briquetas compactadas modificadas con 1.5% CBCA



Nota. Elaboración propia

e. Realización de ensayos

Se elaboraron los ensayos de Peso específico aparente y unitario (Densidad Bulk) para mezclas asfálticas compactadas según la norma MTC E 514, el cual consistía en medir los pesos secos de cada muestra a temperatura ambiente, el peso de los especímenes sumergidos en agua a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ por un tiempo de 5 min y el peso de las muestras saturadas superficialmente secas, con esos tres datos se realizaron los cálculos pertinentes.

Luego, el ensayo de Peso específico teórico máximo (Rice) de la norma MTC E 508, en el cual se tomó el peso de la muestra fría a temperatura ambiente. Posteriormente, se cubrió con agua a una temperatura de 25°C y se removió los vacíos de aire por un rango

de 15 minutos, se volvió a cubrir con agua completamente y con ello se determinó el peso de la muestra sumergida.

Por último, se realizaron los ensayos de Estabilidad y flujo, el cual consistió en sumergir los especímenes a un baño maría de 60°C por un periodo de 30 min., al terminarse el tiempo, se secaron las muestras superficialmente y se colocaron en el equipo Marshall para aplicarle la carga de compresión a una velocidad de 50 ± 1 mm/min hasta que la briqueta falle.

4.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento se utilizaron los formatos en excel para la realización de cálculos y gráficas, tomando en cuenta las fórmulas brindadas por las normas técnicas, con ello se realizó interpolaciones y luego se analizó cada resultado por medio de los parámetros que se indican en los manuales técnicos peruanos.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Recolección de datos

5.1.1. Agregados pétreos

Se hizo la selección de los agregados gruesos y finos extraídos de la cantera SEOING y luego se realizaron los ensayos correspondientes para usarse dentro del diseño de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con ceniza. Los materiales cumplieron con las especificaciones dadas por el Manual de ensayo de materiales, 2016. En la Figura 26 se muestran los agregados que fueron utilizados para la elaboración de las briquetas.

Figura 26

Agregados pétreos tamizados y usados para las mezclas asfálticas



Nota. Elaboración propia

5.1.2. CAP - Cemento asfáltico de petróleo

El ligante utilizado en mezclas asfálticas en caliente debe ser elegido tomándose en cuenta la temperatura en la que se encuentra el lugar del proyecto. El CAP fue evaluado manteniendo conformidad con las características técnicas definida por la norma peruana. En este caso se utilizó el PEN 60/70, ya que la zona evaluada para aplicar la mezcla

asfáltica es en el departamento de Lima, que cuenta con una temperatura promedio de 19°C a 23°C.

En la Tabla 9 se mencionan las especificaciones del cemento asfáltico utilizado en la elaboración de las muestras.

Tabla 9

Características del cemento asfáltico de petróleo

Especificaciones	Dato
Ligante asfáltico	Cemento asfáltico de petróleo
Nombre	Asfalto sólido 60/70 PEN
Lugar de servicio	Lima
Temperatura de servicio	19° a 23°C

Nota. Elaboración propia

5.1.3. Ceniza de bagazo de caña de azúcar

El bagazo fue adquirido en zonas con venta de insumos de la caña de azúcar ubicados en el departamento de Lima. Al tener el bagazo, este se hizo secar por un periodo de dos a tres días, para posteriormente proceder a quemarlo. Se utilizó un horno industrial de acero, donde se colocó el bagazo de caña de azúcar seco (Figura 27) hasta llegar a la temperatura aproximada de 500° C, haciendo que toda la materia se convierta en ceniza (Figura 28).

Figura 27

Colocación del Bagazo de caña de azúcar en horno



Nota. Elaboración propia

Figura 28

Ceniza de bagazo de caña de azúcar obtenido

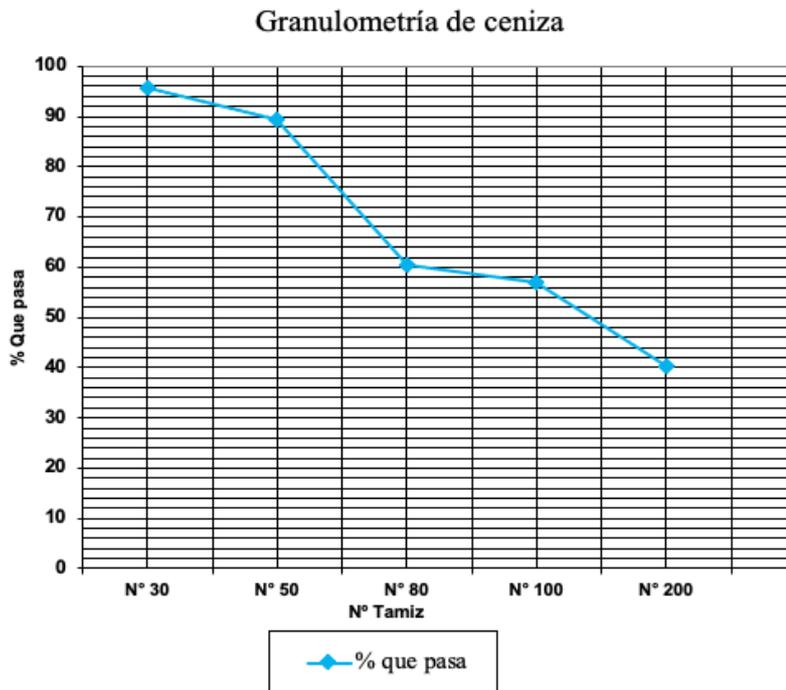


Nota. Elaboración propia

Por último, al tener la ceniza realizamos la granulometría del material (Figura 29) para considerarse dentro del diseño de la mezcla:

Figura 29

Granulometría de bagazo de caña de azúcar



Nota. Elaboración propia

Como gravedad específica del material, consideramos la investigación de Guerrero (2020) dándole un valor de 1.57 gr/cm³.

5.1.4. Mezclas asfálticas en caliente

Se realizaron diseños de las mezclas asfálticas convencionales para 3 porcentajes de diseño, estos fueron de 5.0%, 5.5% y 6.0%, siendo igual a 9 briquetas y así encontrarse la cantidad óptima de asfalto dentro de la mezcla convencional al igual que sus parámetros. En la Figura 30 se muestran las muestras de mezclas asfálticas convencionales.

Figura 30

Briquetas de mezcla asfáltica patrón



Nota. Elaboración propia

Por otro lado, para la mezcla asfáltica modificada, se elaboraron 3 diseños con el objetivo de evaluar con qué contenido de ceniza la mezcla logra a tener un mejor comportamiento; el primero fue de 0.5% de ceniza; el segundo, de 1.0%; y por último, el tercero de 1.5%, los tres porcentajes de ceniza fueron analizados para diferentes cantidades de asfalto, las cuales fueron 5.0%, 5.5% y 6.0%, dando un total de 27 briquetas con mezcla asfáltica modificada de ceniza de bagazo de caña de azúcar mostradas en la Figura 31.

Figura 31

Briquetas de mezcla asfáltica en caliente con ceniza



Nota. Elaboración propia

5.2. Procesamiento de datos

5.2.1. Ensayos de las MAC por el método Marshall

Luego de haberse evaluado los materiales que se utilizaron en la elaboración de las mezclas y haberse detallado los porcentajes de diseño de cada briqueta, se realizaron los ensayos pertinentes. Se consideró dentro del diseño de las convencionales como de las modificadas una compactación para un tráfico de tipo pesado, por lo que se realizaron una cantidad de 75 golpes a cada lado de la muestra. Al haber tenido las muestras compactadas, se identificaron cada una de ellas y se dejaron reposar por un periodo de 24hr para después realizarse los ensayos de Estabilidad y flujo, previo a esto se realizaron los ensayos de Densidad Bulk y Rice.

En la Figura 32 se muestra como la briqueta se encuentra sumergida para obtener los datos necesario del ensayo de densidad Bulk.

Figura 32

Ensayo de densidad Bulk



Nota. Elaboración propia

En la Figura 33 se observa como a la mezcla sumergida en agua se le está extrayendo las burbujas de aire para la realización del ensayo Rice.

Figura 33

Ensayo Rice



Nota. Elaboración propia

Para realizarse las pruebas de Estabilidad y flujo de cada una de las briquetas, primero se sumergieron las muestras a baño maría a una temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 minutos, tal y como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Briquetas puestas en baño maría



Nota. Elaboración propia

Pasado el tiempo se procedió a colocarse las mordazas en la parte superior e inferior de cada una de las muestras, para ser puestas en el Equipo Marshall y aplicar la carga hasta

que fallen. En la Figura 35 se observa como la briqueta ya se encuentra colocada dentro de las mordazas lista para realizar el ensayo.

Figura 35

Ensayo de Estabilidad y flujo en las muestras



Nota. Elaboración propia

5.3. Resultados de los ensayos

5.3.1. Mezcla asfáltica en caliente convencional

En el ensayo realizado de Peso específico aparente y unitario, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 10:

Tabla 10

Datos obtenidos de los ensayos de pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras de mac convencional

	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Peso seco en aire (gr)	1	1197.1	1225.5	1221.2
	2	1221.7	1222.4	1221.3
	3	1211.3	1222.2	1218.4
	1	1202.2	1226.1	1221.1

Peso en aire	2	1223.1	1223.3	1221.1
sss	3	1212.2	1222.7	1218.2
	1	667.9	704.7	703
Peso en agua	2	692.5	703.7	707.4
	3	686.6	704.4	702.8

Nota. Elaboración propia

Para obtener los resultados del ensayo aplicamos lo siguiente:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B-C} \dots (1)$$

Donde: A: Peso seco en aire

B: Peso en aire sss

C: Peso en agua

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos para el peso específico aparente de cada muestra convencional realizada.

Tabla 11

Pesos específicos aparentes de cada briqueta convencional

	Nº Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Peso	1	2.24	2.35	2.36
específico	2	2.30	2.35	2.38
aparente	3	2.30	2.36	2.36

Nota. Elaboración propia

Realizamos el promedio para cada porcentaje de asfalto y calculamos los pesos unitarios promedios mencionados en la Tabla 12.

Tabla 12

Resultados de los pesos específicos aparentes y pesos unitarios promedios de las muestras de mac convencional

	% CAP		
	5%	5.50%	6%
P esp. ap. promedio	2.28	2.35	2.37

P unitario promedio	2.28	2.35	2.36
---------------------	-------------	-------------	-------------

Nota. Elaboración propia

Para el ensayo de pesos específicos teóricos máximos se tomó en cuenta la fórmula siguiente:

$$\text{Peso específico teórico máx.} = \frac{A}{A-C} \dots (2)$$

Donde: A: Peso seco al aire

C: Peso en agua

Obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 13:

Tabla 13

Pesos específicos teóricos máximos de las muestras de mac convencional

Contenido de asfalto	5%	5.50%	6%
Peso específico teórico máx.	2.47	2.46	2.43

Nota. Elaboración propia

Tras obtener los cálculos de los pesos específicos, se realizaron los ensayos correspondientes de Marshall a las briquetas, donde se obtuvieron los siguientes resultados de estabilidad y flujo colocados en la Tabla 14 para cada una de las tres muestras realizadas para los 3 porcentajes de asfalto: 5%, 5.5% y 6%.

Tabla 14

Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras de mac convencional

		% CAP			
		Nº Briquetas	5%	5.50%	6%
Estabilidad (Kg)	1		699.6	1427.1	1598.4
	2		1211.9	1481.0	1601.9
	3		1108.5	1582.5	1590.8
	Prom		1006.7	1496.9	1597.0
Flujo (mm)	1		6.35	3.43	3.81
	2		3.56	2.29	4.32
	3		2.79	3.30	5.08
	Prom		4.23	3.01	4.40

Nota. Elaboración propia

Con ello, se obtuvo que el diseño óptimo convencional es con un contenido de 5.7 % de asfalto, mediante el cálculo de la línea de tendencia y cumpliéndose los parámetros de la norma, se dio como resultado la siguiente Tabla 15:

Tabla 15

Resultados generales de la mezcla convencional

MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL ÓPTIMA			
Especificaciones	Resultado	Norma	Evaluación
CAP PEN 60/70	5.7	Según diseño	
Peso unitario (g/cm ³)	2.37	Según diseño	
Vacíos (%)	3.6	3 a 5	Cumple
VMA (%)	15.7	>14.4	Cumple
Estabilidad (Kg)	1583.7	>831	Cumple
Flujo (mm)	3.3	2 a 3.5	Cumple
Estabilidad/flujo	5012.2	1700-4000	-

Nota. Elaboración propia

5.3.2. Mezcla asfáltica en caliente con ceniza

Al realizarse los ensayos correspondientes con la adición de ceniza, se obtuvieron los resultados de sus pesos específicos aparentes y de los pesos unitarios, considerando la fórmula (1).

