



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL,  
ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES**

**Ingrid Maribel Suriano Marroquín**

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, enero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL,  
ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**INGRID MARIBEL SURIANO MARROQUÍN**

ASESORADO POR EL ING. DARÍO FRANCISCO LUCAS MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

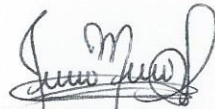
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 19 de septiembre de 2016.



**Ingrid Maribel Suriano Marroquín**

Guatemala, 17 de agosto de 2017

Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Guatemala

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **“MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES”** elaborado por la estudiante Ingrid Maribel Suriano Marroquín con carné 201114297, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,

  
Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos  
Colegiado 10,266

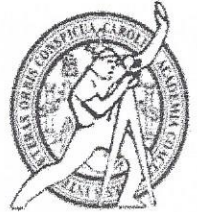
Dario Francisco Lucas Mazariegos  
Ingeniero civil colegiado No. 10,266



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
11 de septiembre de 2017

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Ingrid Maribel Suriano Marroquín quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
**USAC**

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*





**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación de la estudiante Ingrid Maribel Suriano Marroquín MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2018

/mmm.



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

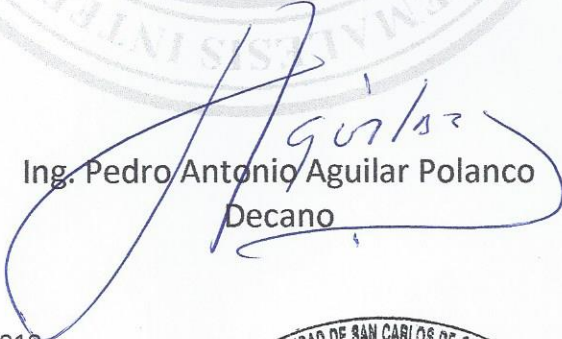


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 005.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES** presentado por el estudiante universitario: **Ingrid Maribel Suriano Marroquín**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2018



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Es gracias a ti papito que he llegado hasta aquí, gracias por cumplir uno de mis sueños.
- Adolfo Suriano** Papi, por tu amor, tu ejemplo, tus enseñanzas, gracias porque siempre has creído que puedo lograr las metas que me propongo.
- Elsa de Suriano** Mamita, por darme las fuerzas cuando más las necesité, te debo todo lo que soy, este logro es tuyo también.
- Mis hermanos** Hugo y Marvin Suriano, los quiero con todo mi corazón, gracias por cuidarme siempre de muchas maneras y también creer en mí.
- Mis primos** Henry, Milton y Magdoni Marroquín Ramírez, gracias por todo el apoyo que me dieron durante la carrera, por siempre estar al pendiente de mí y por haber tenido la fe de que podía lograrlo.
- Mis tíos** Rómulo, Hugo, Marta y Emma Marroquín Fino, por aconsejarme en todo momento y por su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por la enseñanza brindada.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Melisa León, Nery de León, Jorge Cardona, Roberto Rocha, Enrique Xocoxic, Norma Calo, Gabriela Marroquín, Héctor Santisteban, Daniel Pontaza, y Anselmo Matzul, gracias por todos los momentos compartidos, su amistad y cariño.
<b>Laboratorio de Asfaltos</b>	Por la ayuda y oportunidad de realizar los ensayos en sus instalaciones, José Istupe, Carlos Gómez, María Fernanda Díaz y Herbert López.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Darío Lucas, por sus revisiones y ayuda para realizar este trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Trabajos realizados con diseños de mezclas asfálticas en caliente como relleno mineral.....	2
1.2. Trabajos realizados con cenizas volantes.....	3
1.2.1. Utilización de cenizas volantes para capas de base y subbase.....	8
1.2.2. Utilización de cenizas volantes en el concreto.....	8
1.2.3. Utilización de cenizas volantes en terraplenes.....	9
1.2.4. Uso agronómico de cenizas volantes.....	11
1.2.5. Utilización de cenizas volantes con arcilla.....	11
1.3. Situación actual del uso de cenizas volantes en Guatemala....	12
1.3.1. Empresas generadoras de carbón mineral en Guatemala.....	13
1.3.2. Estimación del consumo de combustible para la generación en energía eléctrica.....	14

2.	CENIZAS VOLANTES .....	19
2.1.	Cenizas volantes .....	19
2.1.1.	Definición.....	20
2.1.2.	Origen .....	20
2.1.3.	Procesado .....	21
2.1.4.	Obtención de la muestra de la planta generadora de cenizas volantes .....	22
2.1.5.	Disposición .....	23
2.2.	Clasificación de cenizas volantes según Norma ASTM C 618-08 a.....	23
2.2.1.1.	Clasificación C .....	23
2.2.1.2.	Clasificación F .....	23
2.2.1.3.	Clasificación N.....	24
2.2.2.	Composición de las características físicas de las cenizas volantes .....	24
2.2.3.	Composición de las características químicas de las cenizas volantes .....	26
2.3.	Otras cenizas volantes .....	27
2.3.1.	Ceniza volcánica .....	27
2.3.2.	Uso de la ceniza de palma africana como aditivo ...	28
2.3.3.	Uso de la cáscara de arroz en morteros .....	29
3.	UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA MITIGAR PROBLEMAS AMBIENTALES.....	31
3.1.	Problemas ambientales.....	31
3.2.	Residuos sólidos .....	31
3.3.	Emisiones a la atmósfera .....	32
3.4.	Medidas de mitigación.....	32
3.5.	Gestión a nivel nacional e internacional .....	33

3.5.1.	Volumen generado por los sólidos .....	33
3.6.	Reutilización de residuos sólidos .....	34
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	35
4.1.	Muestreo de la ceniza volante .....	35
4.2.	Porcentajes de agregado según sección 401 de las <i>Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes</i> de la Dirección General de Caminos .....	35
4.3.	Descripción del método Marshall según Norma AASHTO T 245 o ASTM D 1559 .....	38
4.3.1.	Equipo a utilizar .....	39
4.3.1.1.	Molde para realizar probetas .....	39
4.3.1.2.	Martillo de compactación.....	40
4.3.1.3.	Pedestal de compactación .....	41
4.3.1.4.	Sujetador para molde .....	41
4.3.1.5.	Mordazas .....	42
4.3.1.6.	Prensa.....	42
4.3.1.7.	Medidor de estabilidad .....	43
4.3.1.8.	Horno .....	44
4.3.1.9.	Estufa para calefacción de los agregados .....	44
4.3.1.10.	Equipo de laboratorio para realizar baño de María .....	45
4.3.1.11.	Termómetros.....	46
4.3.1.12.	Balanza manual .....	46
4.3.1.13.	Identificadores de probetas .....	47
4.4.	Material a utilizar.....	47
4.4.1.	Agregados .....	48
4.4.2.	Bitumen.....	51



4.5.	Preparación de probetas .....	53
4.6.	Resultados de datos obtenidos de ensayos de laboratorio según Norma ASTM D 1559 .....	54
4.6.1.	Análisis de bitumen .....	54
4.6.1.1.	Peso específico del agregado Norma ASTM C-127 y C-128 .....	55
4.6.1.1.1.	Densidad volumétrica ASTM D 1188 .....	56
4.6.1.2.	Densidad teórica máxima ASTM D 2041 y AASHTO T 209 .....	61
4.6.2.	Ensayos de estabilidad y fluencia ASTM D 1559....	65
4.6.2.1.	Valor de la estabilidad Marshall .....	66
4.6.2.2.	Valor de fluencia de Marshall.....	68
4.6.2.2.1.	Relación entre estabilidad y fluencia.....	71
4.6.3.	Vacíos en la mezcla asfáltica. Norma ASTM D 3203 y AASHTO T 269.....	73
4.6.4.	Vacíos en el agregado mineral .....	75
4.6.5.	Vacíos rellenos de asfalto.....	78
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
5.1.	Análisis densidad específica bruta .....	81
5.2.	Análisis de densidad teórica máxima sin cenizas volantes vs densidad teórica máxima con cenizas volantes .....	82
5.3.	Análisis de estabilidad de la mezcla patrón vs mezcla con cenizas volantes.....	83
5.4.	Análisis de fluencia de la mezcla patrón vs mezcla con cenizas volantes.....	85

5.5.	Requerimientos según normas y comparación con resultados de la sección 401 .....	86
5.5.1.	Análisis de porcentaje de vacíos .....	86
5.5.2.	Análisis de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) .....	87
5.5.3.	Análisis de vacíos llenos de asfalto .....	89
CONCLUSIONES .....		91
RECOMENDACIONES .....		93
BIBLIOGRAFÍA .....		95
ANEXOS .....		99



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Utilización de cenizas volantes en industrias de la construcción en Europa, 2010 .....	4
2.	Producción y uso de carbón en los años 2000-2015 según ACAA.....	5
3.	Producción de carbón usando en los años 2000-2015.....	6
4.	Cemento con cenizas volantes.....	9
5.	Porcentaje de acuerdo a tipo de energía.....	14
6.	Cenizas volantes de carbón .....	19
7.	Probetas con diseño patrón .....	39
8.	Dispositivos para moldear probetas .....	40
9.	Martillo de compactación.....	40
10.	Placa con base plana .....	41
11.	Mordazas .....	42
12.	Equipo Marshall .....	43
13.	Medidor de estabilidad .....	43
14.	Horno.....	44
15.	Estufa para calefacción de los agregados .....	45
16.	Equipo para baño de María .....	45
17.	Termómetros.....	46
18.	Balanza manual .....	47
19.	Gráfica granulométrica para diseño Marshall .....	51
20.	Densidad específica bruta vs porcentaje de bitumen sin cenizas volantes.....	58

21.	Gráfica de densidad específica bruta vs porcentaje de bitumen con cenizas volantes .....	60
22.	Densidad teórica máxima sin cenizas volantes.....	63
23.	Gráfica de porcentaje de cemento bitumen vs densidad teórica máxima.....	65
24.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs estabilidad sin cenizas volantes .....	67
25.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs estabilidad con cenizas volantes .....	68
26.	Porcentaje de bitumen vs fluencia sin cenizas volantes.....	69
27.	Gráfica porcentaje de bitumen vs fluencia con cenizas volantes .....	70
28.	Estabilidad vs fluencia sin cenizas volantes.....	71
29.	Estabilidad vs fluencia con cenizas volantes .....	72
30.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs porcentaje de vacíos en la mezcla patrón .....	74
31.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs porcentaje de vacíos con cenizas volantes .....	75
32.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs VAM de mezcla patrón.....	76
33.	Gráfica de porcentaje de bitumen vs VAM con cenizas volantes .....	77
34.	Porcentaje de bitumen vs vacíos de relleno mineral .....	79
35.	Porcentaje de bitumen vs vacíos rellenos de mineral con cenizas volantes .....	80
36.	Densidad específica bruta sin cenizas volantes vs densidad específica bruta con cenizas volantes.....	82
37.	Densidad teórica máxima sin cenizas volantes vs densidad teórica máxima con cenizas volantes .....	83
38.	Porcentaje de bitumen vs estabilidad .....	84
39.	Porcentaje de bitumen vs fluencia .....	86



40.	Gráfica de vacíos vs vacíos con cenizas volantes y porcentaje de vacíos con cenizas volantes.....	87
41.	Gráfica de porcentaje de vacíos llenos de mineral sin cenizas volantes y porcentaje de vacío llenos de mineral con cenizas volantes.....	88
42.	Gráfica de porcentaje de vacíos llenos de mineral y porcentaje de vacíos llenos de mineral con cenizas volantes .....	89

## TABLAS

I.	Producción de combustión de carbón según la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (ACAA).....	7
II.	Capacidad del sistema eléctrico en plantas generadoras.....	13
III.	Capacidad instalada por país y tecnología en MW año 2015 .....	15
IV.	Estimación de consumo de carbón en el 2013 .....	16
V.	Características físicas de las cenizas volantes.....	24
VI.	Requerimientos químicos.....	26
VII.	Datos de la cascara de arroz.....	29
VIII.	Reciclaje de sólidos .....	34
IX.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515) .....	35
X.	Requisitos para la mezcla de cemento asfáltico .....	37
XI.	Vacíos en el agregado mineral (VAM).....	38
XII.	Agregado para mezclas tradicionales.....	48
XIII.	Graduación de polvo mineral.....	50
XIV.	Granulometría Marshall.....	50
XV.	Clasificación de bitumen según su viscosidad a 60 °C (Clasificación basada en bitumen original) .....	52
XVI.	Ficha técnica bitumen AC-20 .....	54

XVII.	Datos de agregados .....	55
XVIII.	Datos obtenidos para densidad específica bruta sin cenizas volantes .....	57
XIX.	Densidad específica bruta sin cenizas volantes .....	58
XX.	Datos obtenidos para densidad específica bruta con cenizas volantes .....	59
XXI.	Densidad específica bruta con cenizas volantes .....	60
XXII.	Datos obtenidos para densidad teórica máxima sin cenizas volantes .....	62
XXIII.	Densidad teórica máxima sin cenizas volantes .....	63
XXIV.	Datos obtenidos para densidad teórica máxima con cenizas volantes .....	64
XXV.	Densidad teórica máxima con cenizas volantes .....	64
XXVI.	Datos de estabilidad sin cenizas volantes .....	66
XXVII.	Datos de estabilidad con cenizas volantes .....	67
XXVIII.	Datos de fluencia sin cenizas volantes .....	69
XXIX.	Datos de fluencia con cenizas volantes .....	70
XXX.	Relación entre estabilidad vs fluencia sin cenizas volantes .....	71
XXXI.	Relación entre estabilidad vs fluencia con cenizas volantes .....	72
XXXII.	Porcentaje de vacíos .....	73
XXXIII.	Porcentaje de vacíos con cenizas volantes .....	74
XXXIV.	Datos de vacíos de agregado mineral .....	76
XXXV.	Datos de vacíos de agregado mineral con cenizas volantes .....	77
XXXVI.	Datos de vacíos rellenos de asfalto en la mezcla patrón .....	78
XXXVII.	Datos de vacíos rellenos de asfalto con cenizas volantes .....	79
XXXVIII.	Estabilidad .....	84
XXXIX.	Fluencia .....	85
XL.	Comparación entre mezclas .....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>BBL</b>	Barril de petróleo
<b>AC</b>	Bitumen
<b>CSt</b>	<i>Centistokes</i>
<b>Gmb</b>	Densidad específica bruta
<b>Gmm</b>	Densidad teórica máxima
<b>ESAL</b>	Ejes equivalentes
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>Gsb</b>	Gravedad específica del agregado
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Lb</b>	Libra
<b>Psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>MW</b>	Megavatios
<b>C<sub>7</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub></b>	Metacrilato de glúcido
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>N</b>	Newton
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de aluminio
<b>SO<sub>3</sub></b>	Óxido de azufre
<b>CaO</b>	Óxido de calcio
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de hierro
<b>MgO</b>	Óxido de magnesio

<b>K<sub>2</sub>O</b>	Óxido de potasio
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Óxido de silicio
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Óxido de sodio
<b>Pa-s</b>	Pascal-segundo
<b>Psmw</b>	Peso del matraz + agua + agregado
<b>Pesp</b>	Peso específico
<b>Pmw</b>	Peso matraz + agua
<b>Ps</b>	Peso neto seco
<b>Pss</b>	Peso saturado
<b>Psss</b>	Peso seco saturado
<b>VAM</b>	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
<b>VA</b>	Porcentaje de vacíos
<b>VAF</b>	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>plg</b>	Pulgada
<b>C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub></b>	Ribosa
<b>t/ha</b>	Toneladas métricas por hectárea

## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte).
<b>ACAA</b>	American Coal Ash Association (Asociación Americana de Cenizas de Carbón).
<b>Aditivo</b>	Sustancia que se añade en la elaboración del concreto para modificarlo y retardar o acelerar su proceso.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos de Materiales).
<b>Antracita</b>	Carbón mineral que tiene 95 % de carbono.
<b>Biomasa</b>	Materia viva que puede transformarse en un recurso energético no contaminante del medio ambiente.
<b>CCP</b>	Coal Combustion Product (Productos de combustión de carbón).
<b><i>Centistokes</i></b>	Unidad de viscosidad cinemática en el sistema sexagesimal de unidades. Equivale a milímetros cuadrados por segundo.



<b>Deformímetro</b>	Es el instrumento que muestra las deformaciones que se presentan en una pieza.
<b>Diatomitas</b>	Es una roca orgánica silíceas y sedimentaria, formada por diatomeas que son algas marinas.
<b>ECOBA</b>	European Coal Combusion Products Association (Asociación Europea de producción de combustión de carbón).
<b>Eflorescencia</b>	Apariencia superficial de color blanco que se forma debido a la humedad en el concreto o ladrillos.
<b><i>Filler</i></b>	Sustancia mineral permitida para la granulometría que pasa el tamiz número 200, que proviene de agregados pétreos. Podrá ser parte de productos comerciales, partículas finas de caliza o sustancias no plásticas.
<b><i>Fly ash</i></b>	Ceniza de combustible pulverizado de centrales termoeléctricas, a base de carbón.
<b>Fotovoltaica</b>	Cuerpo que puede generar una fuerza electromotriz bajo una radiación luminosa.
<b>Fraguado</b>	Endurecimiento después de moldear el concreto, en un período en el cual pierde su plasticidad.
<b>Hidróxido de calcio</b>	Resultado de la hidratación del óxido de calcio.

<b>Lecho fluidificado</b>	Es la tecnología de combustión que se utiliza en las centrales termoeléctricas en donde la corriente de fluido es ascendente. Se utiliza para suspender las partículas sólidas.
<b>Lignito</b>	Es un carbón fósil que contiene entre 55 y 75 % de carbono. Se usa como combustible en centrales térmicas.
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
<b>Nivel freático</b>	Corresponde al nivel superior del agua subterránea.
<b>PET</b>	Tereftalato de polietileno. Se le llama así a la clase de plástico usado en envases de bebidas y textiles.
<b>Picnómetro</b>	Recipiente requerido con el cual se puede determinar la densidad de un líquido.
<b>Precipitación Electrostática</b>	Proceso en el cual, mediante ionización, se atrapan partículas por atracción de una carga electrostática inducida.
<b>Pulverizado</b>	Proceso en el cual se reduce un sólido a partículas pequeñas.
<b>Punto inflamador Cleveland</b>	Se la llama así a la temperatura mínima a la cual se produce el encendido, cuando una mezcla se inflama al acercársele una llama.

<b>Puzolana</b>	Son materiales naturales o artificiales que contienen sílice alúmina, de origen natural, reaccionan con el hidróxido de calcio del cemento y forman compuestos con propiedades hidráulicas.
<b>Solubilidad de Tricloroetileno</b>	Medida de la pureza de un cemento asfáltico en la que se conocen los constituyentes cementantes activos.
<b>Sulfatos</b>	Sales del ácido sulfúrico, contienen un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno sulfato.
<b>Tobas</b>	Rocas ígneas volcánicas resultado de la erupción volcánica.

## RESUMEN

Este trabajo de graduación consistió en utilizar cenizas volantes de carbón mineral, como *filler* del tamiz 200, en la granulometría que conforma el diseño de la mezcla asfáltica en caliente (ASTM D 1559). La ceniza volante de carbón se adicionó a la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall (ASTM D 1559), que es un método de diseño de mezclas asfálticas de pavimentación, con el cual se puede determinar la proporción adecuada de asfalto y agregado que requerirá una mezcla para realizarse en el laboratorio y que, en el futuro, se utilizará *in situ*.

Se realizaron los ensayos respectivos para lograr determinar el propósito del método Marshall, analizando el agregado, el bitumen y el agregado fino para realizar el diseño. Al concluir se determinaron los resultados positivos que se obtuvieron a través de adicionar las cenizas volantes. Fue necesario analizar la gravedad específica de la ceniza y conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica a través de ensayos mecánicos en laboratorio, en donde se logró conocer la estabilidad de cada probeta que se logró obtener, ya que es importante para determinar la capacidad de resistencia de tránsito y la fluencia, y también es importante para determinar la deformación del pavimento al momento de existir movimiento de tránsito.

Se obtuvieron los resultados y, por medio de gráficas, se pudo determinar el contenido óptimo de bitumen para la mezcla asfáltica con cenizas volantes, y se pudo conocer el comportamiento en comparación con una mezcla patrón, en la que se pudo identificar que hubo un resultado positivo en el porcentaje de vacíos, ya que se cumplió con lo establecido en las normas.