Para 0.5% de ceniza los resultados fueron los mostrados en la Tabla 16:

Tabla 16

Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 0.5% de ceniza

MAC con 0.5% de ceniza	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Peso seco en aire (gr)	1	1222.9	1221.1	1219.5
	2	1218.9	1221.5	1222.1
	3	1221.4	1219.8	1225.3
Peso en aire sss	1	1225.1	1222.6	1221
	2	1221.8	1224.2	1224

	3	1224.2	1221.1	1225.9
Peso en agua	1	697.8	705.1	704.8
	2	699.5	703.1	713.3
	3	703.2	702.8	704.7
Peso específico aparente	1	2.32	2.36	2.36
	2	2.33	2.34	2.39
	3	2.34	2.35	2.35
P esp. ap. promedio	-	2.33	2.35	2.37
P unitario promedio	-	2.33	2.35	2.36

Nota. Elaboración propia

Así como también del ensayo de su peso específico teórico máximo para cada uno de los porcentajes de ceniza, especificado con la fórmula (2). En la Tabla 17 se observan los siguientes resultados:

Tabla 17

Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 0.5% de ceniza

Contenido de asfalto	5.00%	5.50%	6.00%
Peso específico teórico máx.	2.46	2.43	2.43

Nota. Elaboración propia

Para 1.0% de ceniza se obtuvo la Tabla 18 como resultados de los pesos específicos aparentes y unitarios, y en la Tabla 19, los resultados de los pesos específicos teóricos máximos:

Tabla 18

Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 1.0% de ceniza

MAC con 1.0% de ceniza	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Peso seco en aire (gr)	1	1215.9	1220.6	1221.5
	2	1217.6	1223	1218.7
	3	1216.9	1220.4	1224.4
Peso en aire sss	1	1218.8	1223.4	1221.9
	2	1218.9	1224.8	1220.1
	3	1220.6	1221.2	1225.4

Peso en agua	1	696.2	703.6	709.9
	2	699	706.5	703.2
	3	686.9	708.6	709.2
Peso específico aparente	1	2.33	2.35	2.39
	2	2.34	2.36	2.36
	3	2.28	2.38	2.37
P esp. ap. promedio	-	2.32	2.36	2.37
P unitario promedio	-	2.31	2.36	2.36

Nota. Elaboración propia

Tabla 19

Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 1.0% de ceniza

Contenido de asfalto	5.00%	5.50%	6.00%
Peso específico teórico máx.	2.46	2.45	2.44

Nota. Elaboración propia

Para el tercer porcentaje de 1.5% se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 20 y Tabla 21:

Tabla 20

Pesos específicos aparentes y pesos unitarios de las muestras con 1.5% de ceniza

MAC con 1.5% de ceniza	Nº Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Peso seco en aire (gr)	1	1219.3	1212.8	1219.5
	2	1219.6	1216.7	1213.6
	3	1218.8	1219.1	1217.8
Peso en aire sss	1	1220.5	1213	1220.3
	2	1221	1217.1	1213.8
	3	1220.8	1219.5	1218.2
Peso en agua	1	697.6	701.7	704
	2	693.7	703.7	696.5
	3	692.2	703.7	685.5
Peso específico aparente	1	2.33	2.37	2.36
	2	2.31	2.37	2.35
	3	2.31	2.36	2.29

P esp. ap. promedio	-	2.32	2.37	2.33
P unitario promedio	-	2.31	2.36	2.32

Nota. Elaboración propia

Tabla 21

Pesos específicos teóricos máximos de las muestras con 1.5% de ceniza

Contenido de asfalto	5.00%	5.50%	6.00%
Peso específico teórico máx.	2.45	2.45	2.42

Nota. Elaboración propia

En los ensayos de estabilidad y flujo de cada muestra de diseño se obtuvieron los valores de la Tabla 22 para un 0.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar:

Tabla 22

Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 0.5% de ceniza

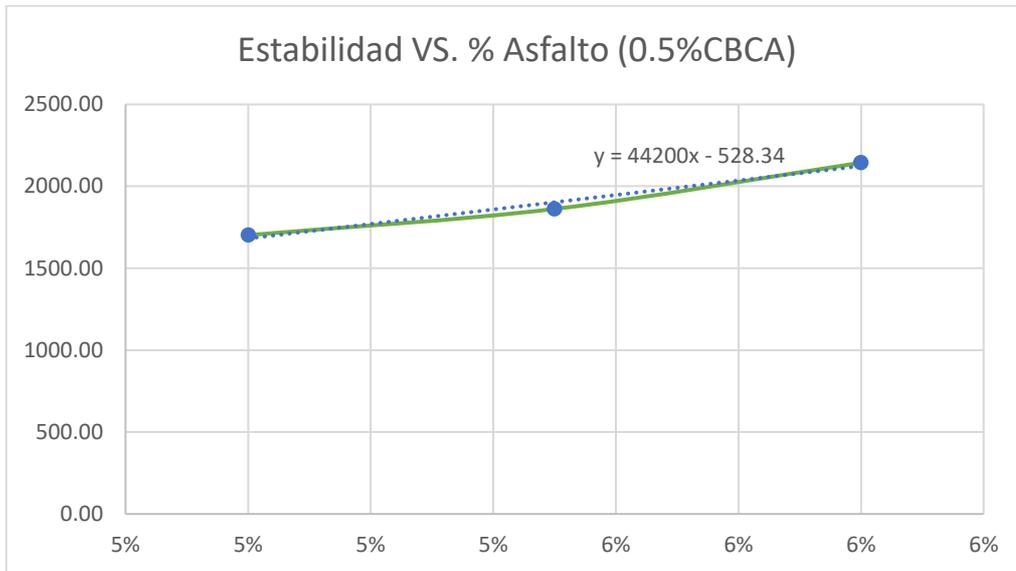
MAC con 0.5% de ceniza	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Estabilidad	1	1653.9	2050.4	2064.3
	2	1526.8	1680.5	2167.2
	3	1925.3	1855	2200.5
	Prom	1702.00	1861.97	2144.00
Flujo	1	3.8	4.6	3.8
	2	3.8	2.8	4.2
	3	4.1	3.6	5.3
	Prom	3.89	3.64	4.45

Nota. Elaboración propia

Se realizó la Figura 36 para demostrar gráficamente cómo se comporta la estabilidad de las briquetas que contengan el 0.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 36

Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 0.5% CBCA

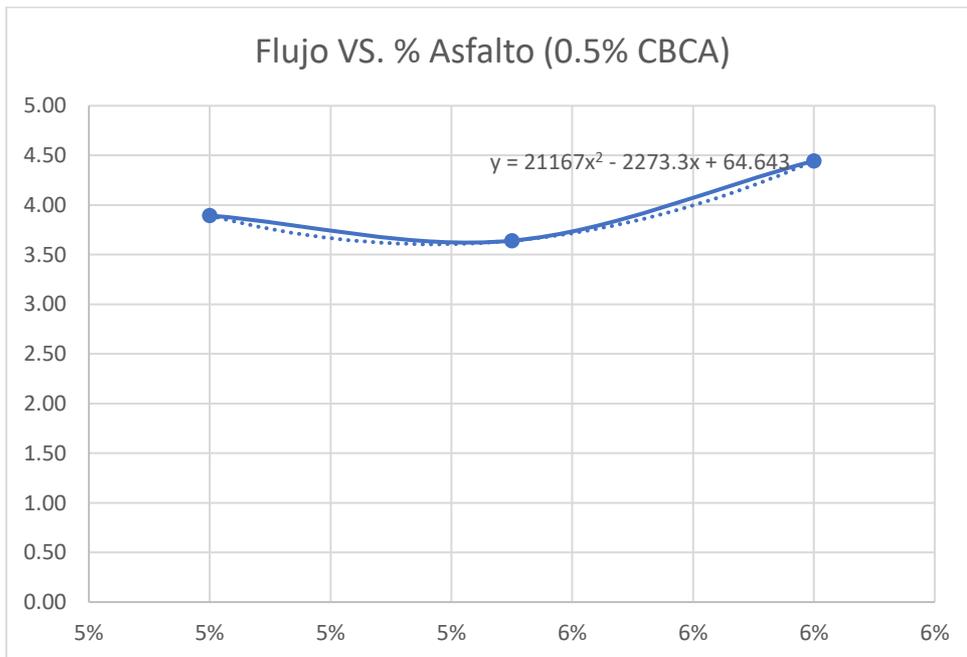


Nota. Elaboración propia

Y la Figura 37 para representar gráficamente cómo se comporta el flujo de las briquetas que contengan el 0.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 37

Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 0.5% CBCA



Nota. Elaboración propia

En la Tabla 23 se muestra los resultados de estabilidad y flujo obtenidos de las muestras con 1% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Tabla 23

Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 1.0% de ceniza

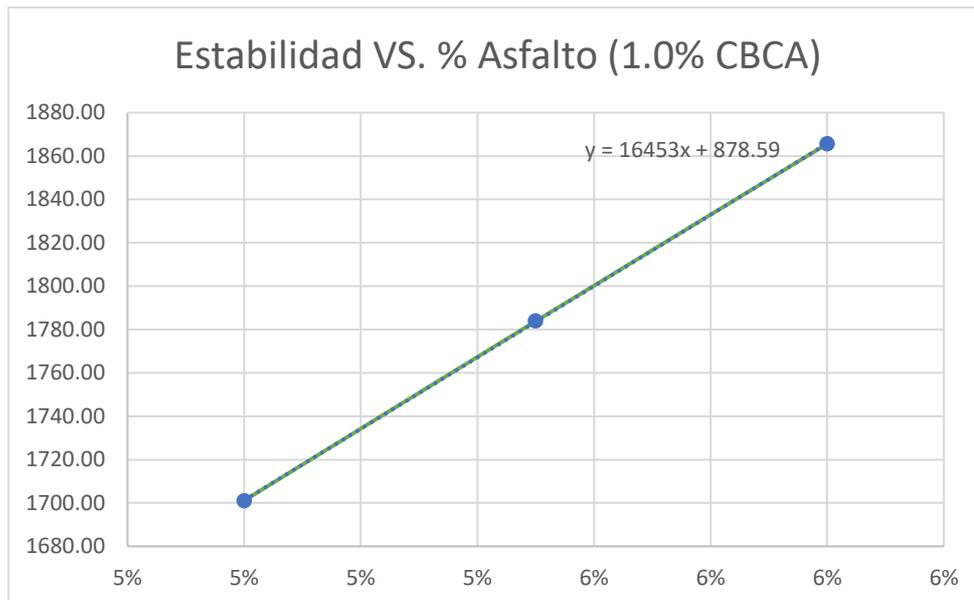
MAC con 1.00% de ceniza	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Estabilidad	1	1556.4	1480.3	1828.3
	2	1764.7	1771.1	1660.7
	3	1782.2	2100.1	2107.9
	Prom	1701.10	1783.83	1865.63
Flujo	1	2.5	3.8	4.6
	2	2.5	3.7	4.3
	3	3.8	3.7	4.6
	Prom	2.96	3.73	4.49

Nota. Elaboración propia

Se obtuvo la Figura 38 para plasmar gráficamente la estabilidad de las briquetas con el 1% de bagazo de caña de azúcar

Figura 38

Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 1.0% CBCA

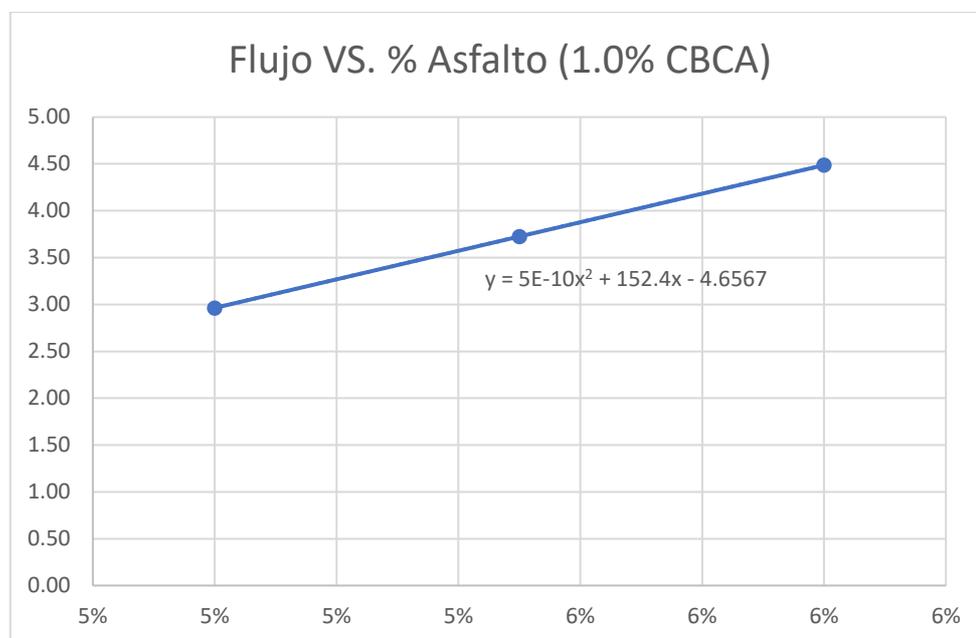


Nota. Elaboración propia

En la Figura 39 se muestra cómo es el comportamiento de las briquetas con 1 % de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 39

Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 1.0% CBCA



Nota. Elaboración propia

En la Tabla 24 se observan los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo para briquetas con el 1.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Tabla 24

Resultados de estabilidad y fluencia de las muestras con 1.5% de ceniza

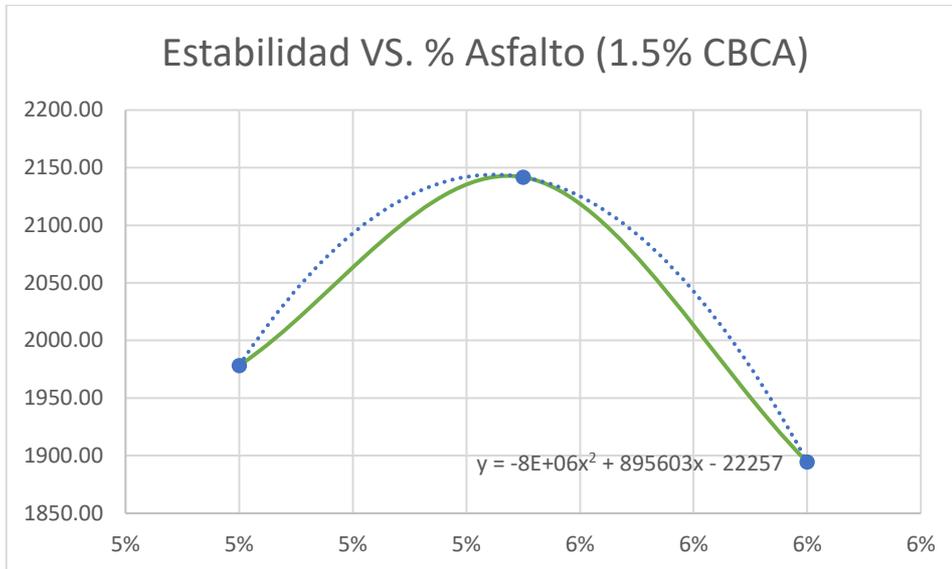
MAC con 1.5% de ceniza	N° Briquetas	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Estabilidad (Kg)	1	2112.8	2169.9	1695.8
	2	1655.3	2169.3	2018.2
	3	2166.6	2086.2	1969.4
	Prom	1978.23	2141.80	1894.47
Flujo (mm)	1	2.5	5.1	4.3
	2	2.5	2.3	3.6
	3	2.5	4.1	3.8
	Prom	2.54	3.81	3.89

Nota. Elaboración propia

La Figura 40 representa el comportamiento de la estabilidad en briquetas con mezclas asfálticas que se realizaron con el 1.5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Figura 40

Gráfica de la estabilidad con respecto al porcentaje de asfalto con 1.5% CBCA

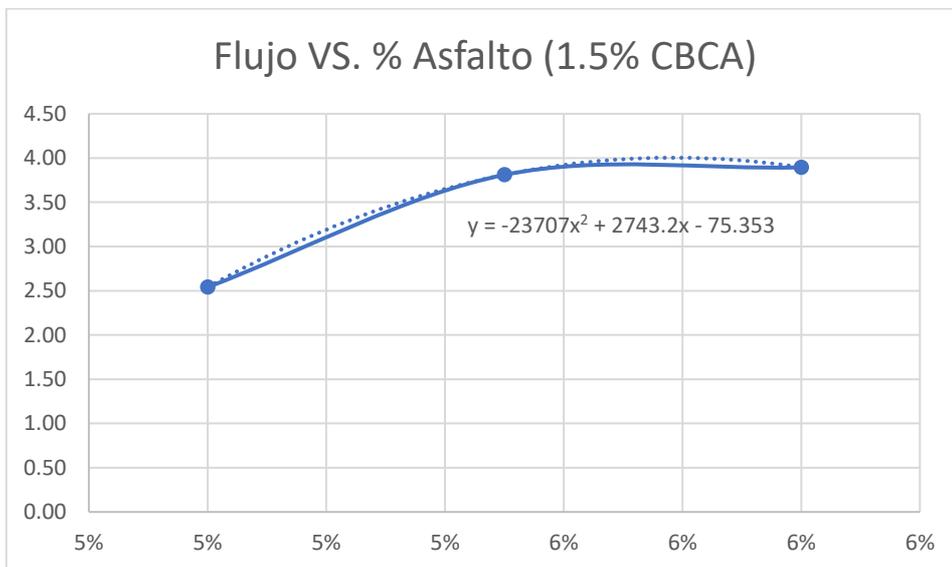


Nota. Elaboración propia

En la Figura 41 se muestra cómo gráficamente la fluencia de las briquetas con 1.5% de ceniza va cambiando con respecto a la cantidad de asfalto que contenga.

Figura 41

Gráfica del flujo con respecto al porcentaje de asfalto con 1.5% CBCA



Nota. Elaboración propia

En resumen, los valores de la estabilidad y flujo de las briquetas de acuerdo a los porcentajes de asfalto para un determinado porcentaje de ceniza son los mostrados en la Tabla 25:

Tabla 25

Estabilidad y flujo con respecto al porcentaje de asfalto para un % CBCA

	% de CBCA	% CAP		
		5%	5.50%	6%
Estabilidad	0.5%	1702.00	1861.97	2144.00
	1.0%	1701.10	1783.83	1865.63
	1.5%	1978.23	2141.80	1894.47
Flujo	0.5%	3.89	3.64	4.45
	1.0%	2.96	3.73	4.49
	1.5%	2.54	3.81	3.89

Nota. Elaboración propia

Mientras que, de acuerdo al porcentaje de ceniza con una determinada cantidad de asfalto en la mezcla asfáltica, se realizó la siguiente Tabla 26:

Tabla 26

Estabilidad y flujo con respecto al porcentaje de ceniza para un %CAP

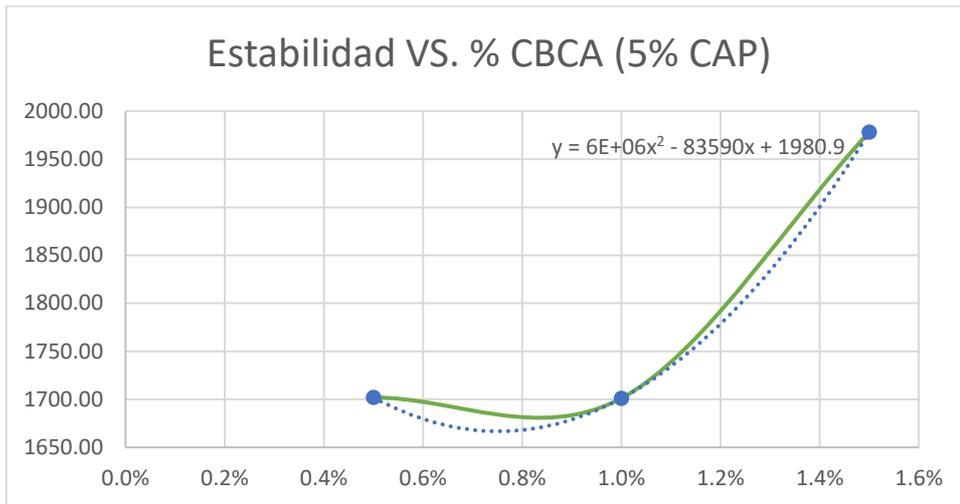
	% de CAP	% CBCA		
		0.5%	1.0%	1.5%
Estabilidad	5.0%	1702.00	1701.10	1978.23
	5.5%	1861.97	1783.83	2141.80
	6.0%	2144.00	1865.63	1894.47
Flujo	5.0%	3.89	2.96	2.54
	5.5%	3.64	3.73	3.81
	6.0%	4.45	4.49	3.89

Nota. Elaboración propia

Y se realizaron las Figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47 para entender gráficamente el comportamiento de estabilidad y lujo de las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar para cada porcentaje de asfalto, ya se 5%, 5.5% o 6%.

Figura 42

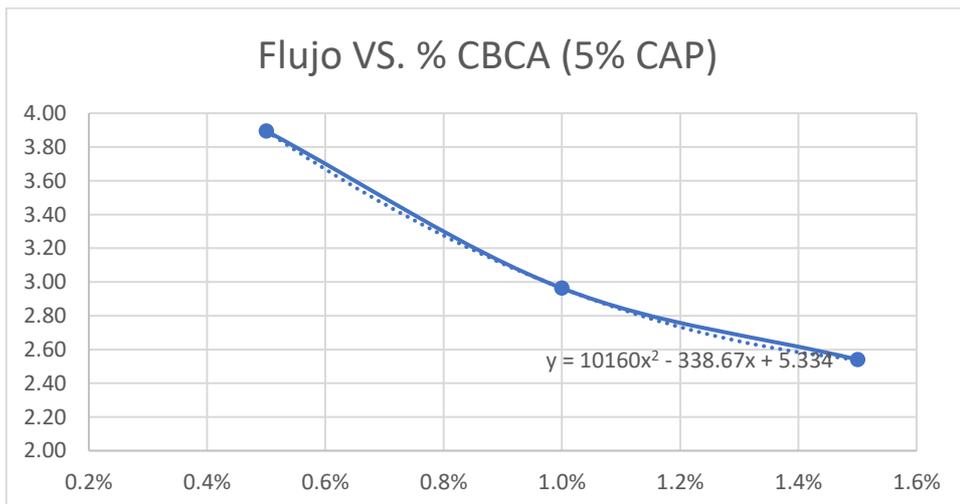
Gráfica de la estabilidad con respecto al % CBCA para un 5% CAP



Nota. Elaboración propia

Figura 43

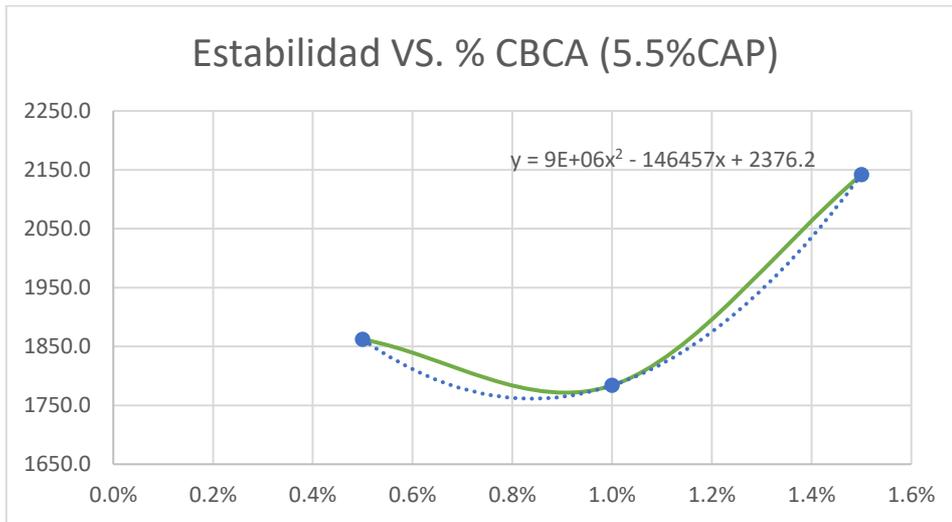
Gráfica del flujo con respecto al % CBCA para un 5% CAP



Nota. Elaboración propia

Figura 44

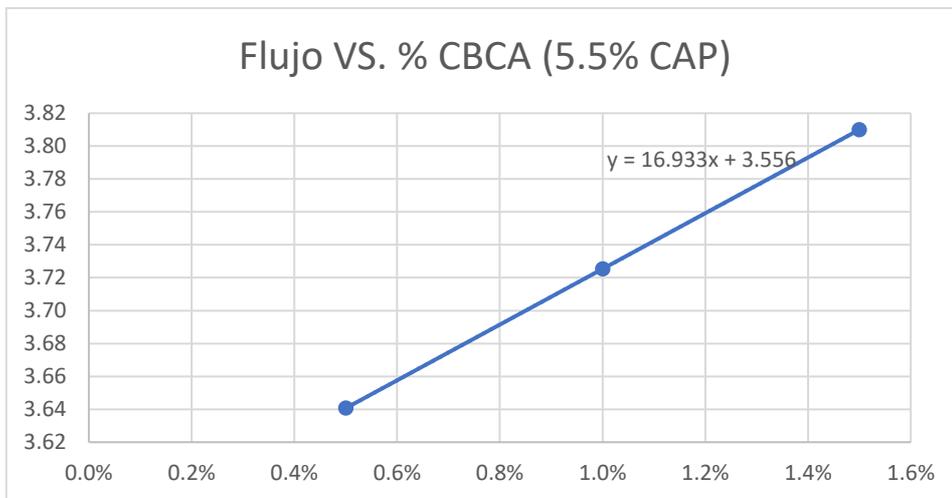
Gráfica de la estabilidad con respecto al % CBCA para un 5.5% CAP



Nota. Elaboración propia

Figura 45

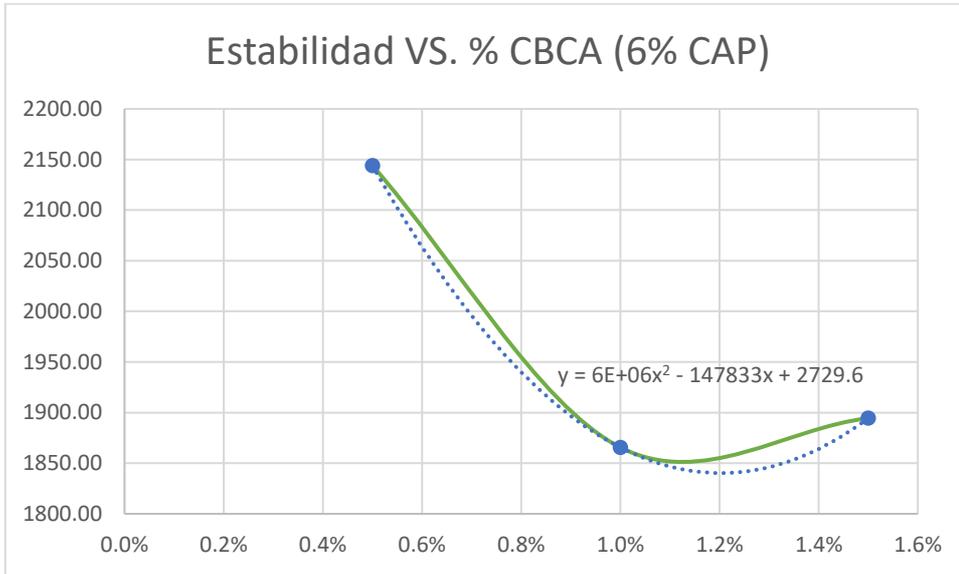
Gráfica del flujo con respecto al % CBCA para un 5.5% CAP



Nota. Elaboración propia

Figura 46

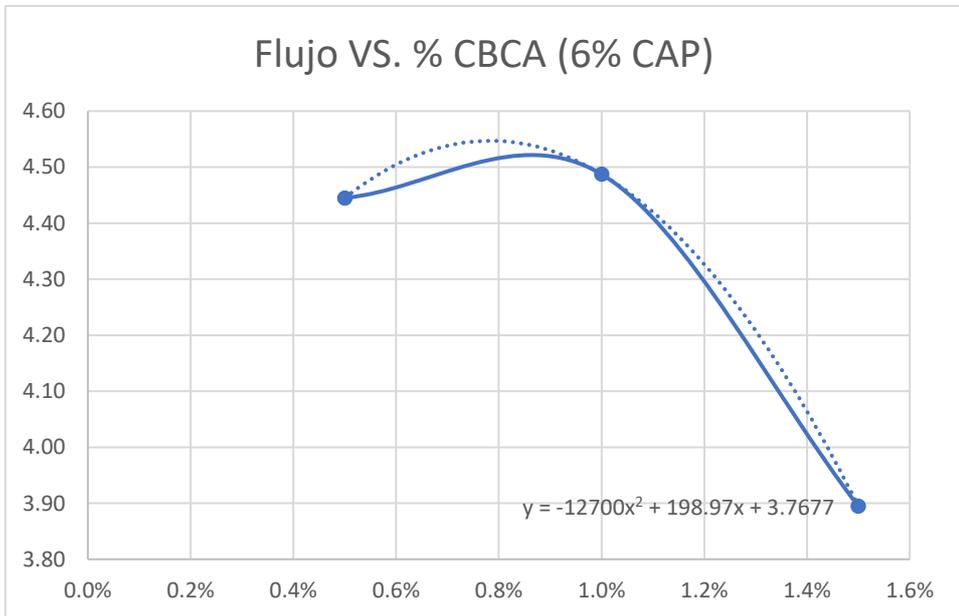
Gráfica de la estabilidad de acuerdo al % CBCA para un 6% CAP



Nota. Elaboración propia

Figura 47

Gráfica del flujo de acuerdo al % CBCA para un 6% CAP



Nota. Elaboración propia

Para los resultados de porcentaje óptimo de asfalto para cada diseño de mezcla asfáltica con CBCA se analizó lo casos mediante sus líneas de tendencia de los valores obtenidos

de estabilidad y flujo, junto con ello se evaluó el cumplimiento de los parámetros indicados en la norma, y nos resultó lo siguiente:

Para 0.5 % CBCA

%CAP	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
5.0%	1702.00	3.89
5.5%	1861.97	3.64
6.0%	2144.00	4.45
5.3%	1783.33	3.61

Para 1 % CBCA

%CAP	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
5.0%	1701.10	2.96
5.5%	1783.83	3.73
6.0%	1865.63	4.49
5.3%	1750.87	3.42

Para 1.5 % CBCA

%CAP	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
5.0%	1978.23	2.54
5.5%	2141.80	3.81
6.0%	1894.47	3.89
5.3%	2125.68	3.44

Con los porcentajes óptimos de asfalto definidos se realizaron los cálculos correspondientes al % Vacíos y VMA

Para 0.5%

G_{mm}= 2.44

G_{mb}= 2.34

V_a= 3.9 %

Gravedad específicas

G (A.F.)= 2.64g/cm³

G (A.G.)= 2.66g/cm³

G (CBCA)= 1.57g/cm³

Porcentaje del agregado

P (A.F.)= 63.5%

P (A.G.)= 36.0%

P (CBCA)= 0.5%

Gravedad específica neta del agregado (Gsb)