# OBJETIVOS

## General

Determinar la viabilidad de agregar cenizas volantes de carbón mineral en una mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

## Específicos

1. Conocer el porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica en caliente adicionando cenizas volantes, y realizar una comparación con la mezcla patrón.
2. Identificar las propiedades mecánicas del diseño de la mezcla caliente y las características físicas de los agregados y el bitumen.
3. Conocer el comportamiento de la mezcla con cenizas volantes por el método Marshall.
4. Comparar ambas mezclas e identificar las diferencias entre ellas.
5. Determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla con cenizas volantes.
6. Verificar que el diseño de la mezcla con cenizas volantes cumpla con los requerimientos de la sección 401 de las Especificaciones generales para

la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.

## INTRODUCCIÓN

Las cenizas volantes son el resultado de las emisiones que produce la combustión de carbón mineral en las centrales termoeléctricas. En este trabajo de graduación se busca implementarlas en determinados porcentajes en un diseño y se pretende verificar si la ceniza volante es viable como material adicionado en una mezcla asfáltica en caliente, para lo cual se determinará su comportamiento por medio del diseño de mezcla mediante el método Marshall.

Para elaborar este diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall se tomarán como base las Normas ASTM D 1559 (Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall), ASTM C 618-08a (Especificación normalizada para ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso en concreto) y la sección 401 (Pavimento asfáltico en caliente), del libro de Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.

El primer capítulo trata acerca de los antecedentes de la ceniza, su utilización y las áreas donde ha sido implementada, así como su uso en Guatemala y la cantidad que se produce de energía con la materia prima.

En el segundo capítulo se definen las cenizas, su origen y cómo se obtienen, también se mencionan las normas para poder clasificar su tipo, así como sus características físicas y químicas.

El tercer capítulo menciona las medidas de mitigación ambientales que se deberían tomar respecto a las cenizas volantes, mientras que el cuarto capítulo muestra el desarrollo experimental y los parámetros según las especificaciones de la Dirección General de Carreteras y Puentes de Guatemala, así como los resultados obtenidos por medio de ensayos mecánicos.

Por último, el quinto capítulo muestra el análisis de resultados en cuanto a los análisis de vacíos, de agregado mineral y de relleno mineral en una mezcla asfáltica, así como la estabilidad y la fluencia (sección 401 de las especificaciones de la Dirección General de Carreteras y Puentes de Guatemala), por medio de tablas de resultados, esquemas y gráficas, para poder comprender todo de una mejor manera.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

En el año 1934 se logró demostrar que la ceniza era importante en el concreto, según estudios realizados por McMillan y Powers, pero investigaciones posteriores, en 1937, realizadas por Davis, Carlson y Kelly, determinaron que la ceniza es una fuente de puzolana. Con el descubrimiento de estos investigadores, al transcurrir el tiempo, los trabajos con este material se fueron repitiendo y extendiendo en su uso.

En las últimas décadas se ha utilizado la ceniza volante en diferentes proyectos de construcción en países como Estados Unidos, España e Inglaterra, y se han obtenido resultados satisfactorios, por lo cual se ha utilizado en conjunto para la fabricación de materiales o para mejorarlos, como ha podido ser en concreto pre esforzado, concreto resistente a sulfatos, estabilizador de suelos, material de relleno, entre otros.

Las principales industrias consumidoras de cenizas volantes en los Estados Unidos las utilizan en cemento Portland, se pueden añadir en la fábrica de cemento o donde se fabrica el concreto, en bases y subbases, autopistas, carreteras y estabilización de suelos. Otros campos de menor consumo pueden ser el aditivo en morteros, los componentes de las mezclas para limpieza de superficies metálicas, la fabricación de bloques y el acondicionador de suelos agrícolas.

### **1.1.1. Trabajos realizados con diseños de mezclas asfálticas en caliente como relleno mineral**

Respecto al asfalto se han realizado estudios en la Universidad de San Carlos en los que se experimentaron diseños de mezclas. En el 2014, el ingeniero Carlos Iván López López, con el trabajo de graduación El reciclado de barro cocido como agregado en el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall, pretendía conocer las características de la mezcla al utilizar este material. Los resultados que se obtuvieron fueron que las probetas presentaron una alta deformación que sobrepasó los límites de la norma establecida, en cuanto a la granulometría del barro cocido se necesitaron porcentajes entre 10 % de peso de bitumen hasta 18 %; la estabilidad sí llegó a cumplir el mínimo que la norma permite, por lo cual se determinó que sí era resistente, más presentaba demasiada deformación y se recomendó que se tenía que ser muy cuidadoso, ya que la granulometría de una mezcla asfáltica influye en su totalidad para un diseño de mezcla asfáltica en caliente.

En el 2016, el ingeniero Javier Antonio del Cid Morales realizó el trabajo de graduación Uso de cal hidratada como relleno mineral para el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, en donde utilizó una cantidad de 1,5 % del peso total de la mezcla, lo cual provocó que hubiera una mejor cohesión entre partículas y, al momento de aplicarle carga, no hubiera desprendimiento; también presentó una mayor deformación con la adición de cal y, respecto a la mezcla, el contenido óptimo de bitumen disminuyó en comparación con la mezcla patrón, ya que se redujo el contenido de bitumen, aumentó la resistencia y redujo los vacíos, pero tuvo una fluencia o deformación grande y también hubo reducción de humedad y se recomendó que, para cada diseño de mezcla asfáltica, se debía determinar una cantidad óptima de cal hidratada.

## **1.2. Trabajos realizados con cenizas volantes**

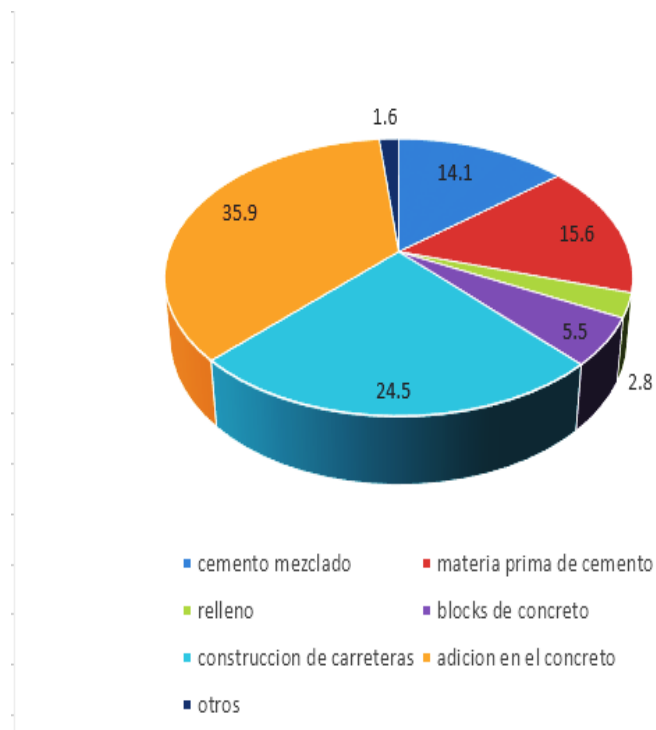
Los trabajos realizados con cenizas volantes tienen un alto consumo en Estados Unidos y países del continente europeo como Inglaterra, que utilizan las cenizas volantes en la construcción.

- En el año 1938 en Canadá, se utilizó las cenizas volantes como componente en el concreto. Las cenizas fueron un componente fundamental gracias a las propiedades puzolánicas que aportan.
- En Estados Unidos se utilizaron cenizas volantes en las presas de la empresa Caballo Hambriento en Montana, Estados Unidos las cuales fueron construidas en 1948 y 1953 por la Oficina de Recuperación de los Estados Unidos, del Cuerpo de Ingenieros.
- En el año 1949 las cenizas volantes se emplearon en pozos de petróleo.
- En la cimentación del puente de Mackinac en Michigan, Estados Unidos, en el año 1957.
- En España, en la Carretera Sevilla-Granada, en 1989.
- En Alemania se utilizó concreto con cenizas volantes en las torres Castor y Polux en la ciudad de Frankfurt.
- En Hamburgo, en el túnel sobre el río Elbe.
- Parques eólicos construidos con concreto con cenizas volantes, en Escocia.
- En Francia también se ha utilizado como sustitución del cemento Portland, en Holanda para la fabricación de ladrillos y en Alemania para la fabricación de bloques y paneles de concreto.

Las ventajas de la utilización de cenizas volantes como sustitución de parte del cemento Portland son la economía y la docilidad, y una de las propiedades interesantes en la inyección de pozos a gran profundidad fue su

economía, ya que en el año 1965 se utilizaron más de 120 000 ton con cenizas volantes.

Figura 1. **Utilización de cenizas volantes en industrias de la construcción en Europa, 2010**

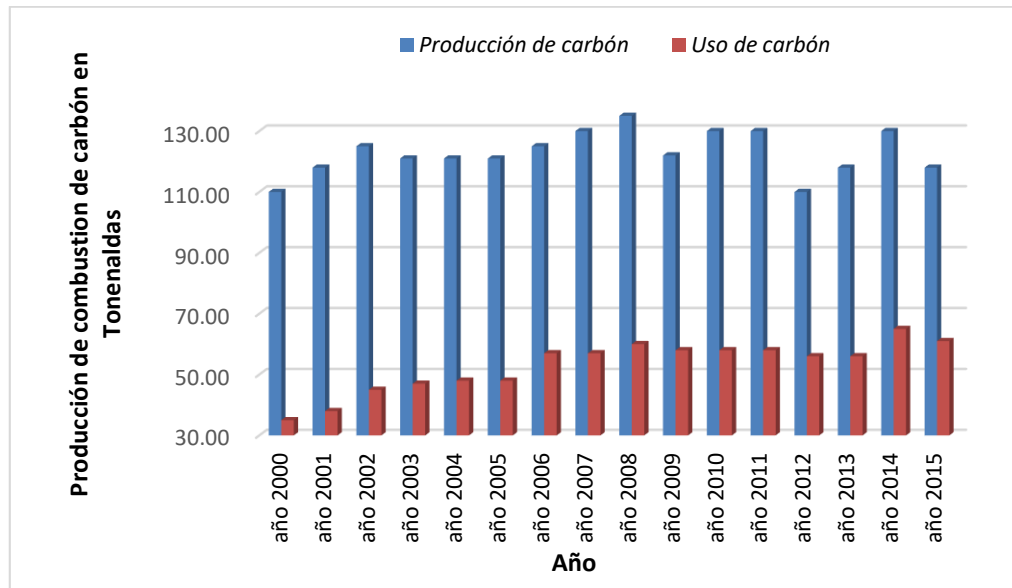


Fuente: elaboración propia.

Asociación Europea de Productos de Combustión de Carbón (ECOBA) es la entidad que controla la utilización de cenizas volantes en Europa. Muestra los porcentajes en que se ha utilizado este material en diferentes partes de la industria de la construcción.



Figura 2. **Producción y uso de carbón en los años 2000-2015 según ACAA**



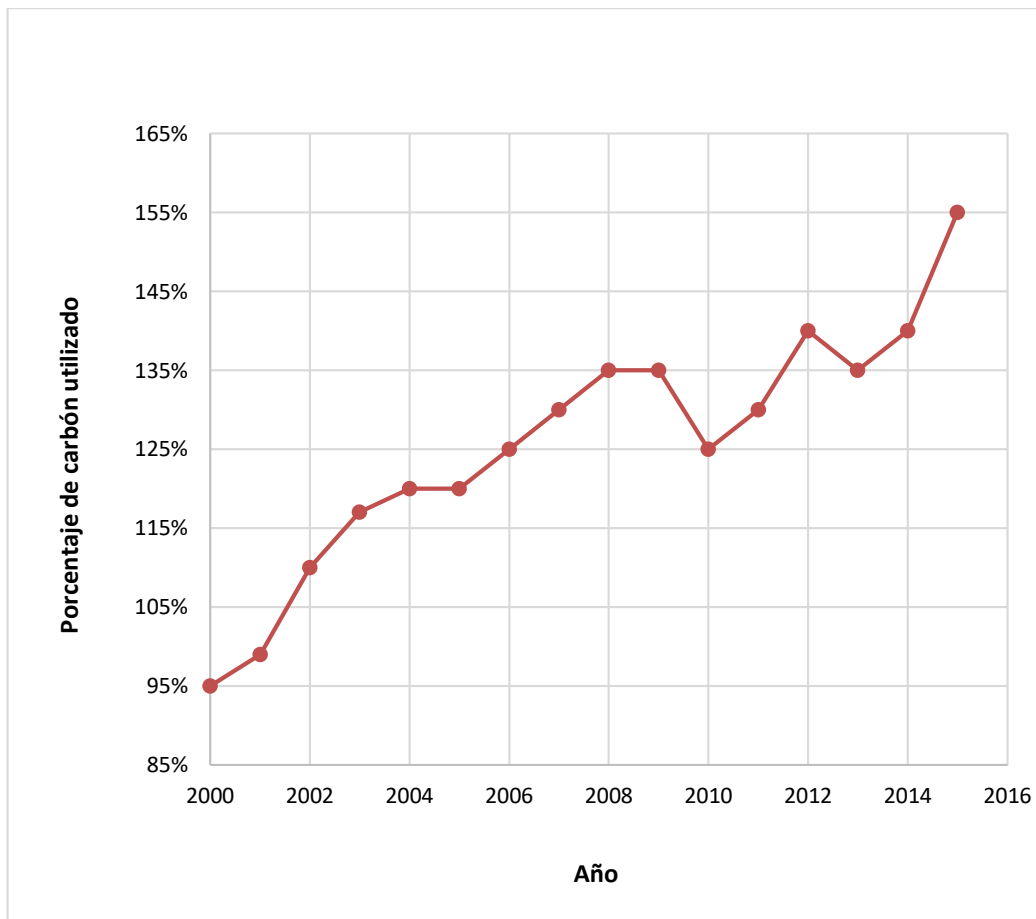
Fuente: elaboración propia, con base en *Producción y uso con porcentaje*. <https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2015.pdf>. Consulta: 26 de abril 2017.

Según la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (ACAA), el carbón es una gran fuente de energía en generación de electricidad para los Estados Unidos, ya que se producen volúmenes de ceniza de carbón desde el año 1968. La asociación ha seguido la producción y el uso de los tipos de ceniza de carbón, a los cuales se les ha dado un uso beneficioso.

En el 2015 disminuyó en un 10 %, ya que la electricidad disminuyó, por ello su utilización se redujo a un 2,0 % en general, pero aumentó en aplicaciones claves.

En la producción del concreto aumentó a 15,7 millones de toneladas en el 2015, superando al 2014, que había producido 13,10 millones de toneladas.

Figura 3. **Producción de carbón usando en los años 2000-2015**



Fuente: elaboración propia, con base en *Producción y uso con porcentaje*. <https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2015.pdf>. Consulta: 26 de abril 2017.

Tabla I. **Producción de combustión de carbón según la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (ACAA)**

<b>Producción de combustión de carbón. 2015</b>	
<b>2,015 CCP (Categorías)</b>	<b>Cenizas volantes (toneladas)</b>
Concreto	15 737 238,00
Cemento	3 629 151,00
Relleno	107 263,00
Rellenos estructurales	1 277 356,00
Bases y sub-bases	178 281,00
Estabilización de suelos	216 483,00
<i>Filler</i> mineral en asfaltos	52 784,00
Aplicaciones mineras	1 128 682,00
Agricultura	2 409,00
Servicios de campo de petróleo	181 907,00
<b>Total CCP</b>	<b>22 511 554,00</b>
<b>Porcentaje de producción</b>	<b>54,24 %</b>

Fuente: elaboración propia, con base en ACAA. Reciclaje de la ceniza de carbón. [www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2015.pdf](http://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2015.pdf). Consulta: 26 de abril 2017.

Al usar cenizas volantes en la fabricación de concreto se reduce la cantidad de cemento, esto hace que se reduzcan también las emisiones de gases de efecto invernadero, que representan 11 millones de toneladas.

### **1.2.1. Utilización de cenizas volantes para capas de base y subbase**

Las estabilizaciones con la combinación de cal y ceniza han resultado ser eficientes y económicas, al mismo tiempo presentan un valor de soporte mayor si se mezclan con suelo granular, y se pueden utilizar en bases para carreteras y también para subbases. Las cenizas se utilizan por su contenido de sílice y alúmina y se combinan con la cal dando resultados positivos a las estabilizaciones.

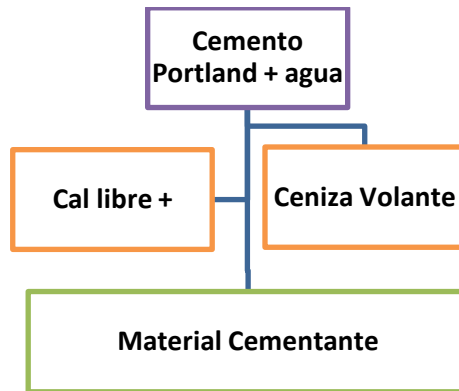
Las cenizas volantes que presentan bajo porcentaje de CaO al 10 % junto con la cal, se han utilizado en Europa para la fabricación de grava, porque estas son útiles para proyectos de carreteras en donde se necesitan para capas base. Se suelen utilizar porcentajes entre el 8 % y el 12 % de ceniza volante, junto con los porcentajes requeridos de cal y de humedad para la composición de bases.

Con esto se obtiene el valor de soporte necesario, mientras que las cenizas con valores de CaO mayor al 10 % utilizan menores porcentajes de cal; cuando se realiza la compactación alcanzan valores de soporte altos, pero el inconveniente es que pueden presentar expansiones.

### **1.2.2. Utilización de cenizas volantes en el concreto**

Las cenizas se empezaron a utilizar en el concreto debido a su propiedad puzolana, que se obtiene por la manera y la velocidad con la que la sílice que contiene la ceniza volante se combina con el hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ), que es liberado por la hidratación del cemento Portland. Se dice que la ceniza volante tiene una velocidad de reacción menor que la mayoría de las puzolanas.

Figura 4. **Cemento con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

En España se han utilizado las cenizas volantes en la elaboración del concreto. El fin de la ceniza es mejorar el comportamiento del concreto porque se ha demostrado que reduce la cantidad de cemento necesario, disminuye el calor de hidratación y reduce las fisuras en la superficie. También aumenta la resistencia al ataque de sulfatos, aunque su fraguado es lento, pero disminuye la porosidad y evita la segregación. Al adicionar las cenizas en el concreto también provoca que la permeabilidad disminuya. Este material alcanza una resistencia superior que una mezcla normal, y es por eso que se ha utilizado en la construcción de presas, puertos, carreteras, entre otros. Aunque se recomienda que no se utilice más del 35 % del peso del cemento en las construcciones.

### **1.2.3. Utilización de cenizas volantes en terraplenes**

Los suelos arcillosos sufren expansión y, cuando no contienen cierta humedad, reducen su volumen y causan daños en su estructura por la presión que ejerce el suelo. Por eso es necesario modificar el suelo para cambiar sus

propiedades y evitar estos conflictos, para ello se ha utilizado las cenizas volantes para poder estabilizar el suelo y así poder modificar sus propiedades. Se han realizado pruebas adicionando cenizas en las cuales el límite líquido disminuye.

Se utilizan cenizas en taludes debido a que presentan una estabilidad superior a la de los suelos arcillosos, y por eso se emplean cada vez más, también se utilizan porque presentan ventajas por su baja densidad, baja compresibilidad y una alta resistencia al esfuerzo cortante; así se considera que se tiene un buen comportamiento en suelos naturales finos.

Las cenizas que se han utilizado en terraplenes han sido las de clase C, según la Norma ASTM 618-08a: *Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (Especificación estándar para ceniza volante de carbón y de puzolana natural calcinada para uso en el concreto)*, que se denominan sílico-aluminosas. Entre las ventajas que presentan está que reducen los asentamientos. Una de las características de las cenizas es que presentan el 70 % de peso unitario, más bajo que el de la mayoría de los suelos, y esto permite la utilización con ventajas sobre otros.

Hay ocasiones en que se han utilizado estas cenizas donde hay exceso de humedad, y esto es una desventaja, por lo tanto, se debe colocar una capa de material permeable si hay riesgo de nivel freático. Cuando se coloca ceniza en los taludes se deben proteger de la humedad y del viento, por lo cual se debe recubrir con una capa de suelo vegetal, ya sea suelo limoso o arcilloso, para evitar que la humedad se infiltre en el terraplén.