Gsb: 2.64

Porcentaje de asfalto= 5.4

Ps= 95.0

VMA= 15.1

Para 1%

Gmm= 2.43

Gmb= 2.35

Va= 3.5 %

Gravedad específicas Porcentaje del agregado

G (A.F.)= 2.64g/cm³ P (A.F.)= 63.0%

G (A.G.)= 2.66g/cm³ P (A.G.)= 36.0%

G (CBCA)= 1.57g/cm³ P (CBCA)= 1.0%

Gravedad específica neta del agregado (Gsb)

Gsb: 2.63

Porcentaje de asfalto= 5.3

Ps= 95.0

VMA= 15.2

Para 1.5%

Gmm= 2.45

Gmb= 2.36

Va= 3.9 %

Gravedad específicas Porcentaje del agregado

G (A.F.)= 2.64g/cm³ P (A.F.)= 62.5%

G (A.G.)= 2.66g/cm³ P (A.G.)= 36.0%

G (CBCA)= 1.57g/cm³ P (CBCA)= 1.5%

Gravedad específica neta del agregado (Gsb)

Gsb: 2.62

Porcentaje de asfalto= 5.3

Ps= 95.0

VMA= 14.6

Como resultados finales de cada uno de los tres diseños se elaboraron las Tablas 27, 28 y 29 considerándose el porcentaje de asfalto con el que la muestra tendría un mejor comportamiento:

Tabla 27*Resultados generales de la mezcla con 0.5% ceniza*

MAC MODIFICADA ÓPTIMA CON 0.5% DE CENIZA			
Especificaciones	Resultado	Manual	Evaluación
CAP PEN 60/70	5.30%	Según diseño	
CENIZA	0.50%	Según diseño	
Peso unitario (g/cm ³)	2.34	Según diseño	
Vacíos (%)	3.9	3 a 5	Cumple
VMA (%)	15.1	>12	Cumple
Estabilidad (Kg)	1783.3	>831	Cumple
Flujo (mm)	3.6	2 a 3.5	-
Estabilidad/flujo	1783.33	1700-4000	-

Nota. Elaboración propia**Tabla 28***Resultados generales de la mezcla con 1.0% ceniza*

MAC MODIFICADA ÓPTIMA CON 1.0% DE CENIZA			
Especificaciones	Resultado	Manual	Evaluación
CAP PEN 60/70	5.30%	Según diseño	
CENIZA	1.00%	Según diseño	
Peso unitario (g/cm ³)	2.34	Según diseño	
Vacíos (%)	3.5	3 a 5	Cumple
VMA (%)	15.2	>12	Cumple
Estabilidad (Kg)	1750.9	>831	Cumple
Flujo (mm)	3.42	2 a 3.5	Cumple
Estabilidad/flujo	5189.7	1700-4000	-

Nota. Elaboración propia**Tabla 29***Resultados generales de la mezcla con 1.5% ceniza*

MAC MODIFICADA ÓPTIMA CON 1.5% DE CENIZA			
Especificaciones	Resultado	Manual	Evaluación
CAP PEN 60/70	5.30%	Según diseño	

CENIZA	1.50%	Según diseño	
Peso unitario (g/cm ³)	2.35	Según diseño	
Vacíos (%)	3.9	3 a 5	Cumple
VMA (%)	14.6	>12	Cumple
Estabilidad (Kg)	2125.7	>831	Cumple
Flujo (mm)	3.44	2 a 3.5	Cumple
Estabilidad/flujo	6880.3	1700-4000	-

Nota. Elaboración propia

5.4. Análisis y discusión de resultados

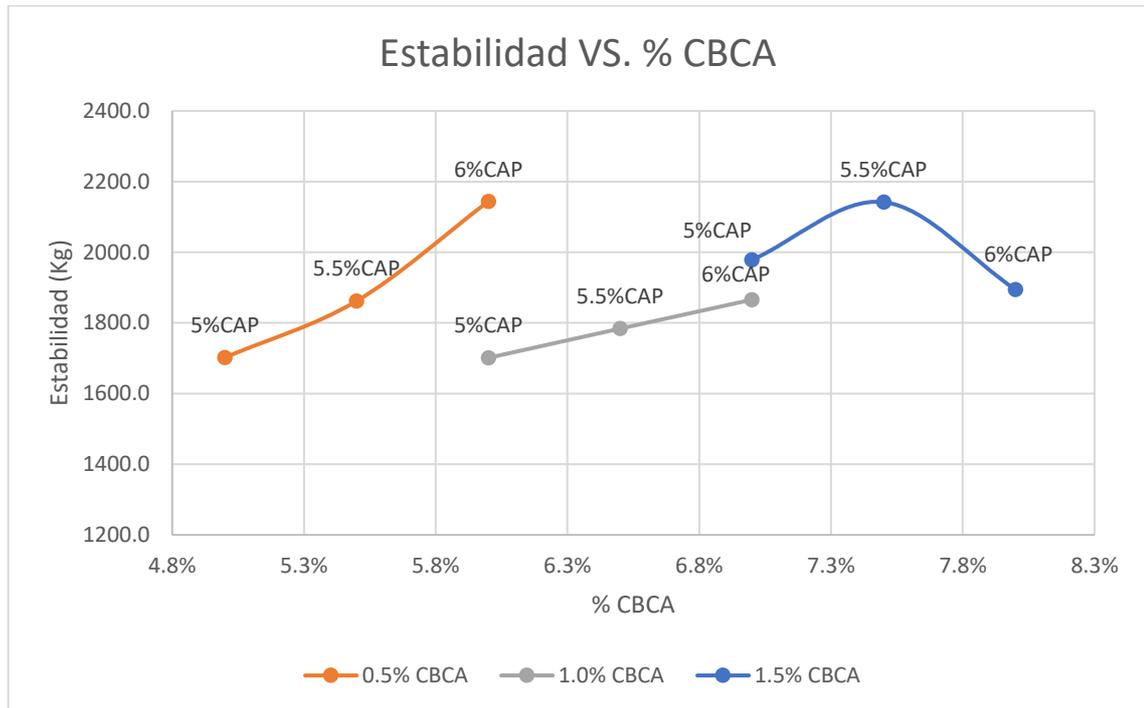
5.4.1. Comportamiento de la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica con CBCA

De acuerdo a la Tabla 25, observamos cómo los datos de la estabilidad y fluencia van cambiando cuando la mezcla posee contenidos diferentes de asfalto para un determinado porcentaje de ceniza. Se presentaron en las figuras 36, 37, 38, 39, 40 y 41, las gráficas que representan la variación que tiene la mezcla asfáltica con el uso de la ceniza. Para el análisis de estos resultados, realizamos dos gráficas resumen (Figura 48 y 49) de tal forma que se comprenda mejor los cambios en la muestra.

En la Figura 48, se observa cómo la mezcla que posee 0.5% CBCA al contener una menor cantidad de asfalto, la estabilidad de la muestra disminuye; mientras que al contener mayor asfalto la estabilidad también tiende a ser mayor. Si la mezcla posee 1% CBCA, sucede similar al caso anterior, la estabilidad disminuirá si la cantidad de asfalto es menor, y aumentará si el contenido de asfalto también aumenta. Para la mezcla que fue adicionada con 1.5% CBCA observamos que pasa totalmente lo contrario, la estabilidad solo es mayor cuando hay una adición de porcentaje promedio (5.5%); sin embargo, cuando tiene cantidades de asfaltos muy bajas como altas, su estabilidad tiende a disminuir.

Figura 48

Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP



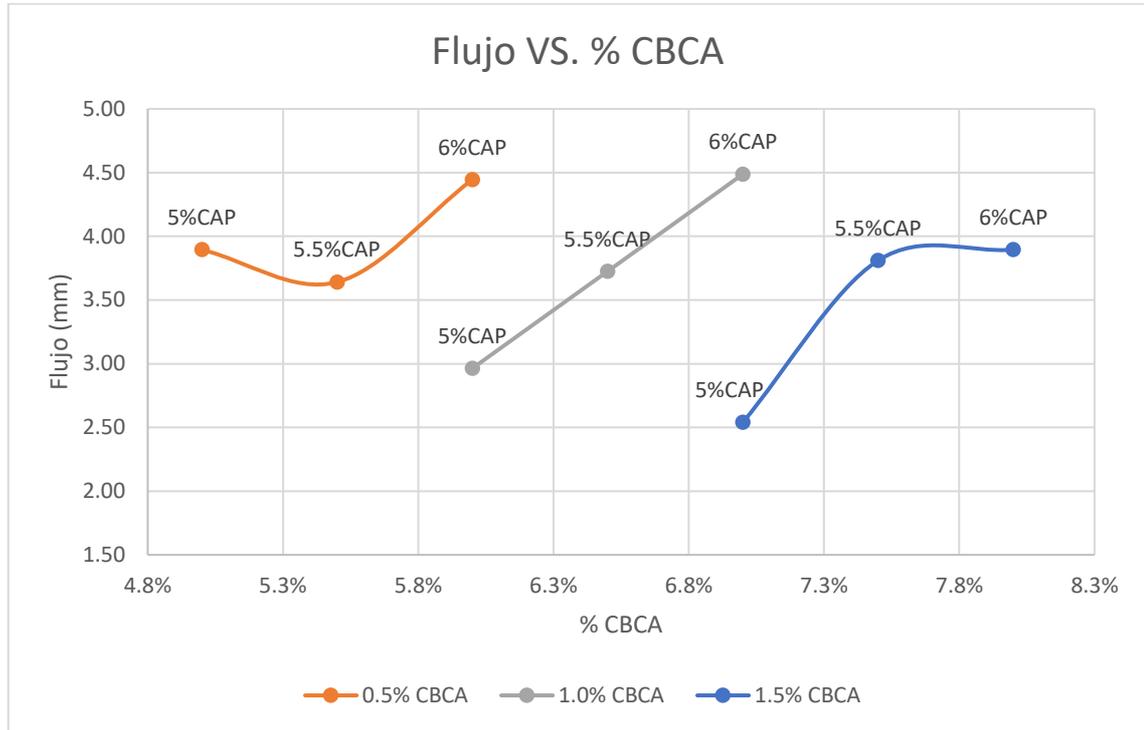
Nota. Elaboración propia

Tras el análisis realizado, podemos deducir que las mezclas asfálticas con 0.5% y 1% CBCA aumentan su estabilidad al poseer mayores cantidades de asfalto; por el contrario, cuando ya hay mayor cantidad de ceniza (1.5%) con altos contenidos de asfalto, la estabilidad empieza a disminuir.

Por el lado del flujo, vemos en la Figura 49 que las mezclas con 0.5% de ceniza tienen valores mayores de deformación cuando existen cantidades de asfalto muy bajas o muy altas, se observa que el valor menor de flujo es cuando la mezcla tiene 5.5% de CAP. Cuando existe 1% de ceniza, la muestra tiene menores valores de flujo cuando hay menores cantidades de asfalto; pero mientras va aumentando el contenido de asfalto, también va en aumento su longitud de deformación. Para una mezcla con 1.5% de CBCA, el flujo va en descenso al tener porcentajes de 5% y 6% de asfalto, es decir, si existen contenidos de asfalto muy bajos o muy altos la fluencia disminuirá, mientras que cuando hay un promedio de contenido de asfalto (5.5%), la fluencia llega a su punto máximo.

Figura 49

Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP



Nota. Elaboración propia

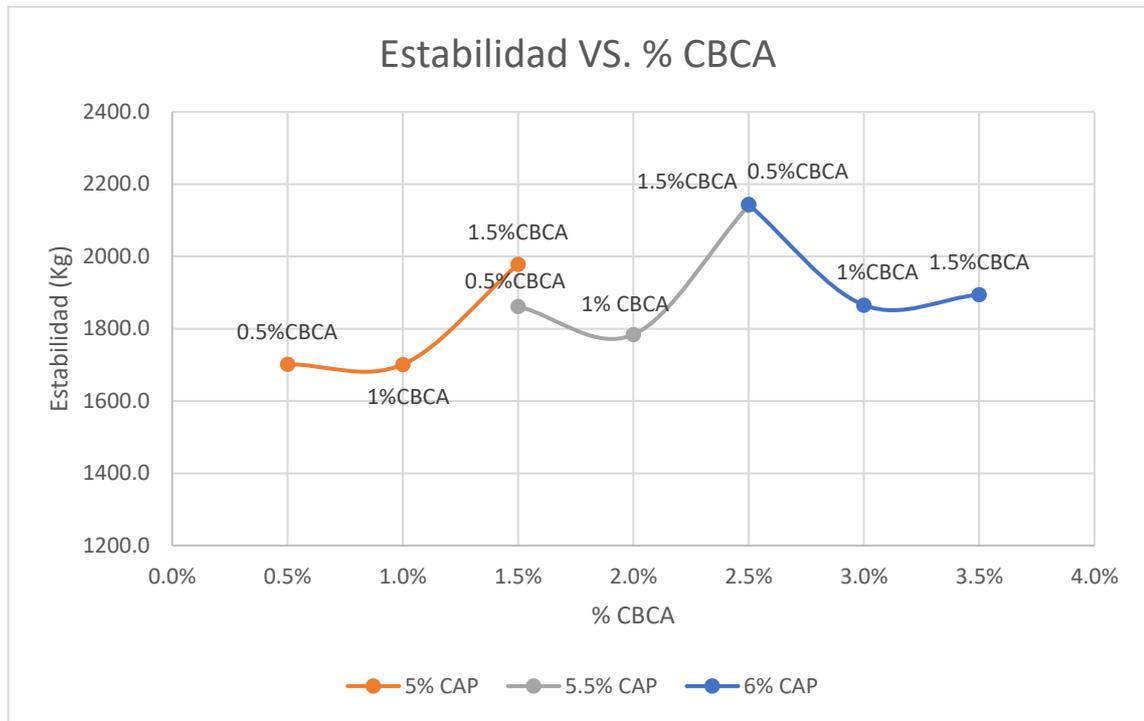
De forma general a lo comentado, las mezclas que tienen mayor contenido de ceniza (1% o 1.5%) con bajos contenidos de asfalto tendrán menores valores de flujo. Por el contrario, si existen valores bajos de ceniza (0.5%) sea la cantidad de asfalto que se le agregue, su flujo aumentará.

Para un mayor entendimiento del comportamiento de las mezclas asfálticas con CBCA, se analizó los valores de la Tabla 26 y se realizaron dos gráficas resumen (Figura 50 y 51) de las figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47, para evaluar cómo se comporta las mezclas asfálticas en caliente cuando poseen contenidos diferentes de ceniza dentro de un determinado porcentaje de asfalto.

En la Figura 50, observamos cómo al utilizarse 0.5% y 1.5% de ceniza en una muestra con 5% de CAP, su estabilidad va aumentando gradualmente en ambos casos, siendo el porcentaje predominante el de 1.5%; caso diferente sucede con el uso del 1% de ceniza, los valores de estabilidad resultan ser menores. Para una mezcla con 5.5% y 6% de CAP sucede lo mismo que el caso anterior, al momento de adicionarse valores de 0.5% y 1.5% de ceniza, la estabilidad asciende, mientras que al utilizarse 1% la estabilidad disminuye y de igual manera, el predominante sigue siendo el 1.5% de ceniza.

Figura 50

Gráfica de la estabilidad de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP



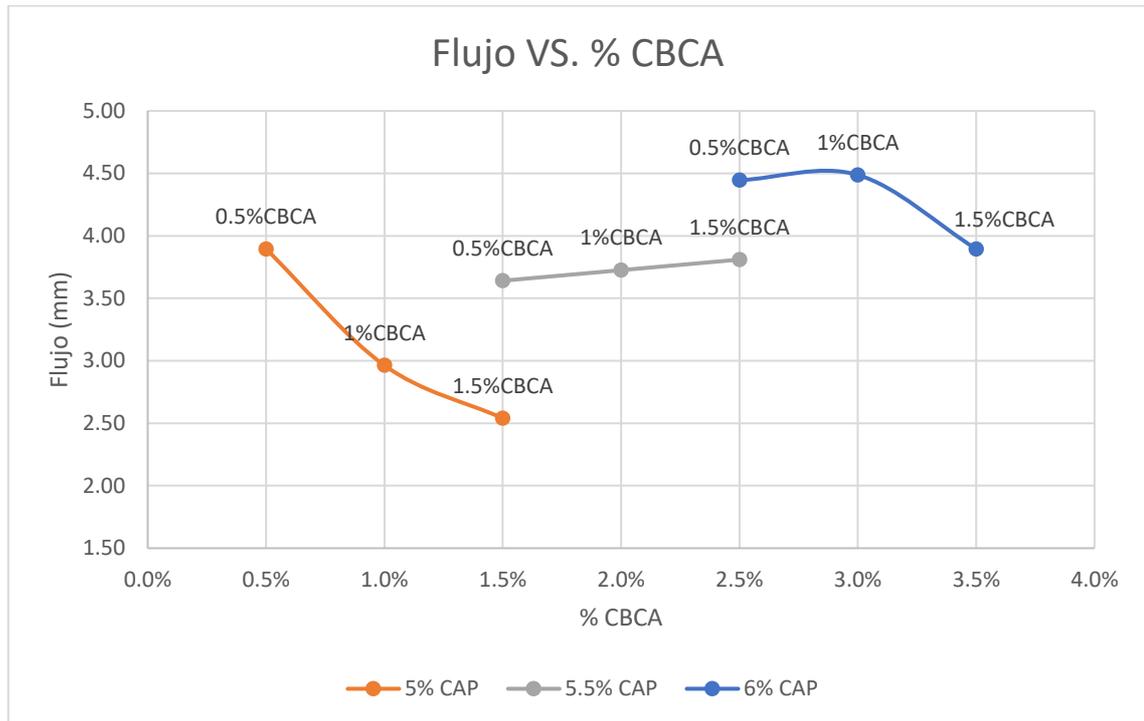
Nota. Elaboración propia

Por lo tanto, esto quiere decir que mientras se tenga mezclas con CAP cercanas a 5% y 5.5%, su estabilidad aumentará con altas cantidades de ceniza; por lo contrario, al utilizarse mayor cantidad de asfalto (6%) la estabilidad será mayor con porcentajes más bajos de ceniza (0.5%).

Dentro del análisis del flujo, en la Figura 51 se observa que cuando una mezcla contiene 5% de asfalto y se le agrega menor cantidad de ceniza, esta va a sufrir mayor deformación; sin embargo, cuando se le agregue mayor cantidad de ceniza, la longitud de deformación será menor. Para el caso del 5.5% de asfalto en una mezcla, el efecto es otro, vemos que al adicionarse menor cantidad de ceniza, la mezcla tiende a deformarse menos, y con mayor cantidad, se va deformando más. Por último, cuando la muestra tiene 6% de asfalto, su comportamiento al usarse cantidades muy pequeñas de ceniza (0.5%) hace que el flujo disminuya, y de la misma forma si se adiciona valores muy altos de CBCA (1.5%), el flujo también tiende a disminuir.

Figura 51

Gráfica del flujo de acuerdo al uso de % CBCA para un 5%, 5.5% y 6% CAP



Nota. Elaboración propia

Tras el análisis, podemos deducir que al tener menor porcentaje de CAP (cerca de 5%) y mayores porcentajes de ceniza, el flujo disminuye. Si se tiene una mezcla con adición promedio de CAP (5.5%), y se le adicione bajos porcentajes de ceniza los resultados de flujo disminuirán.

Con los cuatro casos vistos anteriormente, de forma general se puede afirmar que las mezclas con ceniza que tienen un mejor comportamiento son aquellas que poseen de 5% a 5.5% de CAP.

5.4.2. Porcentaje adecuado de ceniza de bagazo de caña de azúcar

Tras haber realizado la evaluación de cada espécimen con diferentes porcentajes de ceniza, analizaremos qué porcentaje de ceniza resulta mejor para una mezcla asfáltica, pero tomando en cuenta su cantidad óptima de asfalto.

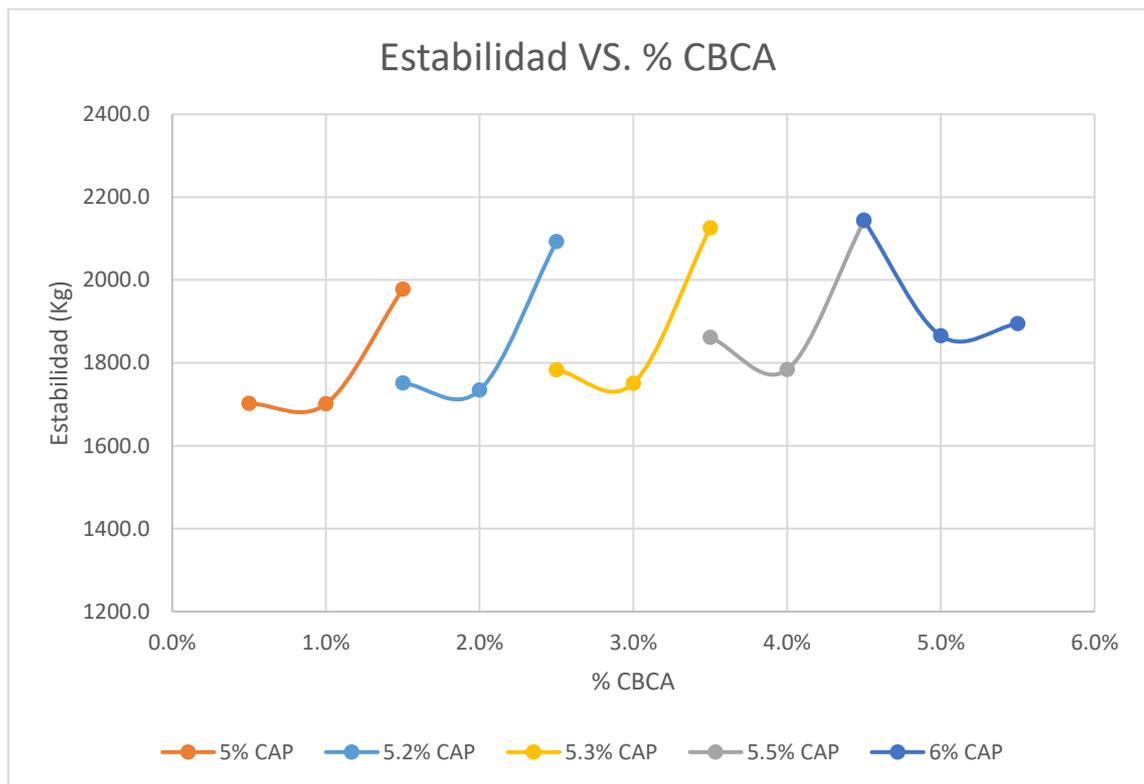
Según el análisis realizado en el ítem 5.4.1. el contenido óptimo de asfalto se encuentra entre el 5% y 5.5%; y dentro de las tablas 27, 28 y 29 indican que este valor es 5.3%. Para el análisis de los resultados mencionados, se elaboró dos gráficas (Figura 52 y 53) con

porcentajes de asfalto de 5%, 5.2%, 5.3%, 5.5% y 6% tanto para la estabilidad como el flujo.

En la Figura 52 observamos que las mezclas con ceniza de bagazo van aumentando su estabilidad de acuerdo al aumento del asfalto, todos estos porcentajes se encuentran aceptables ya que su estabilidad sobrepasa los 831 kg. exigidos por la norma.

Figura 52

Gráfica de la estabilidad de muestras con CBCA para diferentes contenidos de asfalto

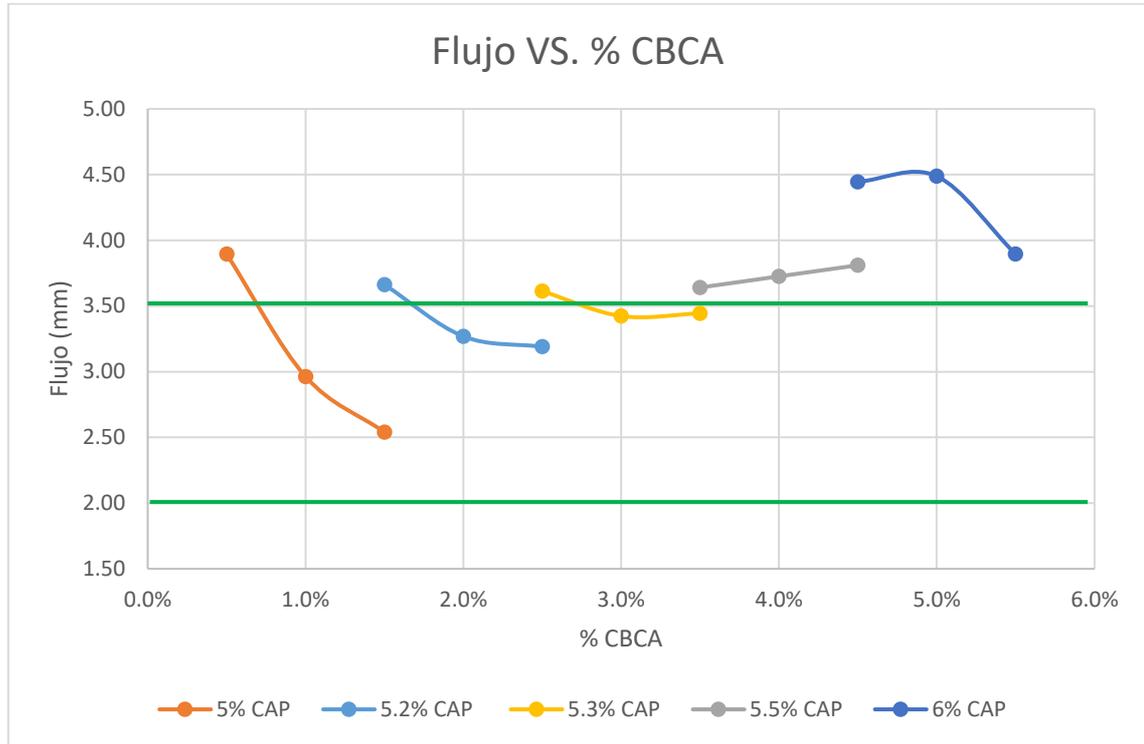


Nota. Elaboración propia

En la Figura 53 se aprecia como las mezclas con altos contenidos de asfalto su flujo va aumentando, pero considerando la evaluación con los parámetros de la norma, los valores del flujo para un tráfico pesado se deberían de encontrar entre 2 a 3.5 mm., y vemos que las mezclas con ceniza que contienen 5%, 5.2 y 5.3% son las únicas que se mantienen dentro de lo aceptable.

Figura 53

Gráfica de la estabilidad de muestras con CBCA para diferentes contenidos de asfalto



Nota. Elaboración propia

De acuerdo a los porcentajes que quedan para ser el óptimo contenido de asfalto en una mezcla modificada con ceniza son 5%, 5.2% y 5.3%, donde el contenido de asfalto seleccionado es el porcentaje que proporcione mayor resistencia a la mezcla, este vendría a ser el de 5.3%, ya que genera mayor estabilidad a comparación del 5% y 5.2%.

Teniendo el porcentaje óptimo de asfalto y los resultados de las propiedades de las mezclas asfálticas con uso de ceniza, se realizó la siguiente Tabla 30, y las siguientes Figuras 54 y 55 para analizar y evaluar qué porcentaje de ceniza es el adecuado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 30

Resultados generales de las mezclas modificadas para 0.5%, 1.0% y 1.5% de ceniza

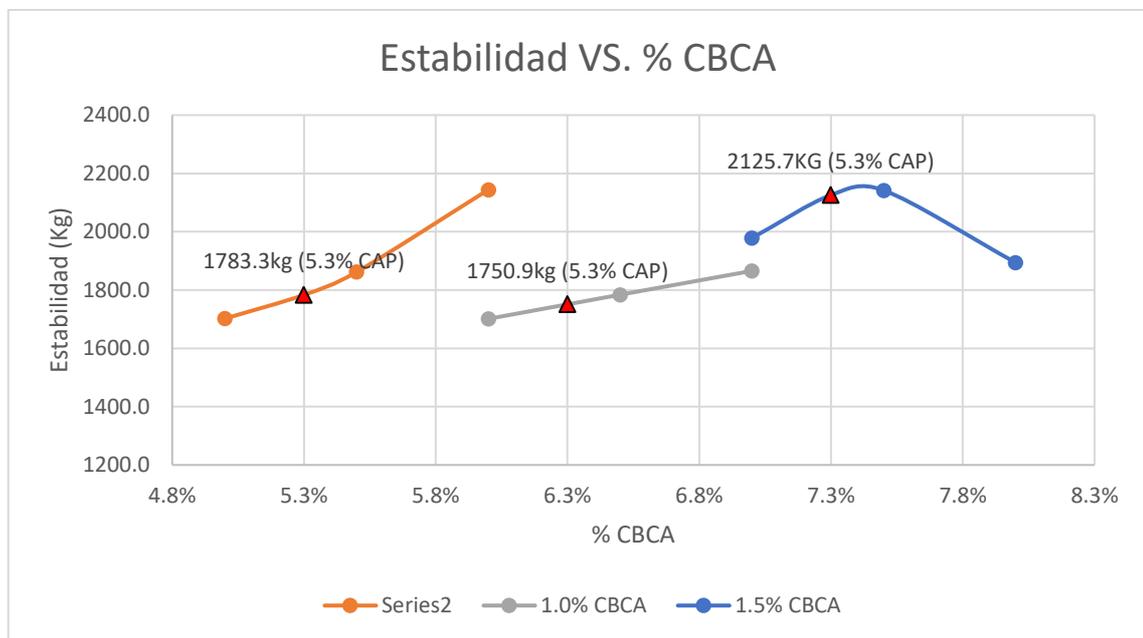
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA				
Especificaciones	0.5% CBCA	1.0% CBCA	1.5% CBCA	Manual
CAP PEN 60/70	5.30%	5.30%	5.30%	Según diseño
CENIZA	0.50%	1.00%	1.50%	Según diseño