Las cenizas son apropiadas debido a su peso específico que es reducido, y su naturaleza presenta cohesión y fricción. También lleva a presiones laterales reducidas, por ejemplo, en la parte superior de un muro de contención.

#### **1.2.4. Uso agronómico de cenizas volantes**

Las cenizas se han utilizado para mejorar los suelos de cultivo, ya que contienen buenas propiedades, con un pH adecuado para poder neutralizar los suelos ácidos y la elaboración de suelos artificiales de cultivo. Se han utilizado en Alemania por la fuente de potasio y calcio, pero en Estados Unidos se han realizado estudios en que se ha demostrado la utilidad de emplear estas cenizas para el cultivo de maíz en una cantidad de 450 toneladas por hectárea. También se han obtenido buenos resultados al utilizar cenizas en el cultivo de papas, ya que mejora su calidad, esto según la empresa Ohio Power Co.

También se han utilizado en el cultivo de centeno y alfalfa, utilizando tres cuartas partes de ceniza y un cuarto de suelos ácidos, pero también ha provocado que terrenos de zonas mineras se transformen en zonas cultivables, y han dado resultados positivos utilizando 1 350 t/ha de cenizas volantes mezcladas con el terreno con una profundidad de 0,30 m. Al utilizar esas cantidades cambia la composición química del terreno, aumentando el pH del mismo, así como el nitrógeno, fósforo y potasio, mostrando excelentes resultados.

#### **1.2.5. Utilización de cenizas volantes con arcilla**

En la fabricación de ladrillos también se han utilizado cenizas volantes cuando hay escases de arcilla y están en zonas cercanas de la producción de ladrillos. Para este caso se pueden utilizar cenizas que procedan de carbones

bituminosos o de lignitos, ya que no requiere de específicas características físicas o químicas.

En países europeos, como en Inglaterra, existe un consumo por año de treinta mil toneladas de cenizas volantes mezcladas con arcilla para la fabricación de ladrillos; en la mezcla del material se puede contar con el 85 % de cenizas en volumen, y en este caso adquieren buenas resistencias parecidas a los ladrillos normales.

Se realizó una investigación en la Universidad de Virginia, en Estados Unidos, junto con el Departamento de Interior, Oficina de Investigación del Carbón. En este se realizó la fabricación de ladrillos sin arcilla y se utilizaron cenizas volantes, y los resultados se acercaron a un ladrillo hecho solamente de arcilla.

Por lo general se sustituye parte de la arcilla por cenizas, ya que presenta ventajas como requerir menos agua en su proceso, la velocidad de su secado y cocción es más rápida, provocando que la porosidad sea menor, para así producir un ahorro energético y de materias primas, pero presentan menos resistencia, mayor absorción, y pueden originar eflorescencia. Se debe controlar la temperatura de cocción y también la calidad del ladrillo.

### **1.3. Situación actual del uso de cenizas volantes en Guatemala**

Existe producción de cenizas volantes en Guatemala mas no se cuenta con el dato exacto del volumen que generan las termoeléctricas. Se sabe que se reutilizan estas cenizas para distintos fines de tipo industrial, como abono en la agricultura, en la producción del cemento, estabilización de suelos, mas no se cuenta con el dato exacto de la cantidad que se utiliza para dichos proyectos.



### 1.3.1. Empresas generadoras de carbón mineral en Guatemala

El Ministerio de Energía y Minas publicó, en el año 2013, en su revista electrónica, las plantas generadoras y termoeléctricas que producen energía a través de combustible de carbón mineral, las cuales muestran la potencia en megavatios que produce cada una de ellas.

Tabla II. **Capacidad del sistema eléctrico en plantas generadoras**

<b>Termoeléctrica Combustible Carbón Mineral</b>	<b>Unidades</b>	<b>Potencia de Placa (MW)</b>	<b>Potencia efectiva (MW)</b>
San José	1	139,000	137,262
La Libertad	1	20,000	15,876
Las Palmas II	2	83,000	76,347
Generadora Costa Sur	1	30,200	30,025

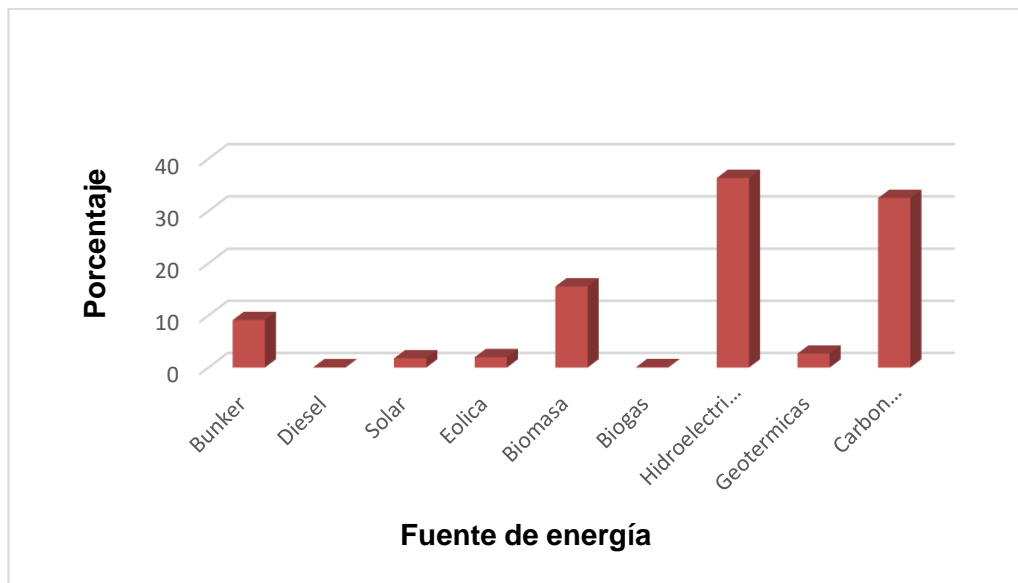
Fuente: estadísticas energéticas del subsector eléctrico 2013. Cuadro No. 13.

Guatemala cuenta con una minoría de termoeléctricas respecto a otros países en lo que se refiere a este sector. Según la revista *Power Magazine* la generadora San José cuenta con depósitos de carbón y con residuos de carbón compactados para su posterior utilización en actividades ajenas.

### 1.3.2. Estimación del consumo de combustible para la generación en energía eléctrica

Se cuenta con estadísticas en que se presentan los porcentajes según el tipo de combustible que se utilizó en el mes de febrero del año 2017, en las que se puede observar que el tipo de energía de biomasa cuenta con un mayor porcentaje, mientras que la generación eléctrica con hidroeléctricas está en segundo lugar en cuanto a su uso, y el carbón mineral ocupa el tercer lugar durante el mes de febrero.

Figura 5. Porcentaje de acuerdo a tipo de energía



Fuente: elaboración propia.

Las estadísticas muestran que la energía a base de carbón se utiliza en mayor cantidad. En los últimos años se ha utilizado a gran escala esta fuente de energía en Guatemala.

Tabla III. **Capacidad instalada por país y tecnología en MW año 2015**

<b>Tipo de energía</b>	<b>Guatemala (MW)</b>	<b>Honduras (MW)</b>	<b>Nicaragua (MW)</b>	<b>Costa Rica (MW)</b>	<b>Panamá (MW)</b>
Eólica	75,9	152,0	186,2	272,1	205,0
Solar Fotovoltaica	85,0	388,0	-	1,0	42,7
Hidráulica	1 087,0	642,8	148,3	1 810,7	1 724,7
Geotérmica	49,2	-	163,3	208,7	-
Carbón	584,7	39,8	-	-	120,0
Diésel/Bunker	971,8	870,1	731,3	605,1	921,0
Biomasa	876,6	170,6	171,11	34,0	-
<b>Total</b>	<b>3 730,2</b>	<b>2 263,3</b>	<b>1 400,2</b>	<b>2 931,6</b>	<b>3 013,4</b>

Fuente: *Generación eléctrica 2015 y tarifas de electricidad 2016 de Centroamérica.*

[Www.mem.gob.gt/energia/estadisticas-energia/estadisticas-energeticas/](http://www.mem.gob.gt/energia/estadisticas-energia/estadisticas-energeticas/). Consulta: 11 de mayo 2017.

Las estadísticas muestran los resultados del año 2015 en los que se puede observar que Guatemala usa mayor energía en carbón en comparación con otros países de Centroamérica, mientras que Panamá también requiere del uso de carbón como combustible, pero en menor cantidad. Se puede observar que la que predomina es la energía hidráulica y luego sigue la energía utilizada con diésel, mientras que el carbón ocupó el cuarto lugar en ese año.

Tabla IV. **Estimación de consumo de carbón en el 2013**

<b>Estimación de consumo de combustible para la generación de energía eléctrica del sistema nacional interconectado. Año 2013</b>					
<b>Periodo</b>	<b>Aceite combustible (BBL)</b>	<b>Diésel (BBL)</b>	<b>Carbón (toneladas)</b>	<b>Bagazo de Caña (Toneladas)</b>	<b>Biodiesel (Galones)</b>
<b>Enero</b>	131 733	5 268	75 272	593 796	44
<b>Febrero</b>	133 857	195	76 767	619 789	-
<b>Marzo</b>	210 085	-	84 862	661 482	44
<b>Abril</b>	279 870	96	79 498	630 996	-
<b>Mayo</b>	313 057	2 143	79 809	412 429	174
<b>Junio</b>	233 982	1 479	68 240	3 247	-
<b>Julio</b>	195 389	114	70 970	179	-
<b>Agosto</b>	166 727	308	83 638	-	-
<b>Septiembre</b>	57 729	890	78 378	-	41
<b>Octubre</b>	100 244	536	72 144	11	11
<b>Noviembre</b>	78 889	47	75 155	445 986	-
<b>Diciembre</b>	36 353	39	92 977	722 547	-
<b>Total</b>	<b>1 937 953</b>	<b>11 116</b>	<b>937 710</b>	<b>4 090 459</b>	<b>313</b>

Fuente: estadísticas energéticas del subsector eléctrico 2013.

Se presentan datos de 2013 de lo que se generó en toneladas en el transcurso del año, en lo que refiere a diésel, aceite combustible, bagazo de caña, biodiesel y carbón, así como el total durante ese año. En esta estimación de consumo se puede observar que, del período de enero a diciembre del año 2013, según las estadísticas de energía se consumió gran cantidad de carbón, siendo el dato de 937 710 toneladas, mientras que fue el bagazo de caña el combustible que más se utilizó en ese año, con 4 090 459 toneladas.



## 2. CENIZAS VOLANTES

### 2.1. Cenizas volantes

Las cenizas pueden variar desde un color negro hasta un gris claro, y esto depende de la fuente de la cual se obtenga. Entre sus características físicas está el color gris, que indica su alto contenido de cal, y el color gris a negro, que indica alto contenido de carbón; si se requiere cierta apariencia será necesario controlar la selección del color. También se ha calificado como una puzolana de acuerdo a las propiedades que presenta al combinarse con el hidróxido de calcio, liberado por la hidratación del cemento Portland. La velocidad de su reacción es menor que la de una puzolana natural.

Figura 6. **Cenizas volantes de carbón**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

La granulometría de la ceniza suele ser constante, pero puede ser afectada debido a la eficiencia de los molinos de carbón, la fuente y la operación del horno, también por los métodos de precipitación al momento de cambiar de etapa. Si se requiere un efecto ante la resistencia del concreto se debe controlar la fineza con un tamiz de malla de cuarenta y cinco micras, para controlar el tamaño de las partículas.

### **2.1.1. Definición**

Puede definirse como un polvo fino con partículas esféricas cristalinas, que tiene propiedades propias de las puzolanas y que está compuesto fundamentalmente de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El contenido de  $\text{SiO}_2$  reactivo debe ser al menos del 25 % en masa.

### **2.1.2. Origen**

Son originadas por la combustión del carbón. Antes de someterlo a combustión el carbón es pulverizado por medio de molinos, luego se coloca dentro del horno con una corriente de aire caliente con cierta velocidad y en suspensión, y se quema a una temperatura de  $1500 \pm 200$  °C. Durante el proceso no se logra la combustión de todas las partículas y es cuando se da origen a las partículas de ceniza; sus características físicas dependen de la temperatura en el hogar, tipo de carbón, la finura y su tiempo en la combustión. Se originan dos tipos: las cenizas volantes y las cenizas de hogar, también llamadas escorias. Ambas difieren del tamaño de sus partículas. Las primeras se obtienen de la precipitación electrostática del polvo producto de la combustión, las partículas que descienden por gravedad son las de mayor tamaño y se extraen del arrastre con agua a tanques provisionales.



La cantidad de cenizas depende del tipo de caldera y del proceso de combustión. El 80 % del total de la ceniza se denomina ceniza volante y el 20 % que resta se denomina de hogar o escoria, consumiéndose el 30 % de la masa de carbón. La calidad de la ceniza depende de los tipos de carbón y los quemadores en el proceso.

### **2.1.3. Procesado**

El proceso para poder obtener cenizas en una termoeléctrica comienza en los depósitos donde se almacena el carbón que suministra a la central, luego pasa a la caldera en donde se realiza la combustión, el calor que genera es usado para producir vapor a altas presiones y temperaturas, para activar las turbinas y generar electricidad; en este momento el rotor gira con el de un generador que produce energía eléctrica y esta se transporta por las líneas de alta tensión a los respectivos centros de consumo.

Luego, a una temperatura de 40 °C, el vapor se convierte en agua que se conduce a la caldera y comienza de nuevo el ciclo en donde el vapor se convierte en agua líquida que vuelve a la caldera. El carbón que no logra la combustión es lo que se transforma en cenizas volantes. Cuando se pulveriza totalmente el carbón, al realizar la combustión, la mayoría de residuos se desprenden y quedan en suspensión en forma de partículas fundidas y estas se solidifican a temperatura baja. A estas partículas se les conoce como cenizas volantes y las partículas más gruesas se depositan en el fondo, formando así las cenizas de hogar o escorias. Hay distintos procesos de las cenizas como pueden ser las centrales térmicas de alta temperatura, en las que la combustión del carbón se realiza a temperaturas de 1 500 a 1 700 °C, un 85 y 90 % caen en un baño de agua y se convierten en partículas sólidas y una pequeña cantidad de finos va a los precipitadores electrostáticos en forma de cenizas volantes.

También está la central térmica de combustión seca, en la que la combustión del carbón está entre 1 110 °C y 1 400 °C, un 90 % de cenizas permanece en los precipitadores electrostáticos y las centrales de lecho fluidificado, en donde la combustión del carbón es a una temperatura menor que 900 °C. Aquí pueden contener un alto porcentaje de partículas cristalinas, pero no pueden considerarse cenizas volantes en su totalidad.

#### **2.1.4. Obtención de la muestra de la planta generadora de cenizas volantes**

Para la obtención de muestras en una planta generadora, los colectores mecánicos de tipo multiciclón recogen un 85 % de cenizas volantes y los colectores electrostáticos tienen un 10 % más de recolección de cenizas. Cada dos horas se toma una muestra y la porción guardada en un frasco se coloca en un panel pintado de gris con tono del 2 %. En dicho panel están las muestras del día, en una habitación de control, y los operadores hacen comparaciones periódicas de las condiciones de combustión y así efectúan las correcciones necesarias.

Si se tienen muestras con contenidos de carbón satisfactorios, las cenizas se trasladan a un silo determinado, pero si el contenido de carbón es elevado, se arrastran con agua al lugar destinado al efecto y el problema se resuelve moliendo las cenizas en un molino de bolas, hasta lograr la finura deseada, y con este proceso se consigue obtener las muestras con bajo contenido de carbón para así cumplir con la Norma ASTM 618-08 a.

### **2.1.5. Disposición**

En países de Europa y Estados Unidos está disponible en las centrales termoeléctricas, a base de carbón, para fábricas que requieran el uso de este material, en depósitos de donde se transportan a las empresas que lo requieran. Regularmente son volúmenes en toneladas los que logran manejar, ya que gran base de energía en Estados Unidos es a base de centrales termoeléctricas.

## **2.2. Clasificación de cenizas volantes según Norma ASTM C 618-08 a**

La Norma ASTM C 618-08<sup>a</sup> *Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (Especificación estándar para ceniza volante de carbón y de puzolana natural calcinada para uso en el concreto)*, muestra las características de cada tipo de ceniza volante y nombra las características físicas y químicas de cada una de ellas al utilizarse en el concreto.

### **2.2.1.1. Clasificación C**

En esta clasificación las cenizas presentan propiedades puzolánicas y cementantes, contienen gran cantidad de cal, entre un 15 % y 30 %, y son producidas por la calcinación de carbón subbituminoso o lignito.

### **2.2.1.2. Clasificación F**

En esta clasificación las cenizas presentan propiedades puzolánicas y contienen pequeñas cantidades de cal inferiores al 15 %, sílice, aluminio y hierro. Son producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso.

### 2.2.1.3. Clasificación N

Esta clasifica las cenizas como puzolana natural, entre ellas tovas, diatomitas y ceniza volcánica, calcinadas y sin calcinar; posee propiedades puzolánicas.

### 2.2.2. Composición de las características físicas de las cenizas volantes

Las cenizas presentan entre sus características físicas un color gris claro, o según sea el carbón sin quemar, dependen de muchos factores como el tipo de caldera, la temperatura, el tipo de extractor y el grado en que se pulveriza. En cuanto a su granulometría suelen ser similares al cemento Portland en el que su tamaño está entre 0,2 y 200 micras respecto a su diámetro, su densidad es de 0,89 g/cm<sup>3</sup> y tienen un peso específico entre 2,0 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>.

Tabla V. Características físicas de las cenizas volantes

Descripción	Clasificación N (Porcentaje)	Clasificación F (Porcentaje)	Clasificación C (Porcentaje)
Cantidad de finos retenidos, por medio de tamiz de 45° (N° 325), cantidad máxima permitida.	34	34	34
Índice de actividad: <sup>A</sup> con cemento Portland a los 7 y 28 días.	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>

Continuación tabla V.

Máximo requisito de agua si la ceniza volante constituye más del 20 % en masa del material cementico en la mezcla del proyecto.	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Máximo expansión o contracción <sup>C</sup>	0,8	0,8	0,8
Densidad y fineza no pueden variar respecto al promedio establecido, si las pruebas son menores que diez.	5	5	5
Porcentaje retenido en 45 micrómetros (No.325), variación máxima.	5	5	5
<p><sup>A</sup>El índice de actividad de la fuerza con el cemento Portland no se debe considerar como medida de la resistencia a la compresión del concreto que contiene ceniza volante o puzolana natural. La masa de ceniza volante o puzolana natural especificada para la prueba para determinar el índice de actividad con cemento Portland no se considera la proporción recomendada para el concreto que se utilizará en obra. La cantidad óptima de ceniza volante o puzolana natural para cualquier proyecto específico está determinada por las propiedades requeridas del concreto y otros componentes de este y se establecerá mediante pruebas. El índice de actividad con cemento portland es una medida de reactividad con cemento y está sujeto a variación dependiendo de la fuente tanto de la ceniza volante como de la puzolana natural y del cemento.</p>			
<p><sup>B</sup> Indica el cumplimiento del índice de actividad de 7 a 28 días e indicará el cumplimiento de la especificación.</p>			
<p><sup>C</sup> Si la ceniza volante o la puzolana natural constituyen más del 20 % en masa del material cementico en la mezcla del proyecto, los especímenes de prueba para la expansión en autoclave contendrán ese porcentaje previsto. La expansión excesiva de autoclave es altamente significativa en los casos en que las proporciones de agua en el material de cemento son bajas, por ejemplo en mezclas de bloques o concreto proyectado.</p>			

Fuente: Norma ASTM C 618 - 08<sup>a</sup>. Tabla II.

Las cenizas son semejantes a un suelo limoso en cuanto a su granulometría, ya que están entre 80,0 % y 95,0 % el tamaño de sus partículas. No poseen plasticidad debido a que no hay en ellos minerales arcillosos. No se presenta una relación clara entre la densidad y el peso específico de las partículas, su permeabilidad es similar a la de un suelo limoso cuando estas son compactadas y poseen una baja compresibilidad, la cual es una gran ventaja, ya que reduce asentamientos diferenciales.