Peso unitario (g/cm ³)	2.34	2.34	2.35	Según diseño
Vacíos (%)	3.9%	3.5%	3.9%	3 a 5
VMA (%)	15.1	15.2	14.6	>12
Estabilidad (Kg)	1783.3	1750.9	2125.7	>831
Flujo (mm)	3.61	3.4	3.4	2 a 3.5
Estabilidad/flujo (Kg/cm)	5160.1	5189.7	6880.3	1700-4000

Nota. Elaboración propia

Figura 54

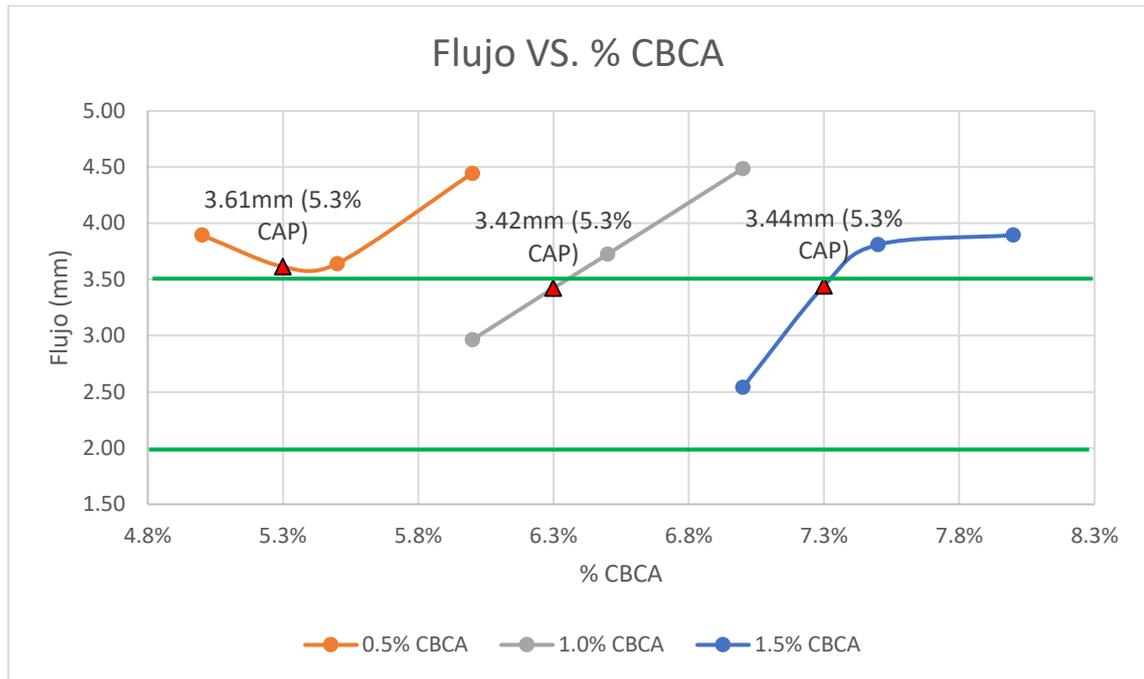
Estabilidad con 5.3% de CAP para los tres porcentajes de CBCA (0.5%, 1% y 1.5%)



Nota. Elaboración propia

Figura 55

Flujo con 5.3% de CAP para los tres porcentajes de CBCA (0.5%, 1% y 1.5%)



Nota. Elaboración propia

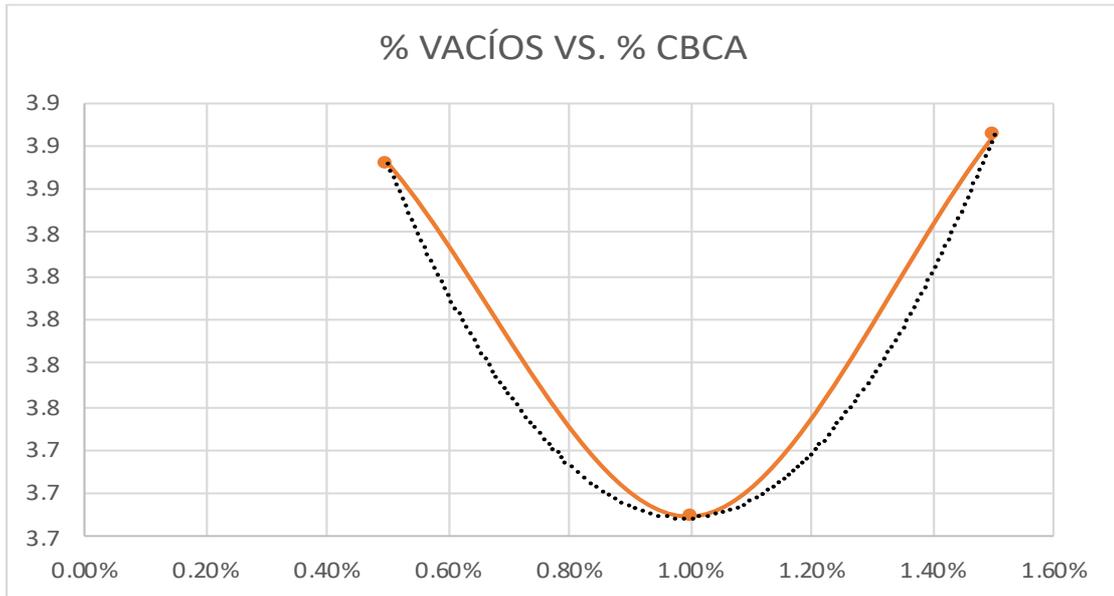
Según la tabla 26, observamos que en el caso del % vacíos, el 0.5% y 1.5% de adición de ceniza hace que la mezcla tenga un mayor porcentaje de vacíos, haciendo que esta sea menos impermeable que las demás (y como se sabe, dentro de una mezcla asfáltica la permeabilidad es un factor importante). Para los resultados del flujo, vemos en la Tabla 26 y en la Figura 55 como la longitud de deformación de la mezcla con 0.5% de CBCA es de 3.61mm, por lo que no cumpliría dentro de lo establecido por la norma. Por otro lado, se observa que la relación Estabilidad/flujo para los tres porcentajes de ceniza son mayores al rango establecido; sin embargo, esto no afectaría a los resultados positivos que se obtuvieron en las demás especificaciones.

En los siguientes gráficos podemos observar cómo el % Vacíos, la estabilidad y el flujo va cambiando en función del contenido de ceniza.

En la Figura 56 vemos como el % de vacíos tiende a aumentar con la adición de ceniza; y de igual manera, al tener una poca adición de ceniza este % de vacíos vuelve a aumentar, demostrando que el contenido de 1.0 % de ceniza sería un contenido promedio y adecuado para que se tenga un buen % de vacíos y se mantenga en los parámetros.

Figura 56

Relación entre el % vacíos y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar

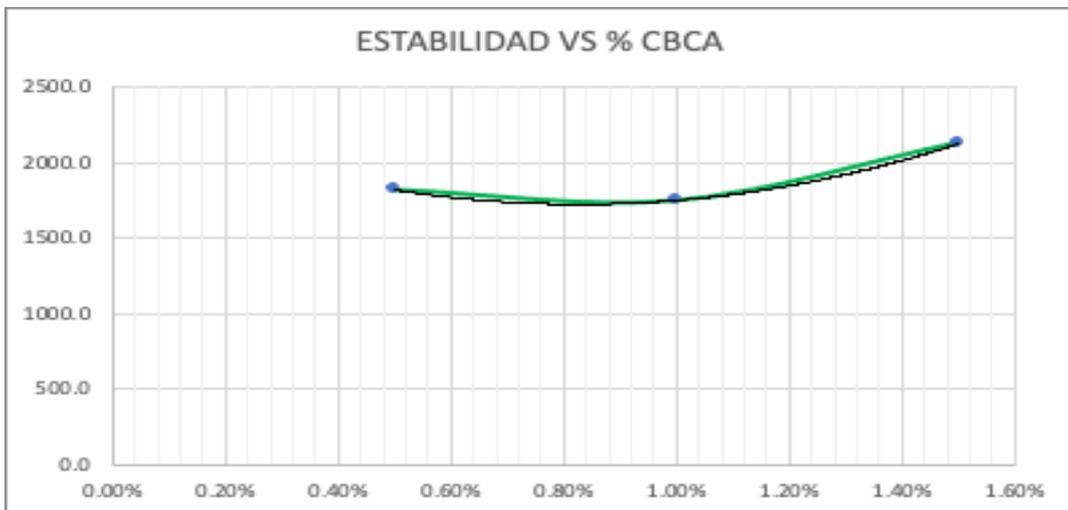


Nota. Elaboración propia

En la siguiente Figura 57, observamos que la estabilidad con el uso del 1.5% de ceniza para una mezcla de 5.3% de asfalto es muy alta, dando valores que superan los 2000 kg., esto podría arriesgar a que la mezcla sea muy rígida. Por otro lado, se observa como con el uso del 0.5% y 1% de ceniza, la mezcla puede tener valores más trabajables de estabilidad.

Figura 57

Relación entre la estabilidad y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar

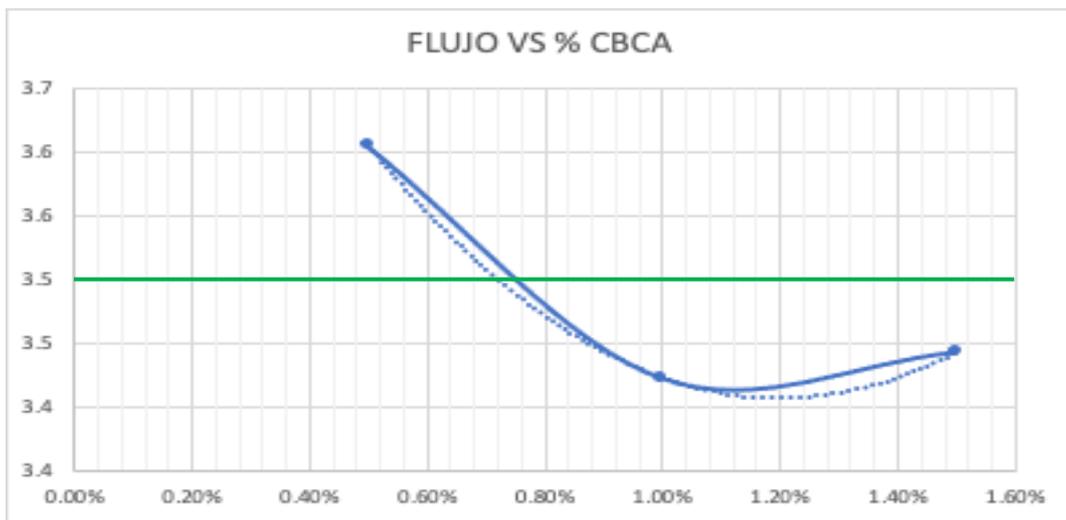


Nota. Elaboración propia

En la figura 58, se aprecia que con un valor medio de % de ceniza, la mezcla se mantiene dentro del máximo valor de flujo, como ya se mencionó y se vuelve a apreciar en la figura, cuando se utiliza el 0.5% de CBCA, la mezcla sobrepasa los valores de flujo; mientras que al utilizarse el 1% y 1.5% la mezcla cumple con lo exigido.

Figura 58

Relación entre el flujo y el % de ceniza de bagazo de caña de azúcar



Nota. Elaboración propia

Teniendo en cuenta todo el análisis realizado, el porcentaje de ceniza más adecuado a utilizar sería el de 1%.

5.4.3. MAC convencional y MAC modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar

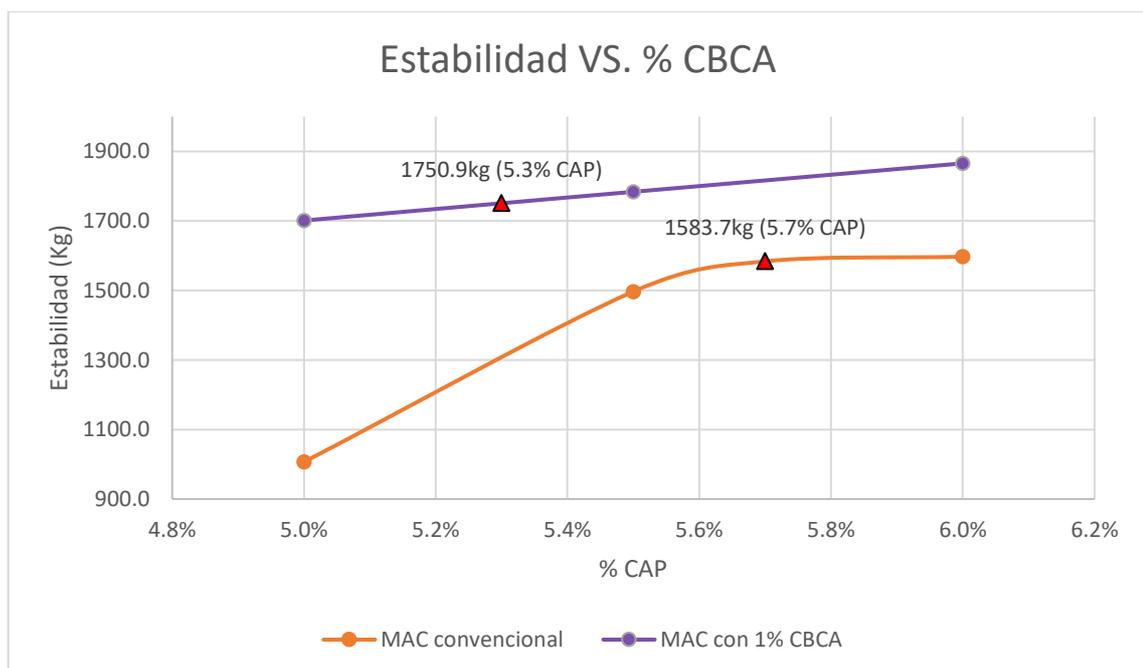
Se cuenta con el diseño óptimo convencional de la mezcla asfáltica en caliente con un porcentaje de ligante de 5.7%; mientras que para la mezcla modificada óptima se cuenta con 1% de uso de ceniza con un porcentaje de ligante de 5.3%. En la Tabla 31 observamos resultados generales de cada tipo de mezcla, ya sea convencional o modificada, para poder comparar los valores.

Tabla 31*Resultados comparativos de la mezcla asfáltica convencional con la modificada*

COMPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE				
Especificaciones	MAC Convencional	MAC con ceniza	Manual	Evaluación
CAP PEN 60/70	5.70%	5.30%	Según diseño	
CENIZA	-	1.00%	Según diseño	
Peso unitario (g/cm ³)	2.37	2.34	Según diseño	
Vacíos (%)	3.6%	3.5%	3 a 5	Cumple
VMA (%)	15.5	15.2	>14	Cumple
Estabilidad (Kg)	1583.7	1750.9	>815	Cumple
Flujo (mm)	3.3	3.4	2 a 4	Cumple
Estabilidad/flujo (Kg/cm)	5012.2	5189.7	1700-4000	-

Nota. Elaboración propia

En la Figura 59 se aprecia gráficamente el comportamiento de la estabilidad de la mezcla convencional con la modificada.

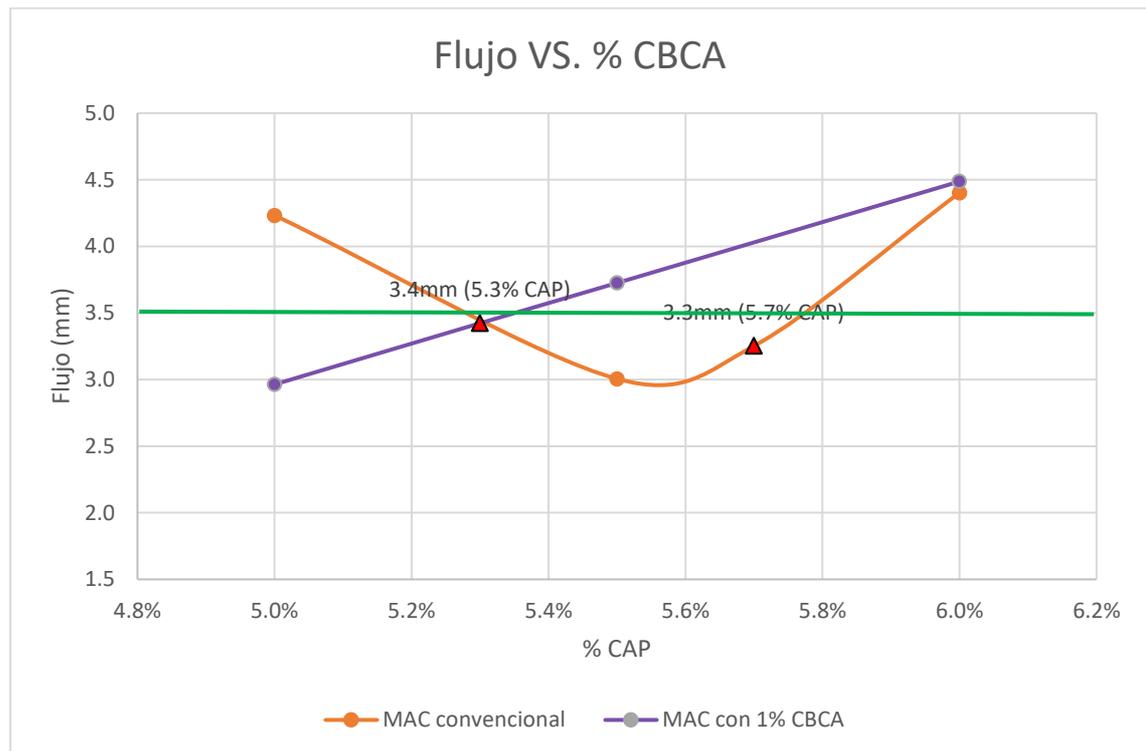
Figura 59*Gráfica comparativa de estabilidad de la MAC convencional vs. MAC con 1% CBCA*

Nota. Elaboración propia

En la Figura 60 se muestra por medio de gráficas el comportamiento del flujo para la mezcla convencional con la modificada.

Figura 60

Gráfica comparativa del flujo de la MAC convencional vs. MAC con 1% CBCA



Nota. Elaboración propia

La mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza tiene un menor contenido de asfalto que la convencional, vemos como disminuye en un 0.4%. En el caso del % Vacíos disminuye al utilizarse la ceniza, va de 3.6% a 3.5%, si bien es cierto no existe mucha variación pero demuestra que existe una mayor adherencia.

En la estabilidad, aumentó notablemente en la mezclas modificadas, ya que de una carga de 1583.7 kg soportada por la mezcla convencional, pasó a resistir una carga de 1750.9 kg con la adición de la ceniza, esto equivalente a un incremento del 10.6%.

Con respecto al flujo, la MAC modificada con ceniza de bagazo de la caña de azúcar no tuvo mucha variación, ya que solo aumentó un 3% con respecto a la convencional, esto a pesar de que tuvo una mayor carga soportada, no hubo tanta deformación como la convencional.

5.5. Contrastación de hipótesis

5.5.1. Hipótesis específica 1

Hipótesis Alterna (Hi1): El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar mejora la estabilidad en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

Hipótesis Nula (Ho1): El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar no mejora la estabilidad en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

Para contrastar la hipótesis se realizó por medio del análisis estadístico llamado Anova a través del programa SPSS Statistics, el cual ayudó a comparar la media de los grupos de muestra determinando las varianzas significativas que pudo haber entre ellas.

Como primer paso, se digitalizó todos los datos obtenidos de los ensayos de estabilidad para la muestra de 36 briquetas, las cuales 9 fueron convencionales y 27 modificadas con ceniza de bagazo de la caña de azúcar (9 con 0.5%, 9 con 1% y 9 con 1.5% de CBCA). Siendo en total 4 grupos con 9 briquetas cada una.

Luego, se aplicó el análisis en los datos y se obtuvo la tabla descriptiva mostrada en la Figura 61, la gráfica de la estabilidad media en la Figura 62 y de anova con los parámetros estadísticos de los grupos de muestra en la Figura 63.

Figura 61

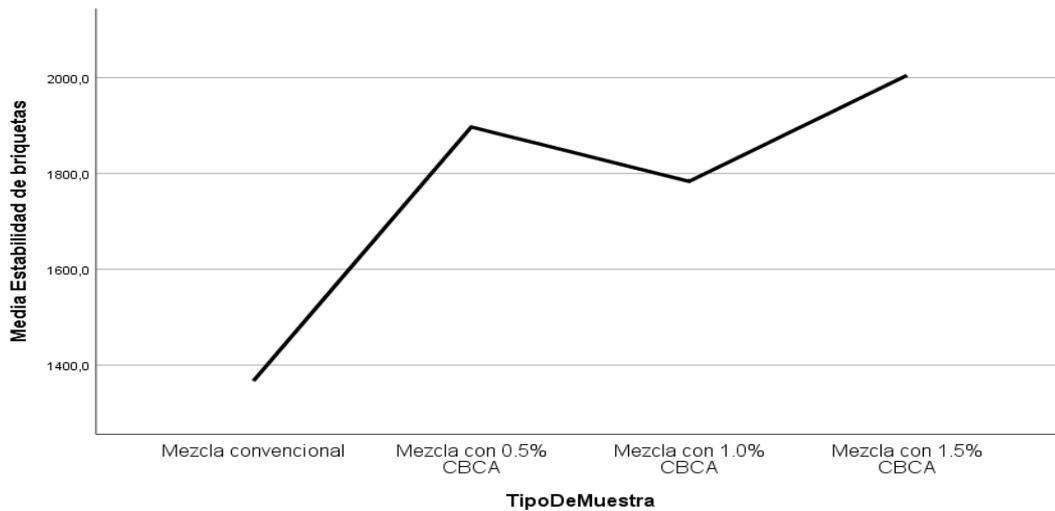
Resultados estadísticos descriptivos de la estabilidad

Estabilidad de briquetas	Descriptivos							
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Mezcla convencional	9	1366,856	307,8473	102,6158	1130,223	1603,488	699,6	1601,9
Mezcla con 0.5% CBCA	9	1897,100	246,5699	82,1900	1707,570	2086,630	1526,8	2200,5
Mezcla con 1.0% CBCA	9	1783,522	214,0594	71,3531	1618,982	1948,063	1480,3	2107,9
Mezcla con 1.5% CBCA	9	2004,833	199,3274	66,4425	1851,617	2158,050	1655,3	2169,9
Total	36	1763,078	339,4666	56,5778	1648,219	1877,937	699,6	2200,5

Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

Figura 62

Gráfica de la estabilidad media para cada uno de los tipos de muestra



Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

Figura 63

Resultados estadísticos anova de la estabilidad

ANOVA					
Estabilidad de briquetas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2104359,564	3	701453,188	11,637	,000
Dentro de grupos	1928956,098	32	60279,878		
Total	4033315,662	35			

Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

La validez de los resultados de una investigación se da por aceptada cuando el valor de la confiabilidad se encuentra dentro del 95%, por lo que rigue al error estimado a que se encuentre en un 5%. Una hipótesis es aceptada o no, cuando ese error es evaluado por el valor de significancia (Sig.).

Si: $\text{Sig} < 0.05$, la hipótesis alternativa es aceptada y la hipótesis nula rechazada.

Si: $\text{Sig} > 0.05$, la hipótesis alternativa es rechazada y la hipótesis nula aceptada.

Según los resultados obtenidos $\text{Sig}=0.00$, por lo que resultaría ser menor al 0.05 de error; por lo tanto, en esta investigación se acepta la hipótesis alterna H_{i1} y se rechaza la nula H_{o1} .

5.5.2. Hipótesis específica 2

Hipótesis Alterna (Hi2): El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar mejora la fluencia en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

Hipótesis Nula (Ho2): El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar no mejora la fluencia en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall.

Al igual que la hipótesis específica 1, la prueba a utilizar para conocer el grado de confiabilidad de los resultados es el de anova.

Se digitalizó los resultados de flujo para cada tipo de muestra y se aplicó el análisis estadístico resultando la Figura 64 como los resultados descriptivos, la Figura 65 como la gráfica de la media del flujo y por último, la Figura 66 para mostrar los resultados estadísticos de anova:

Figura 644

Resultados estadísticos descriptivos del flujo

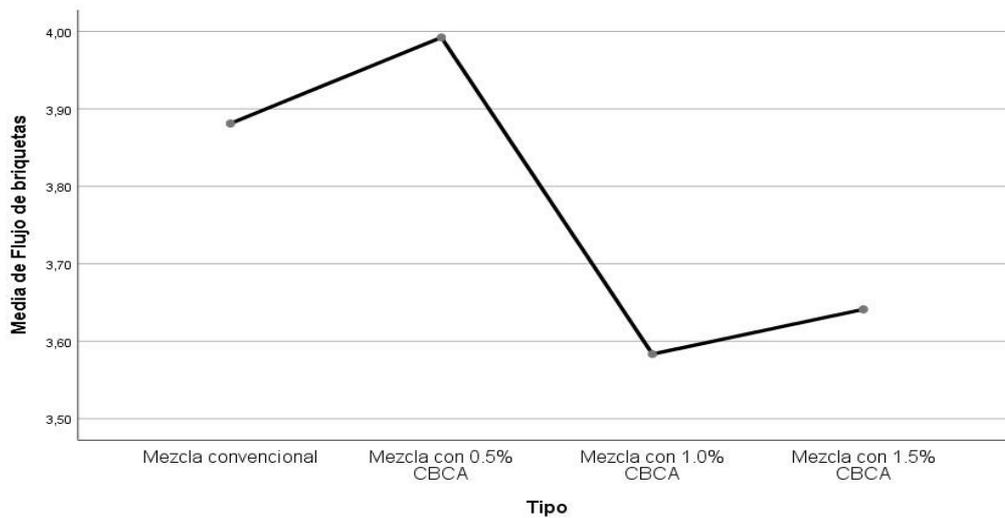
Descriptivos								
Flujo de briquetas								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Mezcla convencional	9	3,8811	1,22968	,40989	2,9359	4,8263	2,29	6,35
Mezcla con 0.5% CBCA	9	3,9922	,69812	,23271	3,4556	4,5288	2,79	5,33
Mezcla con 1.0% CBCA	9	3,5833	,85333	,28444	2,9274	4,2393	2,54	4,57
Mezcla con 1.5% CBCA	9	3,6411	,99090	,33030	2,8794	4,4028	2,29	5,08
Total	36	3,7744	,93647	,15608	3,4576	4,0913	2,29	6,35

Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

Figura 65

Gráfica de la media del flujo para cada uno de los tipos de muestra

Gráficos de medias



Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

Figura 66

Resultados estadísticos anova del flujo

ANOVA

Flujo de briquetas

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,018	3	,339	,366	,038
Dentro de grupos	29,676	32	,927		
Total	30,694	35			

Nota. Realizado con el programa SPSS Statistics

Como se mencionó, el grado de confiabilidad para que una hipótesis sea válida se debe encontrar dentro del 95%, y el error ser evaluado con el resultado de la significancia (Sig.).

Si: $Sig < 0.05$, la hipótesis alternativa es aceptada y la hipótesis nula rechazada.

Si: $Sig > 0.05$, la hipótesis alternativa es rechazada y la hipótesis nula aceptada.

Según los resultados estadísticos $Sig=0.038$, por lo que resulta ser menor al 0.05, es decir, la investigación acepta la hipótesis alterna H_2 y se rechaza la nula H_0 .

CONCLUSIONES

1. El uso del 1.0% de ceniza de bagazo de la caña de azúcar contribuye en el mejoramiento del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en caliente, esto sería producido por las propiedades puzolánicas con las que cuenta la ceniza, debido a que en su composición química existen porcentajes de sílice, que le generan características cementantes que al unirse con el CAP resulta una mezcla más densa, por lo que tiende a tener mayor resistencia y durabilidad. Esta adición del 1.0% es con respecto al peso del agregado fino, considerándose un porcentaje de ligante asfáltico igual al 5.3%.
2. El 1.0% de aplicación de la ceniza dentro de las mezclas asfálticas en caliente produce un cambio positivo en su estabilidad, ya que según los resultados, se ve un incremento de 1583.7 kg. a 1750.9 kg., con el cual se obtiene un diseño de mezcla con una alta resistencia a través del tiempo.
3. La fluencia dentro de la mezcla asfáltica modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar es mayor en 0.01mm que la mezcla patrón, sin embargo a pesar de soportar una carga de 160 kg. más que la convencional, la briqueta no sufrió tanta variación en su longitud de deformación, esto da por demostrado que la adición de ceniza de 1.0% mejora en la fluencia de las mezclas asfálticas en caliente.

RECOMENDACIONES

1. Se deben de controlar los porcentajes de ceniza, ya que al colocar valores muy altos o muy bajos comparados al promedio, podría generar empeoramientos en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente; un claro ejemplo podría ser el aumento en su estabilidad y en su fluencia, por lo que resultaría a ser una mezcla muy rígida, alejándonos de los parámetros que nos indican la norma; además, ese incremento puede ocasionar fisuras en muy corto plazo por la rigidez.
2. Evaluar la relación estabilidad/flujo de los diseños, ya que la mezcla al tener mayores valores de estabilidad y menores de flujo, ocasionará que los valores de la relación aumenten significativamente.
3. Realizar ensayos adicionales a las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza o incluso evaluarla mediante la metodología Superpave, de tal manera que se pueda tener una mayor información y entendimiento de cómo es su comportamiento y desempeño a través de diferentes situaciones.
4. Se ha comprobado que la ceniza genera una mejora en las propiedades mecánicas, por lo que se sugiere no solo hacer uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, sino también utilizar diferentes tipos de cenizas orgánicas como modificadores, de tal forma se amplie el conocimiento y la búsqueda de nuevas alternativas para el mejoramiento y durabilidad de las mezclas asfálticas.