### 2.2.3. Composición de las características químicas de las cenizas volantes

La composición química depende del carbón que se utilice, por lo general poseen sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y carbón sin quemar y, en una proporción del 5,0 % en peso, contienen óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) y en cantidades reducidas contienen compuestos como galio, titanio, manganeso, fósforo, germanio, vanadio.

Tabla VI. **Requerimientos químicos**

Descripción	Clasificación N (Porcentaje)	Clasificación F (Porcentaje)	Clasificación C (Porcentaje)
Óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	70,0	70,0	50,0
Máximo trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ )	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad	3,0	3,0	3,0

Continuación tabla VI.

Perdida por ignición	10,0	6,0 <sup>A</sup>	6,0
<sup>A</sup> El uso de puzolana de clase F que contenga hasta 12,0 % de pérdida por ignición puede ser aprobado por el usuario si los registros de desempeño aceptables o los resultados de las pruebas de laboratorio están disponibles.			

Fuente: Norma ASTM C 618 - 08<sup>a</sup>. Tabla I.

Por su composición química y la procedencia del carbón de origen, se pueden clasificar en cenizas sílico-aluminosas, llamadas también puzolánicas o no activas, con contenidos de óxido de calcio menores al 10,0 %. Su pH puede ser superior a 10,0, también están las cenizas sulfo-cálcicas, que contienen altos contenidos de óxido de calcio con más del 10,0 %. Se les puede llamar también hidráulicas o activas, se comportan como aglomerantes hidráulicos y su fraguado y endurecimiento es semejante al del cemento.

### **2.3. Otras cenizas volantes**

#### **2.3.1. Ceniza volcánica**

La ceniza volcánica es el resultado de cuando ocurre una erupción de una roca que ha sido convertida en polvo o arena debido a la actividad volcánica. Las cenizas tienen un tamaño inferior a 2 mm, por la densidad que poseen la columna eruptiva las eleva a una gran altura a donde son trasladadas por el viento a mayores distancias, pero a veces pueden estar acompañadas por partículas de mayor tamaño.

En el 2015 se logró crear un ladrillo apto para la construcción de casas, coordinado por la Universidad Nacional de Río Negro de Argentina, para utilizar este material en consecuencia al volcán que hizo erupción. Se determinó que estos bloques contienen una alta resistencia térmica, mayor a los bloques comunes. En su tratamiento utilizan un plasma, lo cual provoca que se forme una capa porosa en la superficie. También son resistentes al frío y la capa porosa hace que el producto pueda tener entradas de aire, se unen y se secan naturalmente, y tienen espacios internos que permiten el paso de cables de luz.

Los resultados fueron positivos, ya que resultan más duraderos que el ladrillo tradicional y con resistencia térmica cuatro veces superior. Así se ha dado a conocer este bloque en dicho país y se busca seguir realizando estudios para poder crear cemento y casas y conocer los resultados de estos.

### **2.3.2. Uso de la ceniza de palma africana como aditivo**

Según el ingeniero Gimy Anthony Iquique Siney, en su trabajo de graduación con el tema de Estudio de las características físicas, químicas y mecánicas de la ceniza de palma africana como aditivo para mejorar las propiedades del cemento UGC, la puzolana de ceniza de palma africana utilizada en el ensayo de cilindros de concreto con la adición de ceniza de palma africana, de acuerdo con la fineza dentro de las especificaciones para cenizas volantes, tiene un índice de actividad puzolánica con respecto al cemento (cemento Portland + ceniza volante) que presentó una reducción en su actividad.

En el segundo ensayo de cemento UGC más ceniza volante, presentó un aumento en su actividad puzolánica en el tiempo de curado, pero se encontró fuera de las especificaciones de la norma, sin embargo, la resistencia de las



mezclas con adición de ceniza de palma africana es similar a la obtenida con la mezcla de control. Todo esto fue así en los primeros días, pero perdió resistencia en edades tardías, y la ceniza de palma africana presentó una buena reacción puzolánica con el cemento por su poco contenido de óxido de aluminio y óxido de magnesio.

### 2.3.3. Uso de la cáscara de arroz en morteros

La cáscara de arroz se obtiene del proceso de pilado, en el cual el arroz con su cáscara pasa entre rodillos y es allí donde la cáscara se desprende del grano y luego se realiza la limpieza del residuo. Físicamente presenta una superficie abrasiva y áspera, posee un bajo contenido de proteínas, lo cual la hace resistente a la degradación natural, su actividad puzolánica es excelente y proporciona una buena resistencia a la compresión. La cáscara de arroz está disponible en varias partes del mundo. Cuando es quemada produce aproximadamente una tonelada de ceniza de cáscara por cinco toneladas de cáscara, esta contiene un 90 % de sílice, lo cual la convierte en una excelente puzolana.

Tabla VII. Datos de la cascara de arroz

<b>Celulosa (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)</b>	<b>Lignina (C<sub>7</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>)</b>	<b>Sílice (SiO<sub>2</sub>)</b>	<b>Densidad</b>
50 %	30 %	20 %	0,780 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

La ceniza de arroz, que es el producto de la calcinación de la cáscara de arroz, necesita tener un control cuando se quema, para poder convertirla en puzolana.

Este proceso no debe sobrepasar los 700 °C, puede reemplazar un 30 % de cemento en un concreto, o también puede ser mezclada con un 30 % a 50 % de cal hidratada, para utilizarse como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa. El producto de la ceniza se lleva a cabo por la operación del descascarillado del arroz, el cual produce un material con baja densidad y esto presenta un problema en su almacenamiento.

Se estima que una tonelada de arroz virgen puede producir 200 kilogramos de cascarilla y luego de la combustión puede producir unos 40 kilogramos de cenizas. Las cenizas que se producen a una temperatura baja contienen sílice en forma celular y no cristalina, lo cual lo convierte en un producto puzolánico, mejora las características del concreto en estado fresco y endurecido, disminuye la permeabilidad del concreto e incrementa sus propiedades mecánicas.

### **3. UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA MITIGAR PROBLEMAS AMBIENTALES**

#### **3.1. Problemas ambientales**

Se dice que un problema ambiental es una contradicción hacia el entorno natural. Los problemas ambientales deben solucionarse para que se recupere la normalidad en el medio en que se vive y se deben tomar medidas que puedan llevar a resultados positivos para poder reducirlos al máximo y evitar consecuencias que impliquen mayor daño.

#### **3.2. Residuos sólidos**

Los residuos sólidos son los materiales que han sido desechados cuando se acaba su vida útil, después de su utilización o fabricación, estos pueden ser tomados como basura después de la transformación por la cual han pasado. Las plantas termoeléctricas generan residuos sólidos debido a la gran cantidad de cenizas, ya que estas trabajan a base de carbón. Las cenizas producidas por la combustión pueden contener compuestos químicos como óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio, que no son considerados residuos peligrosos. Las centrales que emplean carbón producen residuos sólidos mediante el proceso de desulfuración de gases de combustión, ya que por medio de este se pretende disminuir las emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). En este proceso se utiliza caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) o cal ( $\text{CaO}$ ), la cual genera yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) como un residuo principal, el cual no es considerado como un residuo peligroso.

### **3.3. Emisiones a la atmósfera**

Las emisiones a la atmósfera dependen de factores como el combustible, el tipo y el diseño de la unidad de combustión, así como de las medidas que se tomen contra las emisiones y el mantenimiento y la eficiencia en el sistema. Las emisiones que son generadas por los combustibles fósiles son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) y gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por el tipo y calidad de combustible, la combustión puede emitir otros contaminantes como metales pesados (mercurio, arsénico, cadmio, vanadio, níquel, etc.), hidrocarburos no quemados y otros compuestos orgánicos volátiles. En los depósitos de cenizas existe fuga de polvo debido al viento que se encuentre en el lugar. La operación de una planta de energía térmica genera emisiones atmosféricas similares a fuentes móviles, que han sido producto de combustión relacionada con motores de vehículos livianos o camiones en su operación.

### **3.4. Medidas de mitigación**

Existe cierto conjunto de medidas que se pueden tomar para menguar el impacto ambiental y hacer que los resultados puedan ser favorables al medio ambiente, es por ello que las termoeléctricas utilizan precipitadores, porque tienen una eficiencia entre ochenta y noventa por ciento y logran recaudar partículas con granulometría de uno a diez micrómetros, ya que por medio de fuerzas electrostáticas atraen a las partículas a sus placas metálicas interiores, porque estas poseen cargas opuestas en sus paredes interiores y, por último, se recaudan en depósitos cónicos que se encuentran en la parte inferior del sistema.

### **3.5. Gestión a nivel nacional e internacional**

El reciclaje a nivel industrial y de domicilio es escaso, ya que en el país no se cuenta con legislación para coadyuvar al ambiente, para que por medio de este se pueda lograr la recuperación y aprovechamiento de residuos sólidos. Se cuenta con algunas empresas privadas que cuentan con tratamiento y disposición final a lubricantes y aceites, pilas, solventes y baterías domésticas, plaguicidas, neumáticos y equipo de computación.

#### **3.5.1. Volumen generado por los sólidos**

El MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales) menciona que se tienen estimaciones del porcentaje de recaudación de residuos únicamente de la ciudad capital, pero no se tienen los porcentajes a nivel nacional ni en los departamentos. El mayor porcentaje se debe a cartón y papel, se estima que para la capital existe un 20 % de volúmenes generados de madera, plásticos, vidrio y metales, y un 50 % de recuperación en textiles.

Un estudio que se realizó en el año 2006 indicaba que se producían desechos sólidos de 6 000 a 7 000 toneladas, y también detalla que un 54 % se produce en zonas urbanas y 46 % en zonas rurales. Los residuos como cartón, PET, papel, vidrio, plásticos y baterías, entre otros, cuentan con una resolución adecuada; se conoce de la recaudación de papel y cartón, pero no se tienen los datos precisos.

Internacionalmente el volumen generado por las cenizas específicamente en España, según ECOBA (European Coal Combustion Products Association, es decir Asociación Europea de Combustión de Carbón), se produjo un volumen de acuerdo a la cantidad de cenizas volantes.

Los datos son publicados por el organismo europeo, que recoge los datos de los países productores de cenizas de carbón.

### 3.6. Reutilización de residuos sólidos

La reutilización de residuos se basa en impedir la contaminación y realizar nuevas obras para formar un nuevo proceso de producción en los materiales que van a reutilizarse.

Tabla VIII. **Reciclaje de sólidos**

País	Porcentaje y utilización
Holanda, Dinamarca y Bélgica	Superan cifras de 90 % en reciclaje con concreto, ladrillos, tejas, etc. Y también reciclan el 100 % de residuos de construcción de carreteras.
Finlandia, Austria y Reino Unido	Reciclan el 40 % y 45 % de residuos básico de construcción y demolición entre 50 % y 76 % de concreto, ladrillos y tejas.
Italia e Irlanda	Reciclan entre un 6 % y 9 % de residuos.
Suecia, Alemania y Francia	Reciclan del 15 % al 20 % de los residuos básicos de construcción y demolición.

Fuente: *Residuos de construcción y demolición.*

[www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf](http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf). Consulta 16 de mayo 2017.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1. Muestreo de la ceniza volante

Es necesario contar con el material que se utilizará en los ensayos, se preparan las muestras con la cantidad de agregado que se utilizará en cada probeta, cada una con diferente porcentaje de bitumen establecido y la ceniza volante necesaria.

### 4.2. Porcentajes de agregado según sección 401 de las Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos

Para utilizar el material adecuado se ensayó con la granulometría especificada en las Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, la cual establece cada tipo de porcentaje de acuerdo al tamaño del tamiz y al tamaño máximo nominal del agregado. En este caso se utilizó una granulometría tipo F.

Tabla IX. **Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)**

Tamaño Del Tamiz	Porcentaje en Masa que pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 Y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal <sup>(1)</sup>					
	A (50,mm)	B (38,1 mm)	C (25,4mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
63,00 mm	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
50,00 mm	100					

Continuación tabla IX.

<b>38,10 mm</b>	95-100	100				
<b>25,00 mm</b>	-	90-100	100			
<b>19,00 mm</b>	60-80	-	90-100	100		
<b>12,50 mm</b>	-	56-80	-	90-100	100	
<b>9,50 mm</b>	35-65	-	56-80	-	90-100	100
<b>4,75 mm</b>	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
<b>2,36 mm</b>	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
<b>0,30 mm</b>	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
<b>0,075 mm</b>	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10
<p>(1) El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10 % del agregado combinado. El tamaño máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.</p>						

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Tabla 401-1.

Esta tabla muestra la graduación y el tamaño máximo nominal necesario para realizar una mezcla asfáltica, así como los porcentajes máximos y mínimos que deben utilizarse.



Tabla X. **Requisitos para la mezcla de cemento asfáltico**

<b>Método de diseño<sup>(1)</sup></b>	<b>Valores Límites</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Marshall (AASHTO T 245)</b>		
Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0,25 Pa-s	0,31 Pa-s
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen <sup>(2)</sup>	75	75
Estabilidad	5 338 N (1 200 Lb)	
Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg):		
Tránsito < 10 <sup>6</sup> ESAL	8	16
Tránsito > 10 <sup>6</sup> ESAL	8	14
Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0,01 pulg.)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada <sup>(3)</sup> . (VA)	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	14	16
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto		
Tránsito < 10 <sup>6</sup> ESAL	65	78
Tránsito > 10 <sup>6</sup> ESAL		
Relación finos/bitumen <sup>(4)</sup>	0,6	1,6
Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283	80 %	
Resistencia retenida		
Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95 %	
<sup>(1)</sup> El porcentaje de vacíos con aire se basa en AASHTO T 166, AASHTO T 209 y AASHTO T 269. <sup>(2)</sup> Cuando se establezca en las Disposiciones Especiales, los especímenes podrán ser preparados usando el compactador giratorio. <sup>(3)</sup> Este valor deberá de calcularse en función de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada. <sup>(4)</sup> La razón polvo-asfalto se define como el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 micrómetros dividido por el contenido efectivo de asfalto calculado por masa de mezcla.		

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Tabla 401-12.

La tabla muestra las especificaciones que se requieren de los valores mínimos y máximos de acuerdo el tamaño nominal máximo del agregado del método de diseño Marshall, para los porcentajes de vacíos de la mezcla compactada en cada probeta.

Tabla XI. **Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)		
	Marshall		
	3 % <sup>(1)</sup>	4 % <sup>(1)</sup>	5% <sup>(1)</sup>
9,50	14	15	16
12,50	13	14	15
19,00	12	13	14
25,00	11	12	13
37,50	10	11	12
50,00	9,50	10,5	11,5

<sup>(1)</sup>Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Tabla 401-13.

#### 4.3. Descripción del método Marshall según Norma AASHTO T 245 o ASTM D 1559

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de bitumen para la combinación específica de agregados, pero también aporta información acerca de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente. Este método solo es válido aplicarlo para mezclas en caliente, se puede utilizar en laboratorio y también en el control de mezclas asfálticas en campo.

Consiste en fabricar probetas cilíndricas, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de bitumen, con medidas de 102mm (4 Plg.) de diámetro y 64 mm (2,5 Plg.) de espesor. Se lleva a cabo el procedimiento de calentar, mezclar y compactar cada probeta que luego se ensayará en el aparato Marshall para poder determinar su estabilidad y deformación en cada una de ellas.

Figura 7. **Probetas con diseño patrón**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1. Equipo a utilizar**

##### **4.3.1.1. Molde para realizar probetas**

Para realizar las probetas son necesarios moldes cilíndricos que tengan un collar de extensión y una placa de base plana, la cual deberá tener un diámetro interior de 101,6 mm y 63,5 mm de altura.

Figura 8. **Dispositivos para moldear probetas**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### 4.3.1.2. **Martillo de compactación**

Es necesario contar con un dispositivo de acero que esté formado por una base plana circular que tenga un 98,4 mm de diámetro y un pistón deslizante de 10 lb de peso total, para que pueda tener una altura de caída 457,2 mm.

Figura 9. **Martillo de compactación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.3. Pedestal de compactación**

Consiste en una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura, que en su parte superior tiene una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor, y está firmemente sujeta a la misma.

Figura 10. **Placa con base plana**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.4. Sujetador para molde**

Es necesario un dispositivo con resorte de tensión para poder colocar el molde y centrarlo al momento de compactarlo sobre el pedestal, de tal manera que quede sujeto y el ensayo pueda realizarse de una manera correcta.

#### **4.3.1.5. Mordazas**

Las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos en los que se colocará la probeta, que tiene un radio de curvatura interior de 2 Plg.

Figura 11. **Mordazas**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.6. Prensa**

Para conocer la fluencia de cada probeta se colocarán en una prensa mecánica donde se les aplicará una velocidad de desplazamiento vertical de 50,8 mm por minuto, y también una capacidad de carga mínima de 40 kg.

Figura 12. **Equipo Marshall**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### 4.3.1.7. **Medidor de estabilidad**

Este sirve para medir la resistencia de cada probeta, con un anillo que tiene un dinamómetro acoplado a la prensa, que sirve para medir las deformaciones del anillo. Esto se hace a través de un deformímetro graduado de 0,0025 mm.

Figura 13. **Medidor de estabilidad**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.8. Horno**

Es necesario un horno con capacidad de mantener una temperatura de 275 grados centígrados, que permita calentar asfalto, los agregados, la muestra y el equipo de compactación. Para ello es muy necesario contar con este aparato electrónico, se deben utilizar guantes para evitar pequeñas quemaduras debido a la alta temperatura.

Figura 14. **Horno**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.9. Estufa para calefacción de los agregados**

Los agregados deben someterse a calefacción junto con el bitumen para que estos puedan adherirse y mezclarse de forma adecuada. Eso es necesario realizarlo manualmente a través de una estufa, se pretende llegar a una mezcla homogénea a una temperatura según la norma establecida, la mezcla debe moverse mientras se adquiere la temperatura de 148 °C que se quiere.



Figura 15. **Estufa para calefacción de los agregados**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.10. Equipo de laboratorio para realizar baño de María**

Se necesita un lugar donde se puedan colocar las probetas asfálticas y dejarlas durante 30 minutos antes de colocarse en la prensa Marshall. Según la norma deberá tener una profundidad mínima de 152,4 mm y una temperatura de 60 °C.

Figura 16. **Equipo para baño de María**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### 4.3.1.11. Termómetros

Los agregados y el asfalto deben estar a la temperatura óptima para que se puedan adherir sin ningún problema y formar la mezcla adecuada y se puedan compactar las probetas para el ensayo Marshall. Para ello son necesarios termómetros que puedan leer rangos entre 9,9° C y 204° C.

Figura 17. Termómetros



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### 4.3.1.12. Balanza manual

Sera útil para pesar agregado, asfalto y probetas compactadas. Debe tener una capacidad de 5 kg. También en el método de la densidad teórica máxima y para densidad, ya que se necesitan los pesos saturados, peso seco y peso seco saturado para realizar los cálculos respectivos.

Figura 18. **Balanza manual**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

#### **4.3.1.13. Identificadores de probetas**

Es necesario identificar las probetas cilíndricas unas de otras, ya que contienen diferentes porcentajes de asfalto, por lo cual es necesario nombrarlas para evitar confusión en el momento de realizar los ensayos y así ser más cuidadosos y ordenados.

#### **4.4. Material a utilizar**

Es necesario contar con el material requerido según la Norma ASTM D 1559 (*Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*, es decir, *Método de prueba estándar para la resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas que utilizan un aparato Marshall*) y según las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos. Es necesario contar con el agregado, el cemento asfáltico y el equipo necesario para la realización de los ensayos.

#### 4.4.1. Agregados

Los agregados constituyen entre el 90 y el 95 % en peso y el 75 y el 85 % en volumen de la mayoría de estructuras de pavimento. Este se ve influenciado en gran parte por la selección apropiada del agregado, ya que es este material el que proporciona mayores características de capacidad en un diseño. Los agregados usados en una mezcla asfáltica se clasifican de acuerdo a su origen:

- Agregados naturales, los cuales son usados en su forma natural con poco o ningún procesamiento, ya que han sido producidos por procesos naturales de erosión y degradación.
- Agregados procesados, que han sido triturados y tamizados antes de ser usados, pueden ser gravas naturales que se trituran para mejorar sus condiciones.
- Agregados sintéticos, que son el resultado de los materiales que llevan a cabo un proceso físico o químico y son subproductos de procesos industriales.

Tabla XII. **Agregado para mezclas tradicionales**

<b>Agregado Grueso (Retenido en el Tamiz de 4.75 milímetros)</b>		
Abrasión	AASHTO T 96	35 % máximo
Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos)	AASHTO T 104	12 % máximo
Caras fracturadas: 1 cara fracturada 2 caras fracturadas		90 % mínimo 75 % mínimo
Partículas planas o alargadas	ASTM D 4791	08 % máximo

Continuación tabla XII.

<b>Agregado fino (100 % Pasa el tamiz de 4.75 milímetros)</b>		
Equivalente de arena	AASHTO T 176	35 mínimo
Índice plástico	AASHTO T 90	4 % mínimo
Graduación N° 2 o N° 3	AASHTO M 29	75 % mínimo 90 % máximo

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Requisitos de los materiales.* Sección 401,03.

Respecto a la graduación, las fracciones de agregado tienen que ser graduadas en proporciones dosificadas para formar una curva granulométrica continua, situada dentro de los límites para el tamaño máximo nominal; tienen que estar libre de materia vegetal o basura que pueda afectar el pavimento y causar fallas. Si es necesario, es útil agregar polvo mineral como un material separado; adicionándolo al agregado pétreo puede consistir en polvo de roca, cemento hidráulico, cal hidratada u otro material inerte no absorbente.

Tabla XIII. **Graduación de polvo mineral**

<b>Estándar mm</b>	<b>Tamiz N°</b>	<b>Porcentaje total que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 37)</b>
0,600	30	100 %
0,300	50	95 - 100 %
0,075	200	70 – 100 %

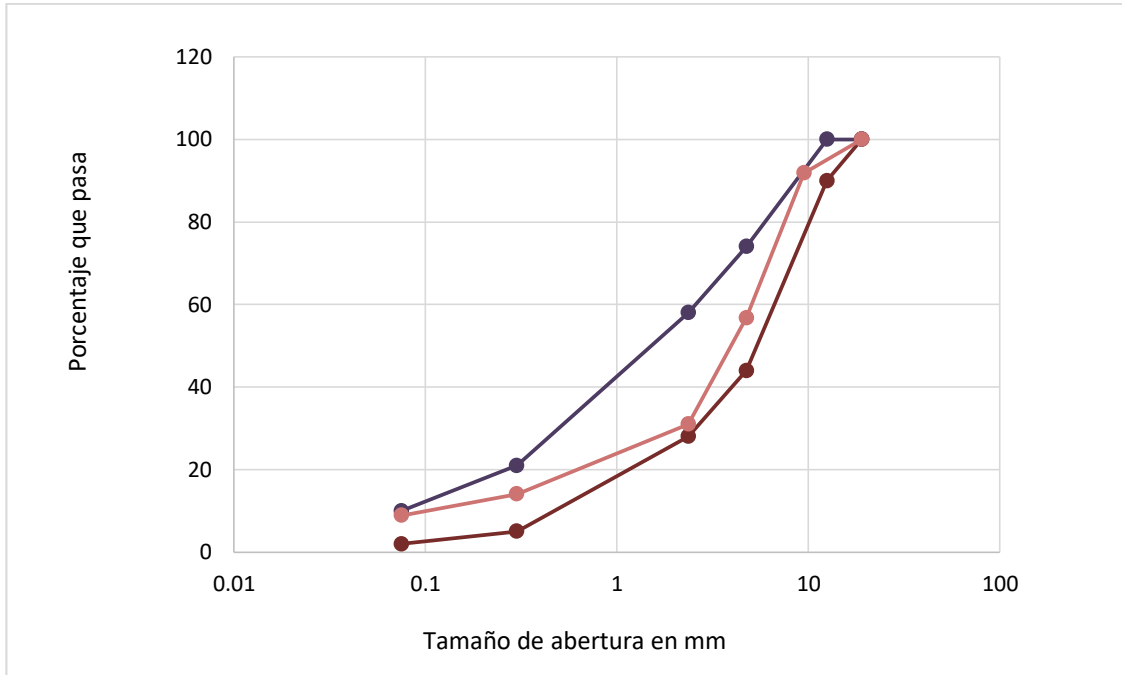
Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Requisitos de graduación para el polvo mineral.* Tabla 401-02.

Tabla XIV. **Granulometría Marshall**

<b>Tamaño del tamiz</b>	<b>Abertura estándar</b>	<b>Gráfica máximo</b>	<b>Gráfica mínimo</b>	<b>Porcentaje que pasa</b>
<b>1"</b>	<b>25</b>	% que pasa	% que pasa	
<b>3/4"</b>	<b>19</b>	100	100	100
<b>3/8"</b>	<b>9,5</b>	100	90	91,860
<b>#4</b>	<b>4,75</b>	74	44	56,767
<b>#8</b>	<b>2,36</b>	58	28	31,012
<b>#50</b>	<b>0,3</b>	21	5	14,080
<b>#200</b>	<b>0,075</b>	10	2	8,917

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica granulométrica para diseño Marshall**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2. **Bitumen**

El bitumen consiste en una sustancia color negro, viscoso y pegajoso, la cual varía respecto a su consistencia, ya que puede ser semisólida o sólida a temperaturas normales. Este material, al momento de calentarse a 125 °C, se ablanda y se vuelve líquido, y esto permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente. Es excelente para unir el agregado en el pavimento de mezcla en caliente. Existen diferentes cementos asfálticos de acuerdo a su viscosidad dinámica a 60 °C. Se constituyen en dos fases no miscibles en donde la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeñas partículas de bitumen.

Las emulsiones de bitumen pueden ser de falla rápida, las cuales se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, o de falla media, que se emplean regularmente para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta o para trabajos como bacheos; también están las de rompimiento lento, las cuales se utilizan en carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas, así como para impregnación. A menudo se utilizan para impregnación de sub-bases y bases hidráulicas.

Tabla XV. **Clasificación de bitumen según su viscosidad a 60 °C  
(Clasificación basada en bitumen original)**

Ensayo	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
<b>Viscosidad, 135 C, Cs-mínimo</b>	125	175	250	300	350	400
<b>Penetración, 25 C, 100 g., 5 segundos-mínimo</b>	220	140	80	60	50	40
<b>Punto inflamador Cleveland, ° C (F)-mínimo</b>	163	177	219	232	232	232
<b>Solubilidad en tricloroetileno, por ciento-mínimo</b>	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
<b>Viscosidad, 60 C, poises</b>	250+/- 50	500+/- 100	1000+/- 200	2000+/- 400	3000+/- 600	4000+/- 800

Fuente: Requisitos para bitumen graduado por viscosidad. AASHTO M 226.



#### 4.5. Preparación de probetas

- Se preparan las probetas con diferentes contenidos de bitumen con incrementos de 0,5 % en peso entre cada probeta, con el fin de poder graficar los resultados con un valor óptimo definido por medio de puntos. Se deben preparar tres probetas como mínimo por cada contenido de bitumen.
- Se necesita aproximadamente 1200 g de agregados, cada diseño necesita por lo menos 18 probetas.
- La preparación de agregado separa por tamizado los tamaños deseados.
- Se debe obtener una temperatura en la que se pueda alcanzar una viscosidad de 170 +/- 20 *centistokes*.
- En taras, se procede a mezclar los materiales. Los agregados tienen que estar a una temperatura de 28 °C con las proporciones de agregados requeridas. Se mezclan junto con el asfalto hasta obtener una mezcla homogénea.
- Para la compactación de probetas, la mezcla, el molde y el collar se calientan en el horno a una temperatura entre 93,3 °C y 148,9 °C, se coloca la mezcla recién preparada en el molde y se golpea verticalmente 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en su centro, se retira el collar y se coloca en el pedestal de compactación. Se coloca otro papel filtro y se aplican 75 golpes de ambos lados de la muestra con el martillo de compactación a una altura de 18".
- Después de la compactación se dejan enfriar las muestras, para poder extraerlas de los moldes, luego se identificará cada una de ellas y se medirá su espesor y se deberá colocar en una superficie plana y se dejará en reposo por 24 horas.

#### 4.6. Resultados de datos obtenidos de ensayos de laboratorio según Norma ASTM D 1559

##### 4.6.1. Análisis de bitumen

Se utilizó bitumen AC-20 para los ensayos realizados en la mezcla a realizarse, con porcentajes de rangos de 0,5% respecto al peso de la mezcla.

Tabla XVI. Ficha técnica bitumen AC-20

Ensayo	Medida
Viscosidad cinemática a 135 °C, Cs-mínimo	300 <i>Centistokes</i> (cSt)
Viscosidad absoluta a 60 °C poises	800 Pa. S máximo
Solubilidad en tricloroetileno, %	99,0 % mínimo
Penetración a 25 °C, 100 g., 5 segundo-mínimo	60 mínimo
Punto de inflamación Cleveland, °C (F)- mínimo	232 mínimo

Fuente: Emulsin. Ficha técnica.

#### 4.6.1.1. **Peso específico del agregado Norma ASTM C-127 y C-128**

Se realizó el peso específico del agregado fino según la norma establecida:

$$P_{esp} = \frac{P_s}{P_{mw} + P_s - P_{smw}}$$

Donde:

- $P_{esp}$  = peso específico
- $P_s$  = peso neto seco agregado
- $P_{mw}$  = peso de matraz + agua
- $P_{smw}$  = peso del matraz + agua + agregado

Peso específico del agregado grueso:

$$P_e = \frac{(Peso\ probeta\ con\ material - peso\ probeta)}{(peso\ probeta\ con\ material) + (peso\ probeta\ con\ H_2O - peso\ probeta\ material\ y\ H_2O)}$$

Tabla XVII. **Datos de agregados**

No.	<b>Agregado fino</b>	
01	Peso específico	2,66
	<b>Agregado grueso</b>	
02	Peso específico	2,70

Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.1.1.1. Densidad volumétrica ASTM D 1188

La Norma ASTM D 1188 (*Standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using coated samples*, es decir *Método estándar de ensayo para la densidad específica bruta de mezclas bituminosas compactadas utilizando muestras revestidas*), menciona que la gravedad específica se determina después de haber realizado las probetas y haberlas compactado a la temperatura de 140 °C. Se deben pesar y se deben tomar los diámetros y su altura.

Se debe esperar a que las probetas se enfríen a la temperatura del ambiente, por 24 horas. Se debe anotar la masa seca, masa seca saturada y masa sumergida en el agua, estos datos serán necesarios para calcular la gravedad específica:

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

- Donde:
- Gmb = densidad específica bruta de probetas
- A = masa seca del espécimen
- B = masa seca saturada del espécimen
- C = masa del espécimen sumergido

Tabla XVIII. **Datos obtenidos para densidad especifica bruta sin cenizas volantes**

<b>Contenido 4 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1215,550	1239,650	1206,730
<b>Pss (g)</b>	1235,250	1269,650	1233,440
<b>Psss (g)</b>	710,350	730,780	710,180
<b>Contenido 4,5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1242,470	1225,160	1227,270
<b>Pss (g)</b>	1263,40	1246,110	1247,940
<b>Psss (g)</b>	727,450	720,330	722,60
<b>Contenido 5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 197,260	1 242,390	1 236,160
<b>Pss (g)</b>	1 210,930	1 260,760	1 250,450
<b>Psss (g)</b>	698,970	726,260	724,750
<b>Contenido 5,5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 232,600	1 242,010	1 190,490
<b>Pss (g)</b>	1 241,500	1 252,300	1 200,750
<b>Psss (g)</b>	719,380	727,930	692,460
<b>Contenido 6 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 257,170	1 257,860	1 253,210
<b>Pss (g)</b>	1 259,100	1 260,300	1 252,710
<b>Psss (g)</b>	730,400	732,140	721,720

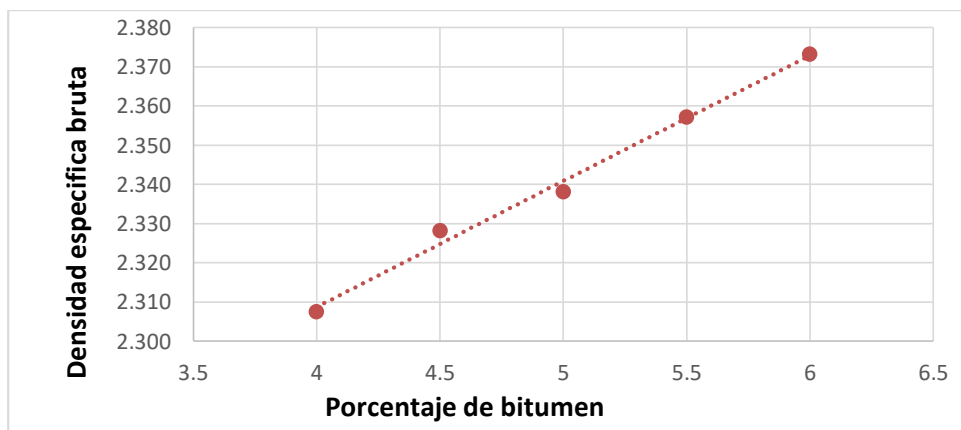
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Densidad específica bruta sin cenizas volantes**

<b>Contenido 4 % de bitumen</b>				<b>Promedio</b>
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,316	2,300	2,306	2,307
<b>Contenido 4,5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Gmb	2,318	2,330	2,336	2,328
<b>Contenido 5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Gmb	2,339	2,324	2,351	2,338
<b>Contenido 5,5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Gmb	2,361	2,369	2,342	2,357
<b>Contenido 6 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Gmb	2,378	2,382	2,360	2,373

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Densidad específica bruta vs porcentaje de bitumen sin cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Datos obtenidos para densidad específica bruta con cenizas volantes**

<b>Contenido 4,5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps(g)</b>	1 295,510	1 276,660	1 279,210
<b>Pss (g)</b>	1 321,670	1 292,400	1 299,960
<b>Psss (g)</b>	762,140	754,090	752,810
<b>Contenido 5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 289,950	1 287,200	1 284,850
<b>Pss (g)</b>	1 300,890	1 300,170	1 295,610
<b>Psss (g)</b>	753,840	759,050	757,640
<b>Contenido 5,5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 287,490	1 290,970	1 2297,960
<b>Pss (g)</b>	1 299,570	1 301,190	1 302,340
<b>Psss (g)</b>	759,140	752,090	764,120
<b>Contenido 6 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 292,560	1 293,760	1 288,800
<b>Pss (g)</b>	1 297,410	1 286,260	1 290,150
<b>Psss (g)</b>	768,630	775,150	753,250
<b>Contenido 6,5 % de bitumen</b>			
<b>No.</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
<b>Ps (g)</b>	1 313,560	1 309,280	1 304,090
<b>Pss (g)</b>	1 315,360	1 310,410	1 306,010
<b>Psss (g)</b>	783,690	790,740	774,460

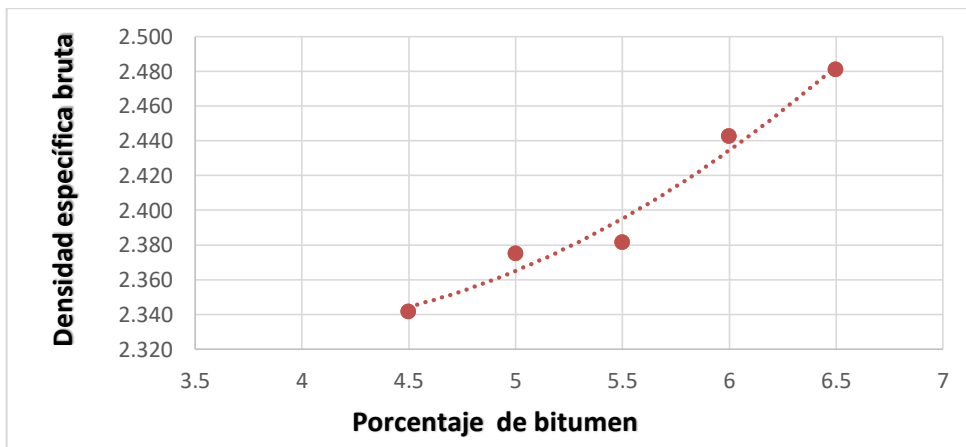
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Densidad específica bruta con cenizas volantes**

<b>Contenido 4,5 % de bitumen</b>				<b>Promedio</b>
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,315	2,372	2,338	2,342
<b>Contenido 5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,358	2,379	2,388	2,375
<b>Contenido 5,5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,382	2,351	2,412	2,382
<b>Contenido 6 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,444	2,483	2,400	2,443
<b>Contenido 6,5 % de bitumen</b>				
<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Gmb	2,471	2,519	2,453	2,481

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica de densidad específica bruta vs porcentaje de bitumen con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.



#### **4.6.1.2. Densidad teórica máxima ASTM D 2041 y AASHTO T 209**

La Norma ASTM D 2041 (*Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*, es decir *Método de ensayo estándar de densidad teórica máxima de mezclas de pavimentación bituminosas*) específica que para realizar el ensayo se debe tomar una probeta ya ensayada en el aparato Marshall, y se debe pesar una cantidad de 1 000 kg de mezcla suelta a temperatura ambiente. Para la realización de este ensayo se necesita el siguiente equipo:

- Picnómetro de vacíos
- Balanza
- Bomba de vacíos
- Manómetro de presión residual
- Válvula de aire

Cuando la muestra se encuentra a temperatura ambiente se procede a desintegrar y se separa con las manos. Estas partículas no deben ser mayores de 6 mm, se debe colocar la muestra en el picnómetro, este se debe pesar con la muestra y sin la muestra y anotar los datos; se debe agregar agua a temperatura ambiente, que cubra la mezcla por completo, el espejo de agua debe estar a una pulgada por encima de la mezcla. Se debe colocar el picnómetro con la muestra y agua en el dispositivo de agitación mecánica, se asegura y se activa la bomba de vacíos, se pone en marcha la agitación, debe estar a una presión de vacío con la ayuda de la válvula de aire y se debe obtener entre 25 a 30 psi.