REFERENCIAS

- Abd, R. y Hdabi, A. (2016). *Hot Mix Asphalt Characteristics with Sugar Industry Waste Materials as Mineral Filler*. Universidad de Kufa, Irak.
- Adauto, R. (2019). *Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2505>.
- Alarcón, H. et al. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Publicación técnica, Secretaría de comunicaciones y transportes, México.
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt246.pdf>
- Alavéz, R. et al. (2012). *The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks*. México.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Araújo, S. et al. (2011). *Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão*. Universidad Federal de Sao Carlos, Brasil.
- Bejarano, J. y Caicedo, C. (2017). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC 19 con fibra natural de caña de azúcar* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Colombia].
- Chagas, G., Toledo, R. y Moraes, E. (2008). *Uso de ceniza ultrafina de bagazo de caña de azúcar como aditivo mineral para concreto*.
- Chaves, M. (2004). *La caña de azúcar como materia prima para la producción de alcohol carburante*. Costa Rica.
- Chávez, C. (2017). *Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca-Perú].
- Comisión Permanente del Asfalto (1985). *Tecnología del asfalto y prácticas de construcción*. Republica de Argentina, Argentina.
- Condezo, et al. (2017). *Suceptibilidad térmica del asfalto* [Trabajo de investigación de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Farfan, B. y Flores, R. (2019). *Análisis y propuesta de carpeta asfáltica con la tecnología (S.M.A) modificada con fibra natural de caña de azúcar, Cusco 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco, Cusco-Perú].

- https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/2799/Bladimir_Rafer_Tesis_bachiller_2019_Part.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guerrero S. (2020). *Ceniza de bagazo de caña de azúcar en el concreto. Exploración preliminar del potencial de uso de la ceniza del valle del Chira* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura-Perú].
- https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4609/ICI_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Helfgott, S. (2016). *El cultivo de la caña de azúcar de la costa peruana*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú.
- Huamán, N. (2023). *Unidad 1: Los pavimentos y su comportamiento estructural y funcional*. Material de estudio, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Huamán, N. (2023). *Unidad 3: Construcción de pavimentos asfálticos*. Material de estudio, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Huamán, N. (2023). *Unidad 4: Mezclas asfálticas*. Material de estudio, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Huwae, D., Parera, L. y Tanijaya, J. (2016). *Bagasse-Ash as Filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture*. Universidad Paulus Christian, Indonesia.
- Instituto Colombiano Agropecuario (2016). *ICA y productores de caña panelera en Risaralda, trabajan para mejorar la molienda*. Gobierno Colombiano.
- Instituto de asfalto (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, Serie de manuales No. 22 (MS-22)*. Departamento de transporte, EE.UU.
- Lopez, J. (2015). *Manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar para panela en Antioquia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, Colombia.
- Marasca, I. et al. (2015). *Morfología de la caña de azúcar en la preparación profunda del suelo en canteros*. IDSIA, Chile.
- Mariano, G. (2021). *Mezcla asfáltica SMA, fibra, ceniza del bagazo de caña de azúcar y su desempeño mecánico* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4116?show=full>
- Matos, L. (2018). *Influencia de la adición de ceniza orgánica como filler en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente-Huancayo, 2018*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental, Huancayo-Perú].

- MIDAGRI (2017). *Caña de Azúcar en El Perú, Perspectivas*. Ministerio de Agricultura y Riego, Perú.
<https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/368>
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- MTC (2013). *Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción*. Dirección general de Caminos y Ferrocarriles, Lima-Perú.
- MTC (2014). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG-2014*. Dirección general de Caminos y Ferrocarriles, Lima-Perú.
- MTC (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Dirección general de Caminos y Ferrocarriles, Lima-Perú.
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España.
- Palomino, E y Torres, J. (2021). *Ceniza de bagazo de caña de azúcar para mejorar las propiedades mecánicas del concreto* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4839>
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Bartens.
- Reyes, F. y Vargas, X. (2010). *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*. Ingeniería e Investigación, Bogotá-Colombia.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000300003&lng=en&tlng=es
- Reyes, O., Troncoso, J. y Camacho, R. (2006). *Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes*. Universidad de la Rioja, Colombia.
- Roca, G. et al. (2006). *Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. Parte I: Características físicas*.
- Rodriguez, J. (2014). *Ceniza de bagazo de caña: efecto puzolánico en morteros de cemento* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Mexico].
<https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/391/1/RI003504.pdf>
- Rolando, F. (2002). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y elmusión* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura-Perú].

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1334/ICI_076.pdf?sequence=1%3F

- SCT (2008). *CTR. Construcción*. Estados Unidos Mexicanos, México.
- Sequeira, W. y Cervantes, V. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología Marshall*. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Simbaqueva, N., Espinosa, Y. y Mazutier, L. (2019). *Estudio de una mezcla asfáltica modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar de Cundinamarca como llenante natural*. Universidad Piloto de Colombia, Colombia.
- Yalico, G. (2022). *Influencia de la fibra de bagazo de caña en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica Chiclayo-Lambayeque* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo-Perú].
- Zainudin, M. et al. (2016). *Effect of sugarcane bagasse ash as filler in hot mix asphalt*. Suiza

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE 1 (VI)	DIMENSIÓN	INDICADOR	METODOLOGÍA
¿Cuál es el porcentaje de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas en la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023?	Determinar el porcentaje de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas para la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023	El porcentaje óptimo de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente mejora sus propiedades mecánicas para la región de Lima a través de la metodología Marshall, año 2023	Caña de azúcar en mezclas Asfálticas en caliente	Actividad puzolánica	Calcinación	TIPO DE INVESTIGACIÓN Correlacional – descriptivo
					Naturaleza de la ceniza	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN Cuantitativa
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVO ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS				POBLACIÓN Mezclas asfálticas en caliente para carreteras de tráfico pesado en Lima
a. ¿En qué medida varía la estabilidad con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall?	a. Determinar la estabilidad con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall	a. El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar mejora la estabilidad en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall	VARIABLE 2 (VD)		Estabilidad	Resistencia
						MUESTRA 36 briquetas de mezclas asfálticas en caliente
b. ¿En qué medida varía la fluencia con el uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall?	b. Determinar la fluencia con el uso de la ceniza de bagazo de la caña de azúcar en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall	b. El uso de ceniza de bagazo de la caña de azúcar mejora la fluencia en mezclas asfálticas en caliente en la región de Lima a través de la metodología Marshall	Propiedades Mecánicas		Fluencia	Deformación
						INSTRUMENTOS Ensayos en laboratorios, normativa técnica, tesis, artículos

Anexo B: Tamizado de los agregados pétreos y de la ceniza



Anexo C: Medición de cantidades de los agregados



Anexo D: Introducción de la ceniza de bagazo de caña de azúcar a la muestra



Anexo E: Peso siendo controlado para la adición del asfalto



Anexo F: Cemento asfáltico de petróleo en la muestra



Anexo G: Mezclado de las muestras



Anexo H: Muestras siendo compactadas



Anexo I: Especímenes compactados



Anexo J: Especímenes extraídos de los moldes



Anexo K: Informe de ensayo del asfalto PEN 60/70



TDM ASFALTOS

ASFALTO SOLIDO PEN PLUS 60/70 WARM MIX INFORME DE ENSAYO N° 011-2023 ASFALTO PEN PLUS 60/70 WARM MIX

OTRA TDM ASFALTOS: TDM 000025
 CLIENTE: SECONO L I R L
 TANQUE: B
 LOTE DE PRODUCCIÓN: PL1730001
 CANTIDAD: 7000 GALONES
 FECHA DE PRODUCCIÓN: 4/08/2023
 CORTILLO DE SEGURIDAD N°: 1609
 1604

ENSAYOS	METODO ASTM	UNIDADES	ESPECIFICACIONES		RESULTADO
			MINIMO	MAXIMO	
PENETRACION 100 g, 5 s, 25 °C	D-5	dmm	60	70	54
PUNTO DE INFLAMACION	D-92	°C	232	--	305
GRAVEDAD ESPECIFICA 15.6/15.8 °C	D-70		Reportar		
DUCTILIDAD 5 cm/min, 25 °C	D-113	cm	100	--	>150
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	D-2042	%	99	--	99.96
EFFECTO DE CALOR Y AIRE (PELICULA FINA) 3.2 mm, 163°C, 5 h	D-1754		MINIMO	MAXIMO	
PERDIDA POR CALENTAMIENTO	D-1754	%	--	0.8	0.110
PENETRACION RETENIDA % original	D-5		52	--	62.5
DUCTILIDAD 5 cm/min, 25 °C	D-113	cm	50	--	>150
INDICE DE PENETRACION	(*) Francés RLB		Reportar		-1.5
FLUIDEZ			MINIMO	MAXIMO	
VISCOSIDAD CINEMATICA 100°C	D-2170	cSt	Reportar		3867.0
VISCOSIDAD CINEMATICA 135°C	D-2170	cSt	200	--	430.0

- OBSERVACIONES:
1. El producto cumple especificaciones de calidad.
 2. Los resultados solo corresponden a la muestra analizada.
 3. (**) Los resultados corresponden al correlativo N° 60/70-001-08-2023 con procedencia REPSOL.
 4. Se adjunta Hoja de Seguridad del Producto y Hoja Resumen Art. 54 D.S. N°021-2008-MTC.
 5. (*) Corresponde a otro método de ensayo.

CÓDIGO DE CONTRAMUESTRA: 11

Original Cliente
Carg. Laboratorio

Fecha de Emisión: Lima, 04 de Agosto del 2023

La información contenida en este documento se basa en ensayos adecuados, seguros y correctos. Las recomendaciones, resúmenes y sugerencias no constituyen garantías ya que, al estar fuera de nuestro alcance controlar las condiciones de aplicación, no nos responsabilizamos por daños, perjuicios o pérdidas ocasionadas por el uso inadecuado de los productos.

TDM ASFALTOS se reserva el derecho de efectuar cambios con el objeto de adaptar este producto a las más modernas tecnologías.

Mz. A Lote 12 Zona Industrial Las Praderas de Lurin - Lurin, Teléfono (511) 6169311

REG-III-TEC-147-V02

Anexo L: Reporte de análisis del asfalto PEN 60/70



REPSOL

REPORTE DE ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO 60/70

LOTE No. 60/70-001-08-2023

REFINERÍA LA PAMPILLA S.A.A Carretera a Ventanilla km 25 S/N Ventanilla	RECEPCIÓN DE LA MUESTRA 03/08/2023 13:48:34	FECHA DE CERTIFICACIÓN 03/08/2023 03:04:33
PRODUCTO Cemento Asfáltico 60/70	TANQUE 331A	DESTINO DE PRODUCTO Operaciones de Despacho
PROCEDENCIA Almacenamiento	VOLUMEN CERTIFICADO, m ³ 1800	BUQUE TANQUE
PROPIEDADES	MÉTODO	RESULTADO
	ASTM / OTROS	
PENETRACIÓN		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D 5 / AASHTO T 49	54
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/mín, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 150
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15.6 °C/15.6°C	D 70 / AASHTO T 228	1.0308
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	305.0
Gravedad API, °API	D 70 / AASHTO T 228	4.7
FLUidez		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	46.8
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	D 445	3067
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	D 2170 / AASHTO T 301	424
ENSAYOS DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, % m	D 1754 / AASHTO T 173	0.11
Penetración retenida, 100g, 5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	62.5
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/mín, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 150
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en tetrahidrofurano, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99.06
INDICES		
Índice de Penetración	UNE-EN 12691	-1.5
Ensayo de la Mancha (Hefle-Blende)	AASHTO T102	20% blanco, negativo
OBSERVACIONES: PRODUCTO CUMPLE CON LAS ESPECIFICACIONES ASTM D881, AASHTO M 29-70 Y NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 321.061		
DISTRIBUCIÓN - Operaciones de Despacho - TYT - Laboratorio	FECHA DE EMISIÓN 03/08/2023	LABORATORIO  Pedro Ramos M. Gerente de Laboratorio

REPSOL S.A. RESPONSABILIDAD PARCIAL

Anexo M: Ensayos de laboratorio del agregado fino

RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DEL AGREGADO FINO					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS					
OBRA / PROYECTO: 0					
UBICACIÓN: 0					
SOLICITANTE: 0					
FECHA: 1/02/23					
Tabla 423-02. Requerimientos para los agregados finos AGREGADO FINO Arena Chancada para asfalto < 1/4"					
ENSAYOS	NORMA	DISTRITO DE SURQUILLO	Requerimiento Altitud (msnm)		CONDICIÓN
			≤3.000	>3.000	
Equivalente de Arena	MTC E 114	76.0	45%		Cumple
Adehesividad (Riedel Weber)	MTC E 220	6.00	4% Mín.	6% Mín.	Cumple
Índice de Plasticidad (malla N.º 40)	MTC E 111	N.P.	NP	NP	Cumple
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	N.P.	4 máx.	NP	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.0640	0,5% máx.	0,5% máx.	Cumple
Absorción*	MTC E 205	0.48	0,5% máx.	Según Diseño	Cumple
OBSERVACIONES					
<i>Muestra de acopio en planta de asfalto de SEOING E.I.R.L.</i>					

Anexo N: Ensayos de laboratorio del agregado grueso

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DEL AGREGADO GRUESO					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS					
OBRA / PROYECTO: 0					
UBICACIÓN: 0					
SOLICITANTE: 0					
FECHA: 1/02/23					
Tabla 423-01. Requerimientos para los agregados gruesos					
AGREGADO GRUESO	Grava < 3/4" - 1/2"				
CANtera	CAJAMARQUILLA				
ENSAYOS	NORMA	RESULTADO	Requerimiento		CONDICIÓN
			Altitud (msnm)		
			≤3.000	>3.000	
Durabilidad (al Sulfato de Sodio)	MTC E 209	5.56	12% máx.	10% máx.	Cumple
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	5.49	18% máx.	15% máx.	Cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	24.4	40% máx.	35% máx.	Cumple
Adherencia	MTC E 517	+ 95%	+95		Cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	71.0	35% mín.	35% mín.	Cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM D 4791	1.4	10% máx.	10% máx.	Cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	20.2 / 18.6	85/50	90/70	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.1178	0,5% máx.	0,5% máx.	Cumple
Absorción *	MTC E 206	0.95	1,0% máx.	Según Diseño	Cumple
OBSERVACIONES					
<u>Muestra de acopio en planta de asfalto de SEOING E.I.R.L.</u>					