La presión de vacío se debe alcanzar en 1 minuto y, ya alcanzada, se continúa con la agitación por 15 minutos. Luego de terminados los 15 minutos se libera gradualmente la presión de vacío con la ayuda de la válvula de aire. Al final se debe pesar el picnómetro junto con la mezcla más el agua y se deberá calcular la gravedad específica teórica máxima:

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E}$$

- Donde:
- Gmm = gravedad específica teórica máxima
- A = masa de la muestra seca (g)
- D = masa del picnómetro lleno de agua (g)
- E = masa del picnómetro con la muestra y agua

Tabla XXII. **Datos obtenidos para densidad teórica máxima sin cenizas volantes**

Descripción	Contenido de bitumen				
	4%	4,5%	5%	5,5 %	6%
<b>Tara más material (g)</b>	1488,200	1495,900	1438,850	1479,800	1509,100
<b>Tara (g)</b>	251,500	250,400	252,100	252,100	254,400
<b>Masa seca del espécimen (g)</b>	1236,700	1245,500	1218,200	1227,700	1254,700
<b>Masa picnómetro con agua (g)</b>	7380,000	7380,900	7377,100	7382,200	7378,900
<b>Picnómetro con agua y muestra (g)</b>	8147,100	8140,200	8117,500	8120,000	8123,000

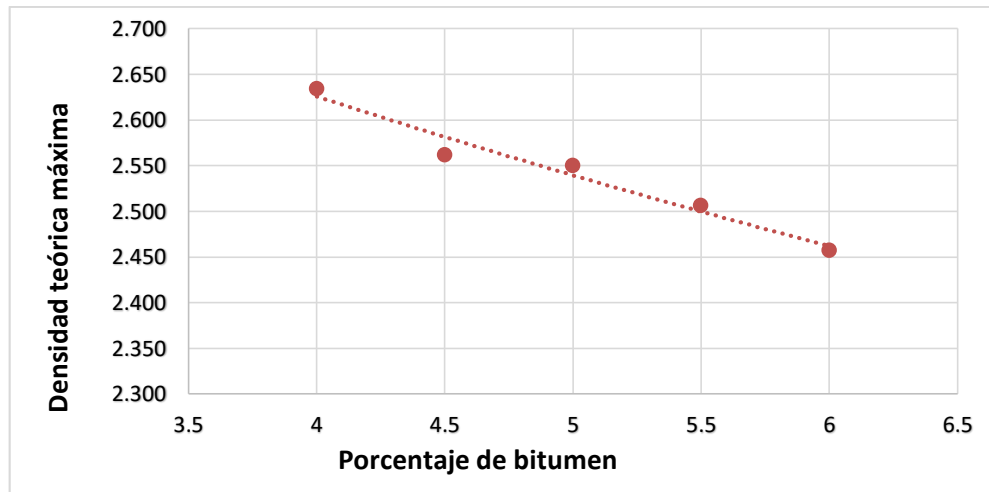
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Densidad teórica máxima sin cenizas volantes**

Descripción	Contenido de bitumen				
	4,5 %	5%	5,5 %	6%	6,5 %
Gmm	2,634	2,562	2,550	2,506	2,457

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Densidad teórica máxima sin cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos obtenidos para densidad teórica máxima con cenizas volantes**

Descripción	Contenido de bitumen				
	4%	4,5%	5%	5,5 %	6%
Tara más material (g)	1488,200	1495,900	1438,850	1479,800	1509,100
Tara (g)	251,500	250,400	252,100	252,100	254,400
Masa seca del espécimen (g)	1236,700	1245,500	1218,200	1227,700	1254,700
Masa picnómetro con agua (g)	7380,000	7380,900	7377,100	7382,200	7378,900
Picnómetro con agua y muestra (g)	8147,100	8140,200	8117,500	8120,000	8123,000

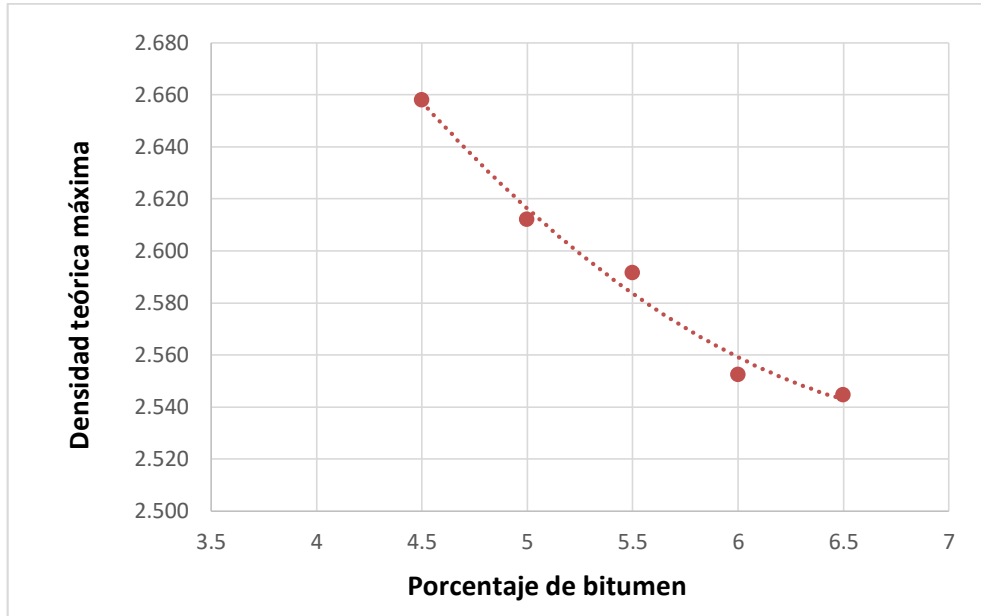
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Densidad teórica máxima con cenizas volantes**

Descripción	Contenido de bitumen				
	4,5 %	5%	5,5 %	6%	6,5 %
Gmm	2,634	2,562	2,550	2,506	2,457

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de porcentaje de cemento bitumen vs densidad teórica máxima**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.2. Ensayos de estabilidad y fluencia ASTM D 1559

La Norma ASTM D 1559 (*Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*, es decir, Método de ensayo para la resistencia del flujo de plástico de mezclas bituminosas utilizando un aparato Marshall) consiste en medir la resistencia a la deformación de la mezcla. El ensayo de fluencia mide esta deformación, bajo una carga aplicada a la probeta. Para ello las probetas se sumergen en agua durante 35 minutos a una temperatura de 60 °C (140 °F), ya que representa la temperatura más alta que el pavimento puede soportar.

La probeta se extrae del recipiente con agua, se seca y se coloca inmediatamente en el aparato Marshall, este tiene un dispositivo que aplicará una carga sobre la probeta y que contiene medidores de carga y deformación (fluencia). La carga del ensayo se aplica a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla es la carga máxima que la probeta puede resistir.

#### 4.6.2.1. Valor de la estabilidad Marshall

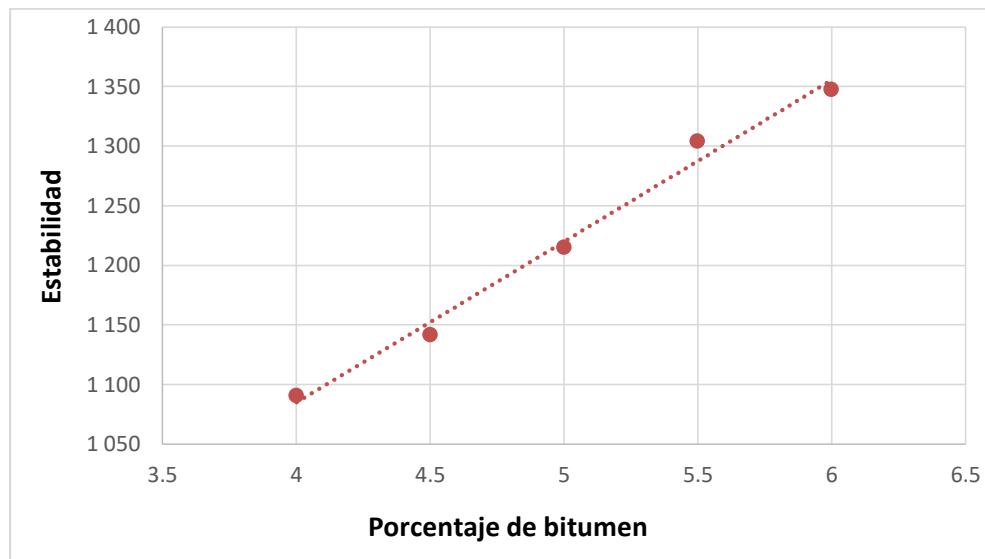
La estabilidad Marshall es el valor de la carga bajo la cual una probeta falla, al momento de ensayarlo los cabezales superiores e inferior del aparato Marshall se acercan y la carga y la lectura aumentan. El ensayo se detiene en el momento que se obtiene la carga máxima.

Tabla XXVI. Datos de estabilidad sin cenizas volantes

Porcentaje de bitumen	Probeta 1 (Lb)	Probeta 2 (Lb)	Probeta 3 (Lb)	Estabilidad corregida (Lb)
4,00	938,79	1 031,13	1 300,05	1 090,929
4,50	1 000,35	816,48	1 607,04	1 141,870
5,00	825,06	1 381,16	1 437,92	1 215,034
5,50	1 201,42	1 527,36	1 185,08	1 304,279
6,00	1 314,94	1 478,34	1 250,44	1 347,884

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs estabilidad sin cenizas volantes**



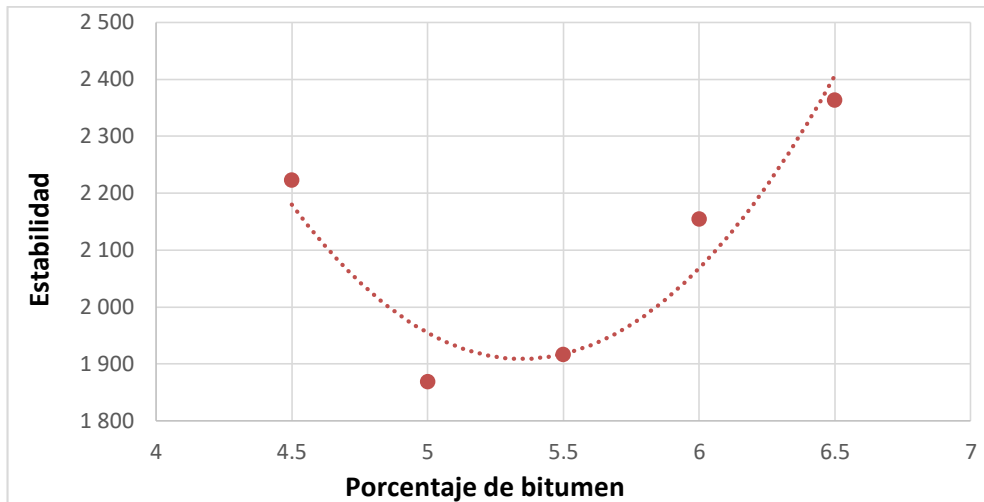
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Datos de estabilidad con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Probeta 1 (Lb)	Probeta 2 (Lb)	Probeta 3 (Lb)	Estabilidad corregida (Lb)
4,50	1 828,36	3 010	1 828,36	2 222,748
5,00	1 658,07	1 780	2 180,50	1 869,000
5,50	1 664,30	1 674,09	2 411,9	1 916,859
6,00	2 185,50	2 660,73	1 627,50	2 155,084
6,50	2 208,00	2 502,72	2 384,64	2 363,472

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs estabilidad con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia

#### 4.6.2.2. Valor de fluencia de Marshall

La fluencia es el valor de la deformación de la probeta, la cual está indicada por la reducción respecto al diámetro vertical de la probeta y se mide en centésimas de pulgada. Las mezclas que poseen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento, y las que cuentan con valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y suelen tener la tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

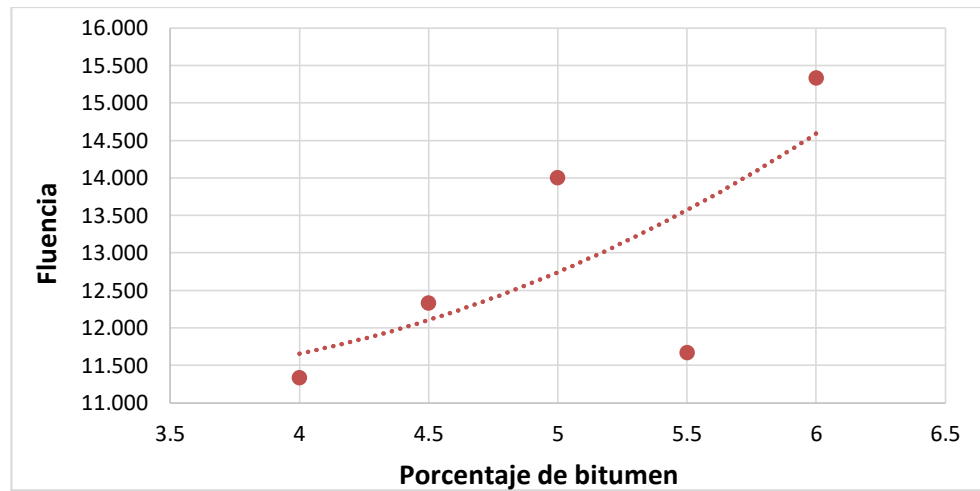


Tabla XXVIII. **Datos de fluencia sin cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Probeta 1 (0,01 plg.)	Probeta 2 (0,01 plg.)	Probeta 3 (0,01 plg.)	Promedio fluencia (0,01 plg.)
4,00	10	11	13	11,333
4,50	13	12	12	12,333
5,00	15	12	15	14,000
5,50	12	11	12	11,667
6,00	16	14	16	15,333

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Porcentaje de bitumen vs fluencia sin cenizas volantes**



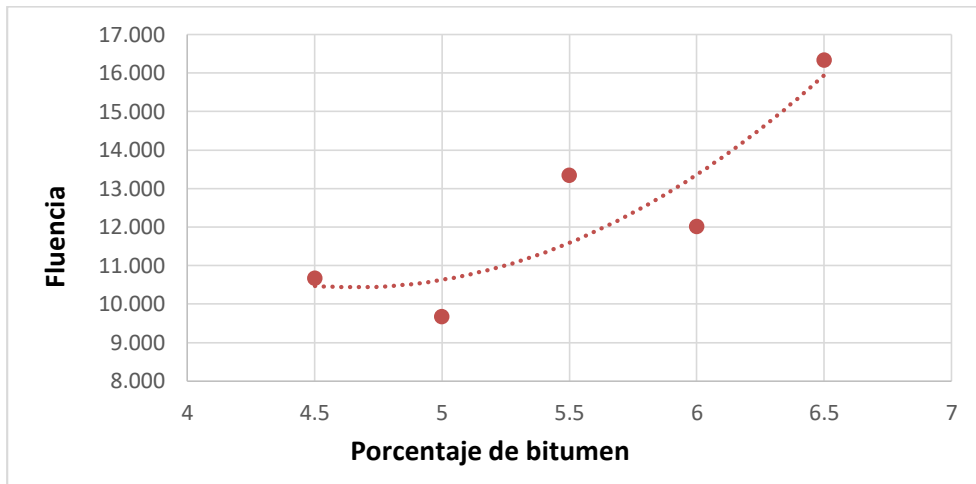
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Datos de fluencia con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Probeta 1 (0,01 plg.)	Probeta 2 (0,01 plg.)	Probeta 3 (0,01 plg.)	Promedio fluencia (0,01 plg.)
4,50	12	10	10	10,667
5,00	08	10	11	09,667
5,50	12	14	14	13,333
6,00	15	11	10	12,000
6,50	15	17	17	16,333

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica porcentaje de bitumen vs fluencia con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

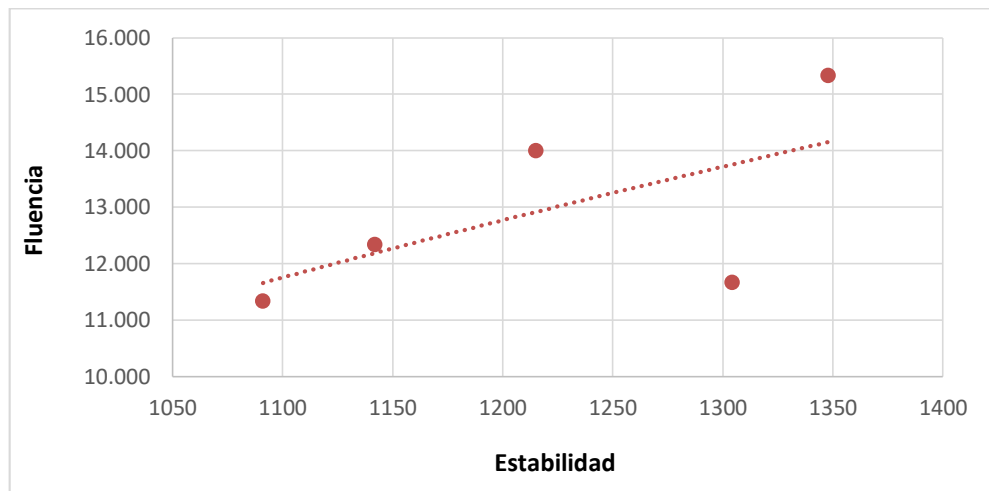
#### 4.6.2.2.1. Relación entre estabilidad y fluencia

Tabla XXX. Relación entre estabilidad vs fluencia sin cenizas volantes

Porcentaje de bitumen	Estabilidad (Lb)	Fluencia (0,01 plg.)	Relación Estabilidad vs fluencia (Lb/0,01 plg.)
4,00	1 090,930	11,333	96,259
4,50	1 141,871	12,333	92,584
5,00	1 215,034	14,000	86,788
5,50	1 304,279	11,667	111,795
6,00	1 347,885	15,333	87,906

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Estabilidad vs fluencia sin cenizas volantes



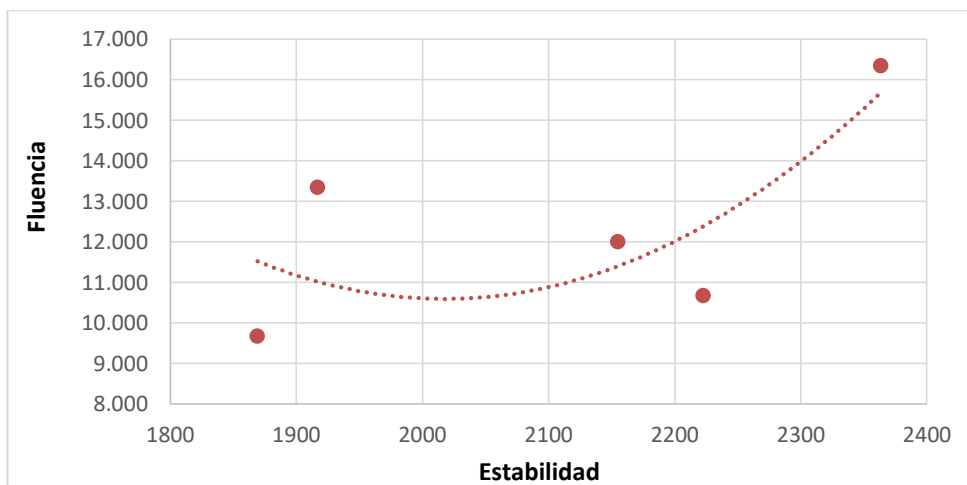
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Relación entre estabilidad vs fluencia con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Estabilidad (Lb)	Fluencia (0,01 plg.)	Relación Estabilidad vs fluencia (Lb/0,01 plg.)
4,50	2 222,748	10,667	208,383
5,00	1 869,000	09,667	193,345
5,50	1 916,859	13,333	143,764
6,00	2 155,085	12,000	179,590
6,50	2 363,472	16,333	144,702

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Estabilidad vs fluencia con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.3. Vacíos en la mezcla asfáltica. Norma ASTM D 3203 y AASHTO T 269

Los vacíos son los espacios de aire que se encuentran entre el agregado que está cubierto por el asfalto. El porcentaje de vacíos es el resultado de la gravedad específica total de la mezcla compactada y de la gravedad específica teórica de la mezcla sin vacíos:

$$Va = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \times 100$$

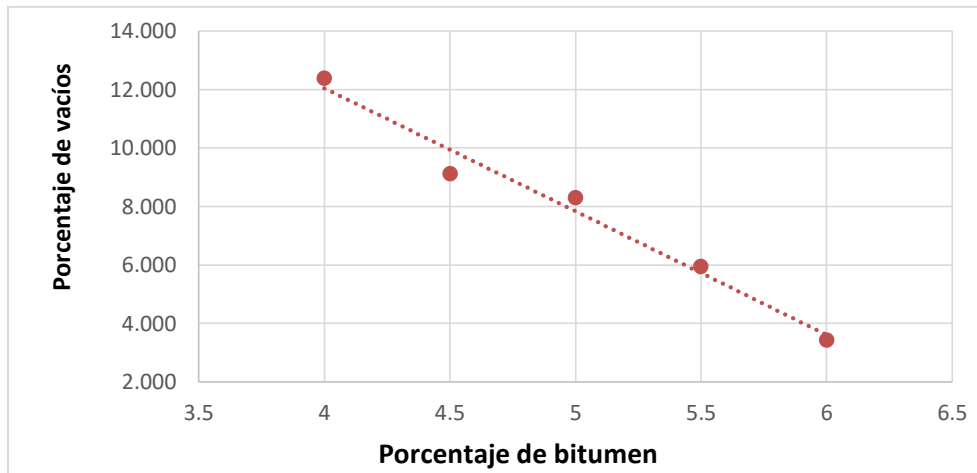
- Donde:
- Va = Porcentaje de vacíos
- Gmm = Densidad teórica máxima
- Gmb = Densidad específica bruta

Tabla XXXII. **Porcentaje de vacíos**

Porcentaje de bitumen	Gmm	Gmb	Porcentaje de vacíos
4,00	2,634	2,307	12,381
4,50	2,562	2,328	9,115
5,00	2,550	2,338	8,294
5,50	2,506	2,357	5,940
6,00	2,457	2,373	3,423

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs porcentaje de vacíos en la mezcla patrón**



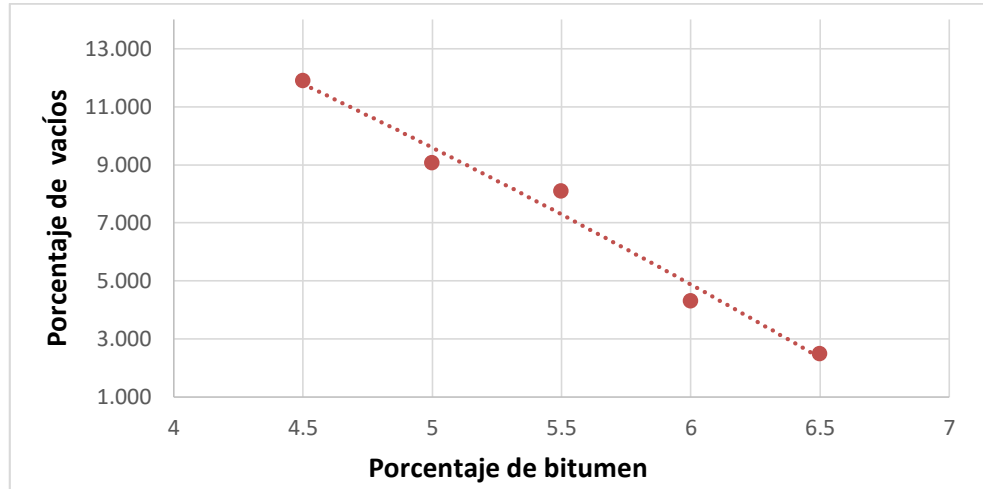
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de vacíos con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Gmm	Gmb	Porcentaje de vacíos
4,50	2,658	2,342	11,905
5,00	2,612	2,375	9,078
5,50	2,592	2,382	8,102
6,00	2,553	2,443	4,310
6,50	2,545	2,481	2,501

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs porcentaje de vacíos con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.4. Vacíos en el agregado mineral

Son los espacios de aire que se encuentran en las partículas de agregado de la mezcla de asfalto compactada, incluyendo los vacíos de aire y el cemento asfáltico efectivo. Se presentan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. Se calculan respecto a la gravedad específica y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

- Donde:
- VAM = porcentaje de vacíos de agregado mineral
- Gmb = Densidad específica bruta
- Ps = porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla

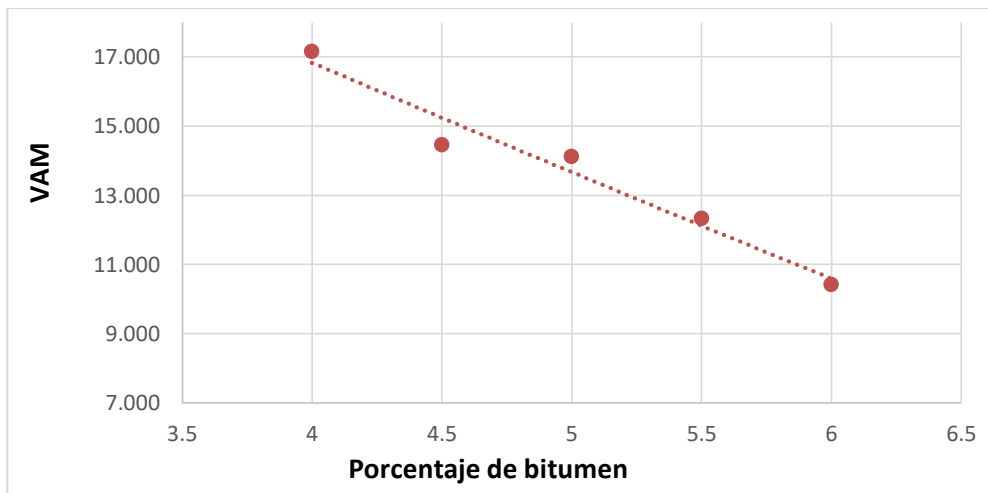
- $G_{sb}$  = Gravedad específica del agregado

Tabla XXXIV. **Datos de vacíos de agregado mineral**

Porcentaje de bitumen	Gmm	Porcentaje del agregado	Porcentaje de vacíos agregado mineral
4,00	2,634	96,000	17,155
4,50	2,562	95,500	14,450
5,00	2,550	95,000	14,112
5,50	2,506	94,500	12,329
6,00	2,457	94,000	10,411

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs VAM de mezcla patrón**



Fuente: elaboración propia.

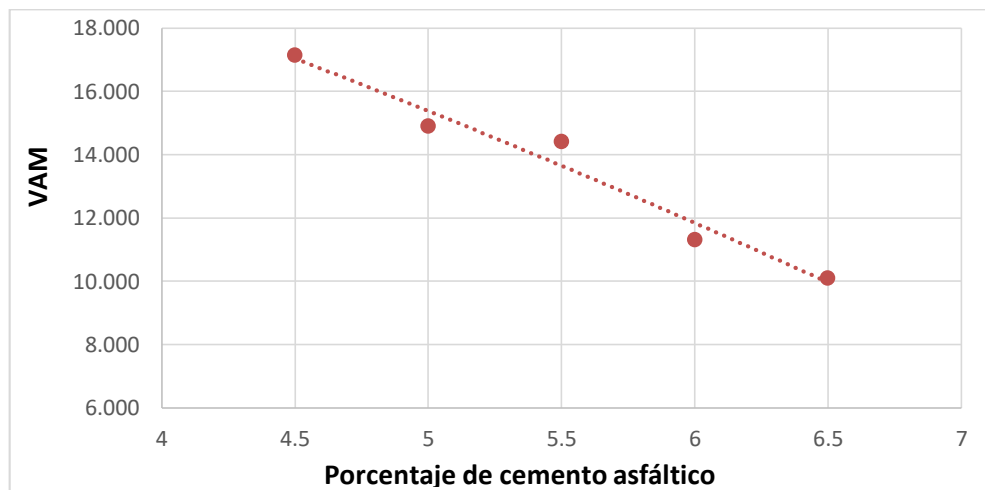


Tabla XXXV. **Datos de vacíos de agregado mineral con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Gmm	Porcentaje del agregado	Porcentaje de vacíos agregado mineral
4,50	2,658	95,500	17,151
5,00	2,612	95,000	14,897
5,50	2,592	94,500	14,413
6,00	2,553	94,000	11,313
6,50	2,545	93,500	10,104

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica de porcentaje de bitumen vs VAM con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.5. Vacíos rellenos de asfalto

Los vacíos llenos de asfalto son el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado que se encuentran llenas de asfalto.

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100$$

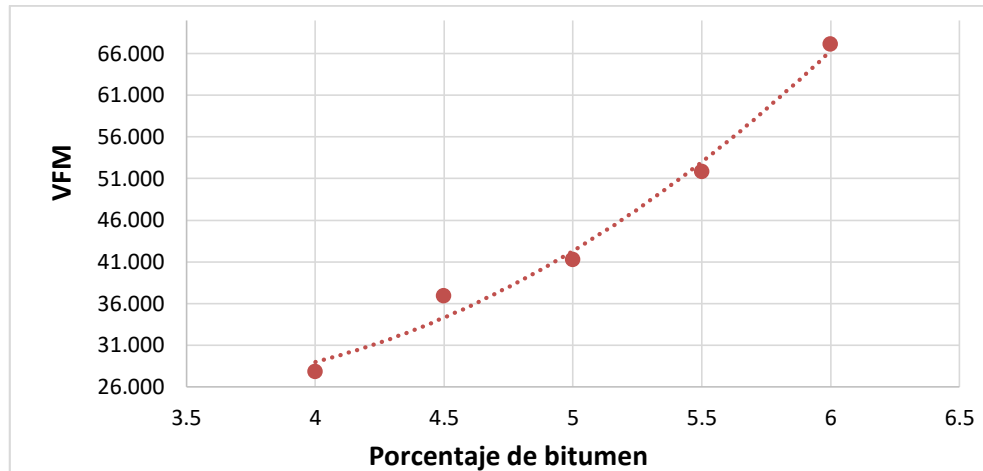
- Donde:
- VAM = porcentaje de vacíos llenos de bitumen
- Va = porcentaje de vacíos

Tabla XXXVI. **Datos de vacíos rellenos de asfalto en la mezcla patrón**

Porcentaje de bitumen	Porcentaje de vacíos	Porcentaje de vacíos agregado mineral	Porcentaje de vacíos rellenos de mineral
4,00	12,381	17,155	27,830
4,50	9,115	14,450	36,916
5,00	8,294	14,112	41,228
5,50	5,940	12,329	51,818
6,00	3,423	10,411	67,123

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Porcentaje de bitumen vs vacíos de relleno mineral**



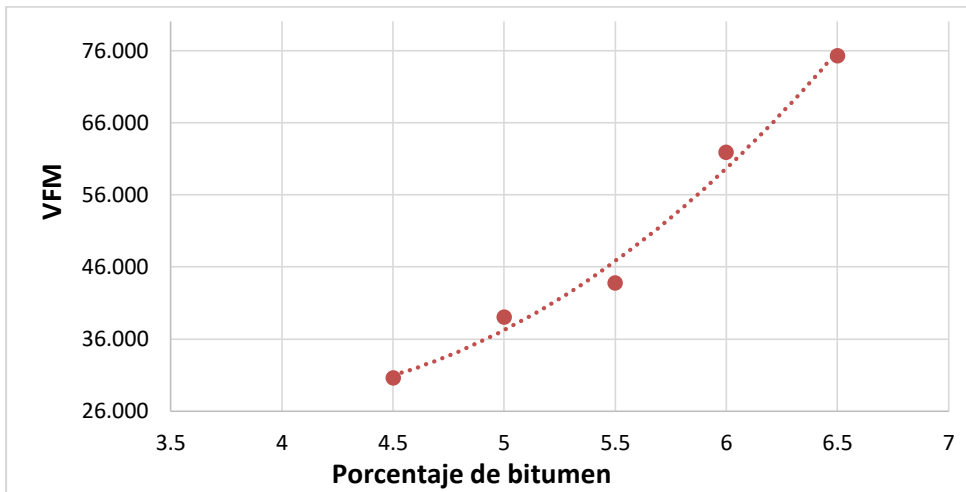
Fuente elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Datos de vacíos rellenos de asfalto con cenizas volantes**

Porcentaje de bitumen	Porcentaje de vacíos	Porcentaje de vacíos agregado mineral	Porcentaje de vacíos rellenos de mineral
4,50	11,905	17,151	30,589
5,00	9,078	14,897	39,059
5,50	8,102	14,413	43,784
6,00	4,310	11,313	61,902
6,50	2,501	10,104	75,244

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Porcentaje de bitumen vs vacíos rellenos de mineral con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

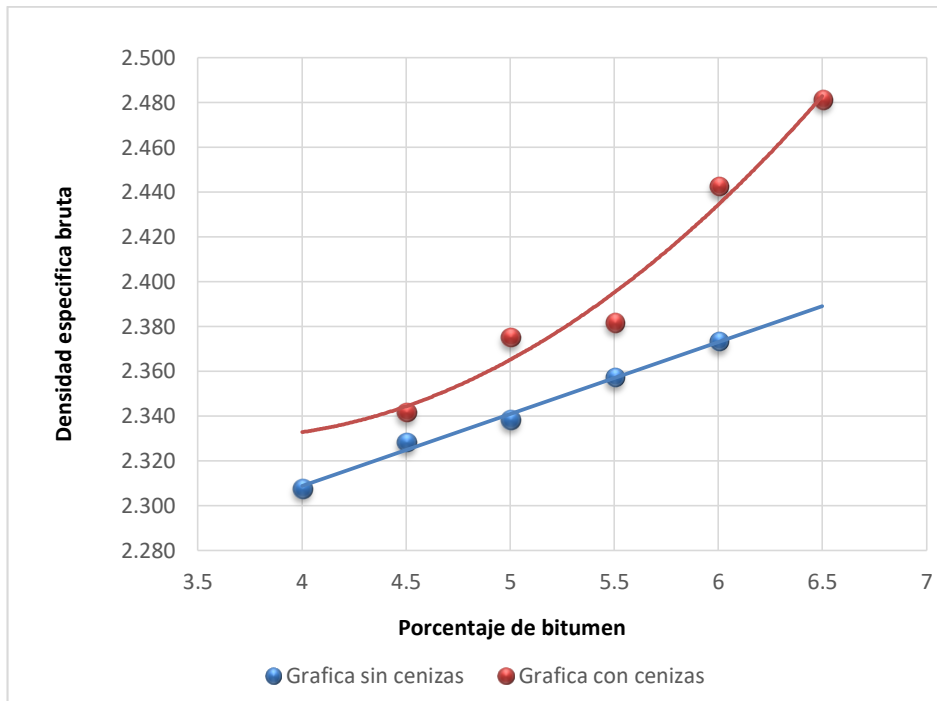
## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. Análisis densidad específica bruta**

La gráfica siguiente muestra que cuando aumentó el valor de porcentaje de bitumen en intervalos de 0,5 %, incrementó el valor de la densidad específica bruta, el cual fue de 2 350 kg/cm<sup>3</sup>, también muestra que, con menor cantidad de bitumen, el peso seco saturado aumentó y tuvo intervalos prolongados entre los diferentes especímenes, pero cuando tuvo mayor contenido de bitumen los intervalos de peso disminuyeron.

Se puede observar que en la mezcla que contiene cenizas volantes la densidad específica bruta aumentó a un valor de 2 380 kg/m<sup>3</sup>, debido a que contenía 0,5 % mayor que la mezcla patrón, por ende, incrementó el peso neto seco, por lo tanto, en comparación con la mezcla patrón, aumentó la densidad específica bruta cuando se adicionaron cenizas volantes al 3 % en la mezcla.

Figura 36. **Densidad específica bruta sin cenizas volantes vs densidad específica bruta con cenizas volantes**

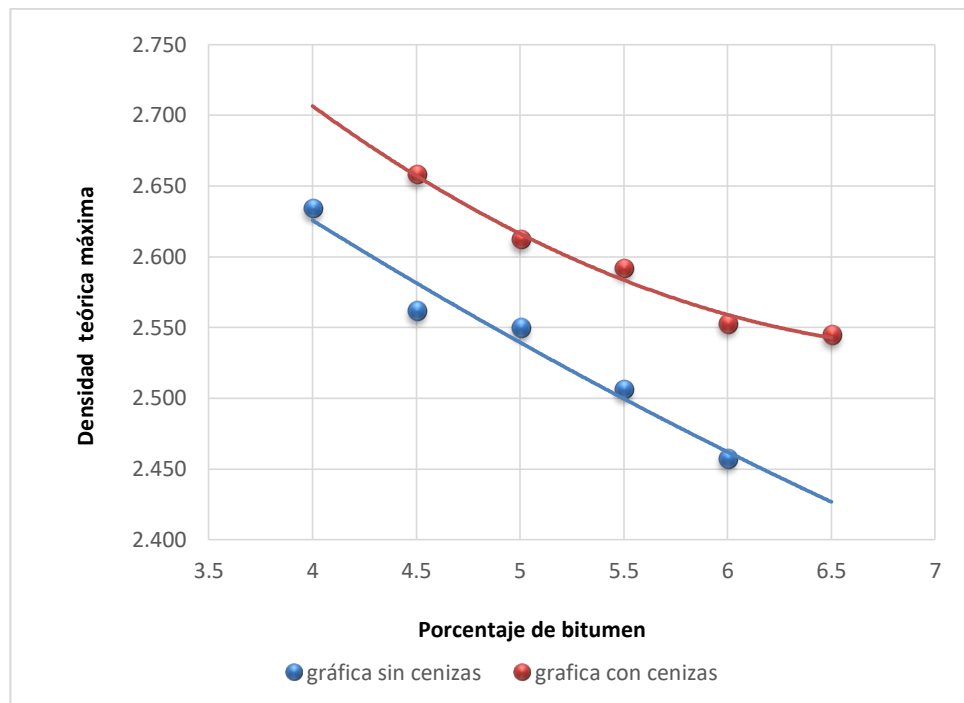


Fuente: elaboración propia.

## 5.2. **Análisis de densidad teórica máxima sin cenizas volantes vs densidad teórica máxima con cenizas volantes**

En cuanto a valores de densidad teórica máxima, los valores son altos en comparación con la densidad específica bruta. Hubo un decrecimiento cuando aumentó el porcentaje de bitumen, como se puede observar en la siguiente gráfica. En comparación con ambas gráficas el valor de la densidad teórica máxima aumentó con la adición de cenizas volantes respecto a la mezcla patrón. Fue una diferencia muy mínima y se puede observar en la gráfica, con intervalos cortos.

Figura 37. **Densidad teórica máxima sin cenizas volantes vs densidad teórica máxima con cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3. **Análisis de estabilidad de la mezcla patrón vs mezcla con cenizas volantes**

La gráfica de color azul muestra el comportamiento que tuvo la mezcla patrón, en el cual la estabilidad con el contenido óptimo de bitumen mostró como resultado un valor de 1 252 lbf. Se puede observar que el comportamiento es lineal con intervalos cortos de estabilidad, sin embargo, al adicionarle el porcentaje de cenizas volantes a dicha mezcla, el comportamiento cambió y mostró estabilidades superiores con valores altos. Con el contenido óptimo de bitumen mostró una estabilidad de 2 380 lbf., superando la mezcla patrón.

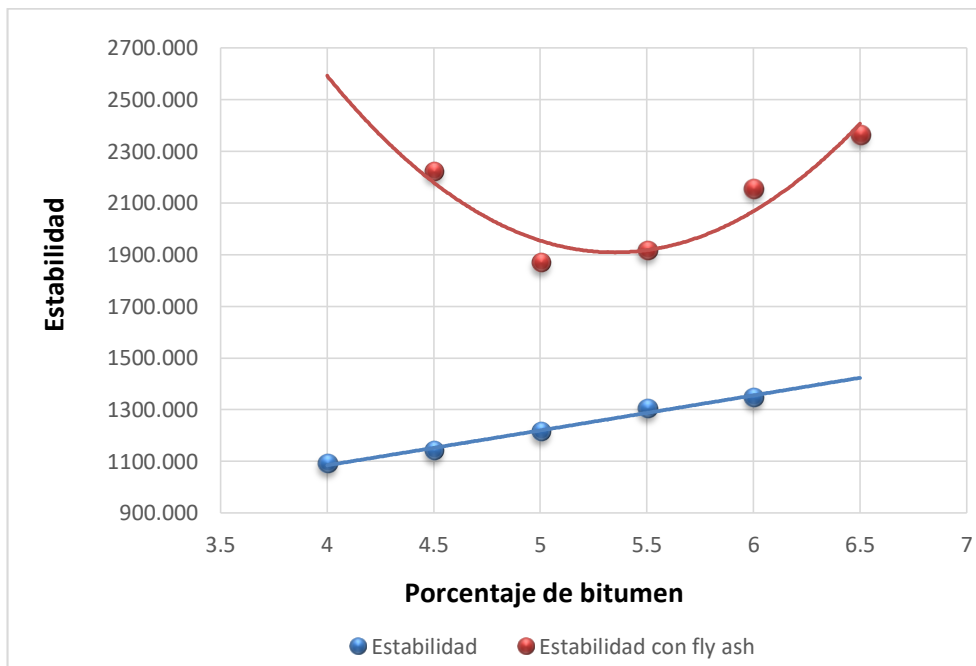
Por lo cual se observa que supera el valor que está establecido por el libro de *Especificaciones generales* de la Dirección General de Puentes y Carreteras de Guatemala.

Tabla XXXVIII. **Estabilidad**

Descripción	Valor
Estabilidad	5 338 N ( 1200 libras)

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Porcentaje de bitumen vs estabilidad**



Fuente: elaboración propia.



#### 5.4. Análisis de fluencia de la mezcla patrón vs mezcla con cenizas volantes

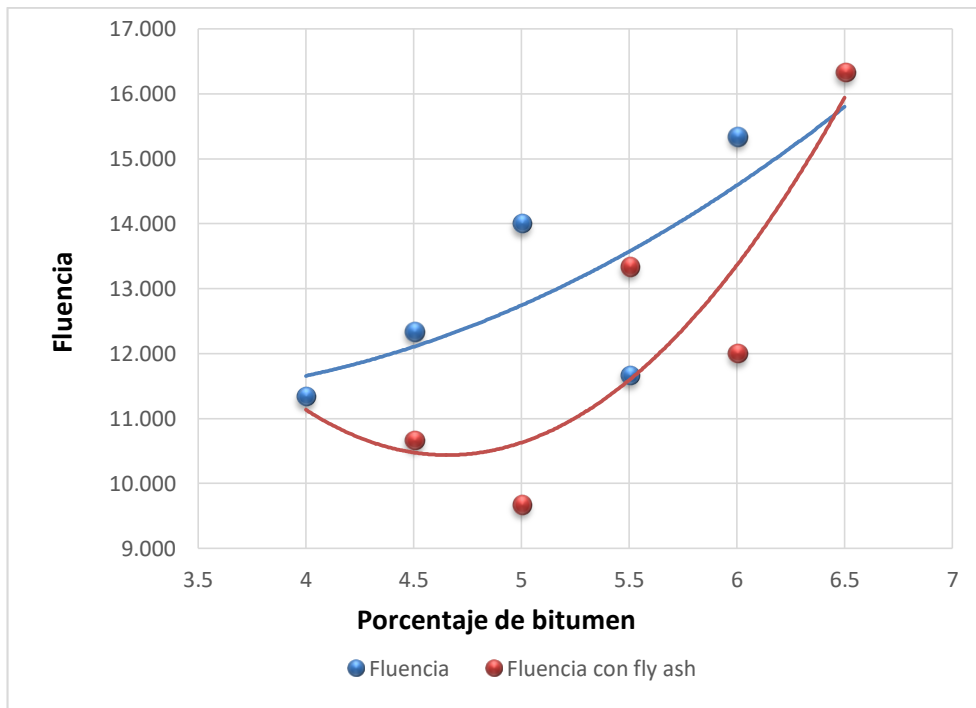
El valor de la fluencia sigue una tendencia que no es muy variable. Con el contenido óptimo de asfalto muestra un valor de 13,20 (0,01 plg.), se puede observar en el comportamiento que los intervalos aumentan cuando se agrega más porcentaje de asfalto a la mezcla. Los valores de los intervalos no variaron mucho en cuanto a la mezcla patrón, sin embargo, sí están dispersos respecto a su trayectoria. En la mezcla a la cual se adicionó las cenizas volantes el valor de fluencia en este punto fue de 14,80 (0,01 plg.) Por lo tanto, está dentro del rango para tránsito > 10<sup>6</sup> ESAL (8 – 14), de los límites del libro de especificaciones de la Dirección General de Caminos.

Tabla XXXIX. **Fluencia**

Fluencia en 0,25 mm (0,01 plg.)		
Tránsito < 10 <sup>6</sup> ESAL	8	16
Tránsito > 10 <sup>6</sup> ESAL	8	14

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Porcentaje de bitumen vs fluencia**



Fuente: elaboración propia.

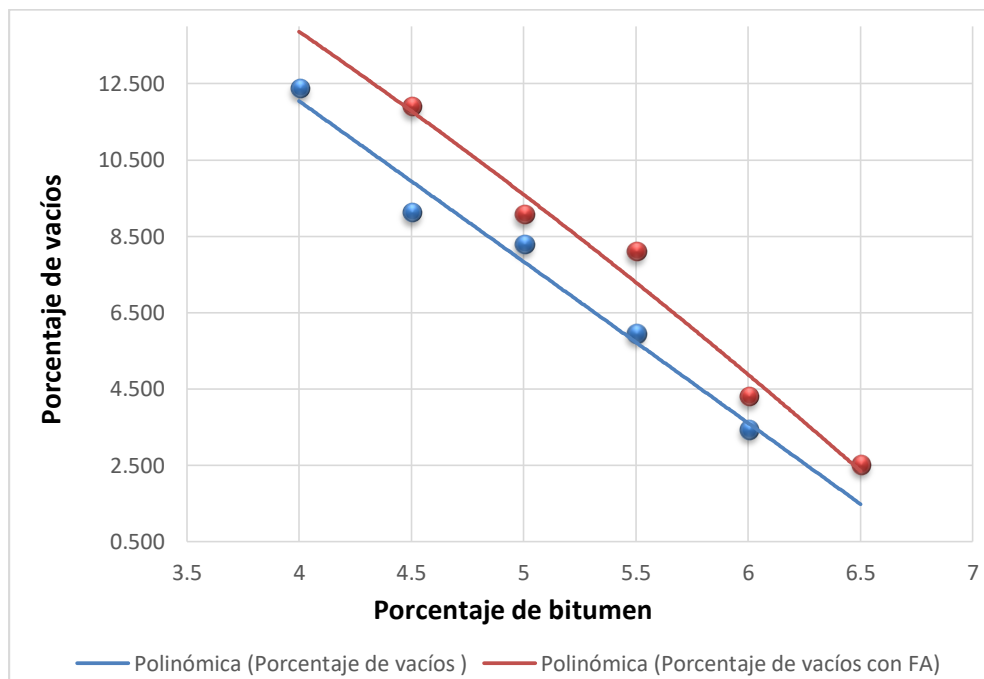
## 5.5. **Requerimientos según normas y comparación con resultados de la sección 401**

### 5.5.1. **Análisis de porcentaje de vacíos**

Al plotear el punto con un 4 % de vacíos en la gráfica del porcentaje de bitumen vs porcentaje de vacíos, se obtuvo el valor de asfalto óptimo de 5,30 % en la mezcla patrón, y en la mezcla con adición de cenizas volantes el contenido de bitumen óptimo con un 4,0 % de vacíos en la mezcla el valor que se obtuvo fue 6,25 %. El valor del porcentaje de vacíos disminuyó cuando el porcentaje de bitumen aumentó.

Se puede observar el comportamiento de los dos diseños de mezclas, la gráfica muestra que los vacíos disminuyeron al adicionar cenizas volantes.

Figura 40. **Gráfica de vacíos vs vacíos con cenizas volantes y porcentaje de vacíos con cenizas volantes**



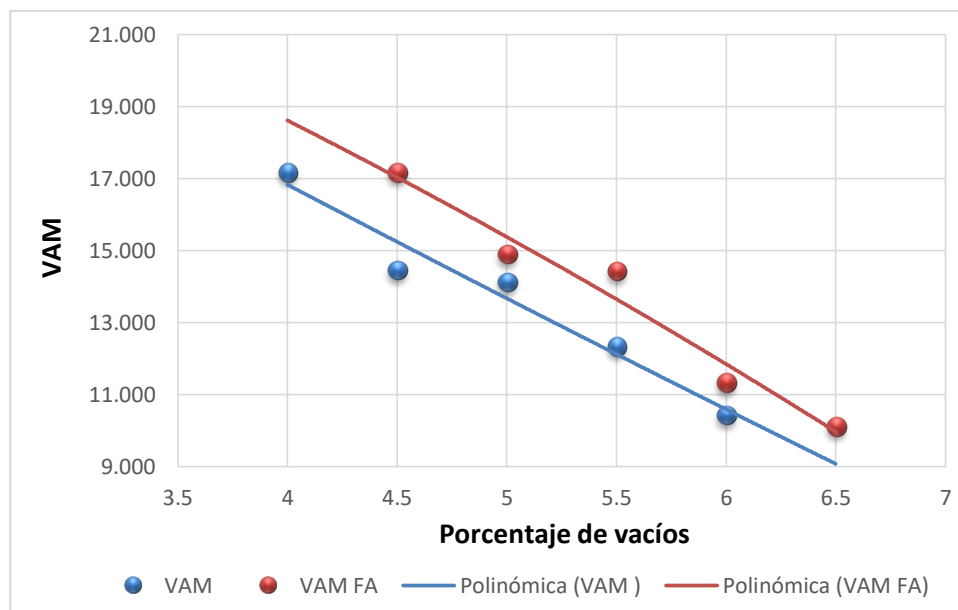
Fuente: elaboración propia.

### 5.5.2. Análisis de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

- El valor de vacíos de agregado mineral en la mezcla patrón con contenido de bitumen de 5,30 % dio como resultado un 13,0 % de vacíos, y el total de la muestra se mantuvo en el rango de 10,8 % a 17 %, el cual quedó dentro del rango según las especificaciones.

- Del valor de vacíos de agregado mineral en la mezcla con cenizas volantes se obtuvo un contenido de asfalto de 6,25 % y dio como resultado un 11,0 % de vacíos, y en el total de la muestra se mantiene en el rango de 10,0 % a 17,20 %, el cual quedó entre el rango establecido por las especificaciones.
- En la gráfica se puede observar que los valores no difieren mucho del diseño de mezcla sin cenizas volantes. Mientras aumenta el porcentaje de bitumen, los valores de agregado mineral decrecen, el rango se mantuvo entre 10,0 % y 17,0 % para ambos diseños, sin embargo, aumentó en comparación con la mezcla patrón.

Figura 41. **Gráfica de porcentaje de vacíos llenos de mineral sin cenizas volantes y porcentaje de vacío llenos de mineral con cenizas volantes**

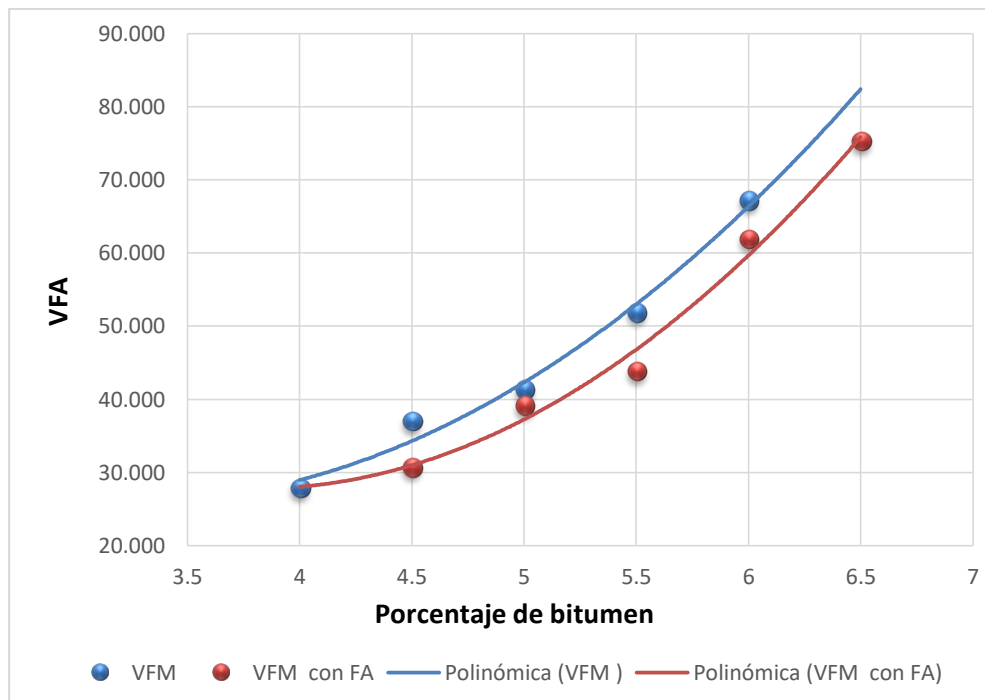


Fuente: elaboración propia.

### 5.5.3. Análisis de vacíos llenos de asfalto

- La gráfica muestra el porcentaje de vacíos llenos de asfalto con un valor de 48,0 % para la mezcla patrón, mientras que para la mezcla con cenizas volantes el valor es de un 66 %. Se puede observar que para la mezcla patrón no logró cumplirse con las especificaciones, mientras que la mezcla con cenizas volantes sí estuvo dentro del rango según la tabla XI. El rango de vacíos llenos de asfalto está entre 30,0 % hasta 80,0 % en ambas mezclas.

Figura 42. Gráfica de porcentaje de vacíos llenos de mineral y porcentaje de vacíos llenos de mineral con cenizas volantes



Fuente: elaboración propia.

Se pueden observar los datos en la siguiente tabla, en donde se ve la diferencia de los valores entre una mezcla y otra, en que la mezcla con cenizas volantes mostró resultados positivos para el ensayo de estabilidad mientras que en fluencia se mantuvo cerca del valor patrón.

Tabla XL. **Comparación entre mezclas**

<b>Ensayo</b>	<b>Mezcla sin ceniza</b>	<b>Mezcla con ceniza</b>	<b>Variación relativa</b>
Contenido óptimo de bitumen	5,30 %	6,25 %	0,95 %
Densidad específica bruta	2 350 kg/cm <sup>3</sup>	2 380 kg/cm <sup>3</sup>	30 kg/m <sup>3</sup>
Estabilidad	1 252 lbf	2 200 lbf	948 lbf
Fluencia	13,20	14,80	1,6

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. La mezcla de agregados, bitumen y cenizas volantes resultó ser una mezcla con buena trabajabilidad, ya que existió una cohesión entre partículas y las cenizas volantes se homogeneizaron junto con el bitumen, provocando que no hubiese ningún inconveniente al momento de realizar la compactación de las probetas.
2. Cuando se agregó cenizas volantes a la mezcla asfáltica, el tamaño y la forma de sus partículas permitieron llenar los vacíos naturales dentro de la granulometría en la mezcla, cumpliendo con el porcentaje necesario de vacíos de 4 %.
3. El 3 % de ceniza que se le agregó a la mezcla asfáltica en caliente incrementó la demanda de asfalto y cambió el valor del contenido óptimo con una variación absoluta de 17,92 %.
4. Se determinó que la adición de cenizas volantes en la mezcla asfáltica mejoró la resistencia del diseño y la superó con un valor de 948 Lbf, cumpliendo con las especificaciones de la Dirección General de Caminos de Guatemala.
5. La deformación que mostró el ensayo en la máquina Marshall se mantuvo con valores similares a la mezcla patrón, ya que la diferencia fue de 1,6 (0,01 plg), por lo tanto, las cenizas volantes permiten que la mezcla no sufra una deformación por fuera de los parámetros.

6. Se pudo observar que la mezcla con cenizas aumentó su densidad específica bruta, con un valor de  $30 \text{ kg/m}^3$  mayor que el de la mezcla patrón.



## RECOMENDACIONES

1. Utilizar la granulometría requerida en la sección 401 de las especificaciones de la Dirección General de Caminos de Guatemala. Aun cuando se añada un agente externo, deberá seguir cumpliendo con la norma ASTM D 3515 para diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall.
2. Cuidar que la mezcla sea homogénea, para que cumpla con las especificaciones. Además, el equipo que se utilice en los ensayos debe estar calibrado (balanza, martillos, moldes, hornos), para obtener resultados precisos y evitar errores en el diseño de la mezcla.
3. Realizar mezclas de pruebas cada vez que se pretenda utilizar materiales suplementarios como cenizas volantes u otros, ya que el uso no controlado de estos materiales puede influir negativamente en una mezcla de asfalto.
4. Para determinar si un diseño de mezcla es ideal, se recomienda que se someta a tránsito y se pueda seguir la secuencia del proceso en un lapso determinado, y así conocer las propiedades del diseño.
5. Al agregar un material *filler* a una mezcla asfáltica se debe realizar un análisis químico por condiciones de reacción del agregado junto con el bitumen.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. C 618-08<sup>a</sup>. *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete*. EE.UU: ASTM. 1995. 1234 p.
2. ÁVILA MARTÍNEZ, Pedro Roberto. *Incidencia de la granulometría y de la cantidad del cemento asfáltico en las propiedades físico-mecánicas principalmente en la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente diseñadas según la división 400, sección 401, tablas 401-1, 401-2 y 401-16 del libro de Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, Dirección General de Caminos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 178 p.
3. Cenizas volantes. [en línea]. <<http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/capitulo2.pdf>> [Consulta: 2 de marzo de 2017].
4. Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Septiembre, 2001. Sección 401. 721 p.
5. IQUIQUE SINEY, Gimy Anthony. *Estudio de las características físicas, químicas y mecánicas de la ceniza de palma africana como aditivo*

*para mejorar las propiedades del cemento UGC.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 67 p.

6. JUÁREZ QUEVEDO, Belcky María de Los Ángeles. *La utilización de la cáscara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 87 p.
7. LÓPEZ LÓPEZ, Carlos Iván. *El reciclado de barro cocido, como agregado en el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 118 p.
8. LÓPEZ RUIZ, Álvaro. *La utilización de las cenizas volantes según el reciente simposio de Pittsburgh.* Materiales de construcción. Vol. 17, nº 128. Diciembre de 1967.
9. MARTÍNEZ ROSALES, Edgar Jacob. *Evaluación de la ceniza volante producida por la combustión de carbón, en la planta generadora San José power station para utilizarse como puzolana artificial.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 52 p.
10. Ministerio de Energía y Minas. *Estadísticas energéticas del subsector eléctrico.* [en línea] <<http://www.mem.gob.gt/estadisticas/>> [Consulta: 28 de marzo 2017].

11. MORALES RAMÍREZ, Evelyn Maribel. *Manual de apoyo docente para desarrollar ensayos de laboratorio, relacionados con materiales de construcción*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 125 p.
12. SANTAELLA VALENCIA, Luz Elena. *Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Ciencia e ingeniería Neogranadina. 2001. 47-62 p.
13. Superintendencia del Medio Ambiente (Chile). *Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas*. [en línea]. <<http://www.file:///C:/Users/Adolfo/Downloads/Guía%20SMA%termoelectricas%20vf.pdf>> [Consulta: 14 de marzo 2017].





## Anexo 2. Estabilidad y flujo Marshall sin cenizas volantes



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**No. 12003**

INFORME NUMERO: 041 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36956

**INTERESADO:** INGRID MARIBEL SUARIANO MARROQUIN - 201114297

**PROYECTO:** TRABAJO DE GRADUACIÓN: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES

**DIRECCION:** CII/FIUSAC

**ENSAYO:** ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

**FECHA:** 03 DE JULIO DEL 2017

**MUESTRA:** MUESTRA DE ASFALTO

**SIN FLY ASH**

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4%	938,79	10
2 AC 20 4%	1031,13	11
1 AC 20 4,5%	1000,35	13
2 AC 20 4,5%	816,48	12
1 AC 20 5%	825,60	15
2 AC 20 5%	1381,16	12
1 AC 20 5,5%	1201,42	12
2 AC 20 5,5%	1527,36	11
1 AC 20 6%	1314,94	16
2 AC 20 6%	1478,34	14

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quijonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



Ing. Darío Francisco Lúcas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC –  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.



### Anexo 3. Densidad teórica máxima



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

INFORME NUMERO: 044 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36956

No. 12006

INTERESADO: INGRID MARIBEL SURIANO MARROQUIN - 201114297

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 03 DE JULIO DEL 2017

MUESTRA: MUESTRA DE ASFALTO

**SIN FLY ASH**

PROBETA	GMM
AC 20 4%	2,634
AC 20 4,5%	2,562
AC 20 5%	2,550
AC 20 5,5%	2,506
AC 20 6%	2,457

**CON FLY ASH**

PROBETA	GMM
AC 20 4,5%	2,658
AC 20 5%	2,612
AC 20 5,5%	2,592
AC 20 6%	2,553
AC 20 6,5%	2,545

Atentamente,

Vo. Bo. : 

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC






Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---


FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

## Anexo 4. Densidad específica bruta



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

INFORME NUMERO: 043 L.B.A.
ORDEN DE TRABAJO: 36956
No. 12005

INTERESADO: INGRID MARIBEL SURIANO MARROQUIN - 201114297

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE POR MÉTODO MARSHALL, ADICIONANDO CENIZAS VOLANTES

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 03 DE JULIO DEL 2017

MUESTRA: MUESTRA DE ASFALTO

SIN FLY ASH

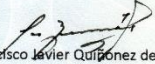
CON FLY ASH


PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4 %	2,316
2 AC 20 4 %	2,300
1 AC 20 4,5 %	2,318
2 AC 20 4,5 %	2,330
1 AC 20 5 %	2,339
2 AC 20 5 %	2,324
1 AC 20 5,5 %	2,361
2 2C 20 5,5 %	2,361
1 AC 20 6 %	2,378
2 AC 20 6 %	2,382

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4,5 %	2,343
2 AC 20 4,5 %	2,364
1 AC 20 5 %	2,365
1 AC 20 5 %	2,355
1 AC 20 5,5 %	2,371
1 AC 20 5,5 %	2,350
1 AC 20 6 %	2,389
1 AC 20 6 %	2,414
1 AC 20 6,5 %	2,426
1 AC 20 6,5 %	2,337

Atentamente,

Vo. Bo. :

  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC

  
 Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos  
 Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERÍA --USAC--  
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
 Teléfono directo: 2418-9116, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.