



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

**ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

José Luis Batz Samol

Asesorado por el Ing. Pablo Missael Cox Tuch

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
EXAMINADOR	Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 26 de octubre de 2018.

José Luis Batz Samol

Guatemala, 7 de octubre de 2019

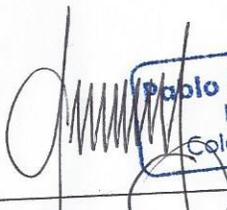
Ingeniero Civil Wuillian Ricardo Yon Chavarría
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Yon:

De manera atenta me dirijo a usted para manifestar que he asesorado el trabajo de tesis titulado: **"ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"** desarrollado por el estudiante universitario José Luis Batz Samol, previo a optar el título de Ingeniero Civil.

Al haber concluido este trabajo y habiendo efectuado la revisión final manifiesto a usted que dicho trabajo de Tesis cumple con los requerimientos establecidos para su desarrollo y proporciona una herramienta valiosa para la comunidad estudiantil, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,



Ing. Civil Pablo Missael Cox Tuch
Colegiado No. 14,665



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala 10 de octubre de 2019

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Aguilar.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación "ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA" desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil José Luis Batz Samol, quien contó con la asesoría del Ing. Pablo Missael Cox Tuch.

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



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC

Ing. Civil Wuillian Ricardo Yon Chavarría
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles

Más de 137 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





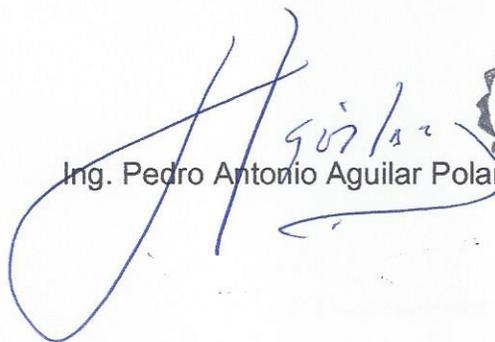
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<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. Pablo Missael Cox Tuch y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría al trabajo de graduación del estudiante José Luis Batz Samol **ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, marzo 2020

/mmm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

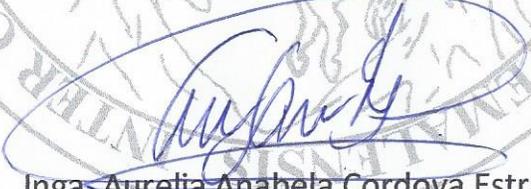


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.092.2020

La Decana 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: **ESTUDIO DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **José Luis Batz Samol**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, marzo de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Ya que con Él todo es posible, por darme todas las virtudes necesarias para alcanzar una nueva meta en mi vida.
Mis padres	Mario Luis Batz y Ana María Samol. Por todos los años que me han brindado su amor, dedicación y apoyo incondicional.
Mis hermanas	Mary Concepción y Anna María Batz Samol con mucha admiración y cariño.
Mis sobrinas	Ángela María Teresa Batz y Emily Sofía Velasquez por las alegrías que han traído a mi vida.
Mi familia	Por alentarme a seguir adelante en el transcurso de mi preparación académica.
Amigos y compañeros	Por las experiencias y momentos compartidos, con mucho aprecio.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por todas las bendiciones derramadas en mi vida y mi familia.
Mi familia	Por ser el pilar que sostiene mi vida y el apoyo que siempre me han brindado.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas y recursos educativos que me formaron como profesional.
Ing. Pablo Missael Cox Tuch	Por compartir sus conocimientos con mi persona y apoyo incondicional en mi carrera profesional.
Pavimentos de Guatemala	Por permitirme ser parte de su equipo y su valiosa colaboración en la elaboración del presente trabajo de graduación.
Proequipos, S.A.	A todo el personal de laboratorio, especialmente al Ing. Pedro Rocco, Lic. Allen Krebs, Ing. Hugo Rodríguez y a los laboratoristas Edwin Rodríguez y Tomas Mejía.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ASFALTO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA	1
1.1. Antecedentes del asfalto	1
1.2. Bacheos, reparaciones y rehabilitación en la ciudad de Guatemala.....	2
1.3. Destino y uso de asfalto removido (contaminación ambiental).....	4
1.3.1. Posibles destinos del material removido.....	5
1.3.1.1. Botaderos	5
1.3.1.2. Acumulación en las calles	6
1.3.1.3. Recuperación en una planta de trituration.....	8
1.4. Antecedentes de uso de pavimento asfáltico reciclado en Guatemala.....	9
1.4.1. Proceso de reciclado “in situ”.....	9
1.4.2. Proceso de reciclado de asfalto espumado	11
1.4.3. Estabilización de base con asfalto existente	13

2.	INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA.....	15
2.1.	Antecedentes	15
2.2.	Tipos de carreteras en el departamento de Guatemala	16
2.3.	Estado de las carreteras	19
2.3.1.	Componentes estructurales del pavimento	21
2.3.2.	Factores que afectan el comportamiento del pavimento.....	23
2.3.3.	Periodo de diseño	24
2.4.	Tipos de fallas	24
2.4.1.	Fisura piel de cocodrilo	25
2.4.2.	Fisuras en bloque.....	25
2.4.3.	Fisuras en arco.....	26
2.4.4.	Fisura transversal.....	27
2.4.5.	Fisura longitudinal	27
2.4.6.	Fisura por reflexión de junta	27
2.5.	Tipos de baches.....	28
3.	PROCESOS DE RECICLADO.....	31
3.1.	Generalidades.....	31
3.2.	Control de producción del RAP	31
3.2.1.	Selección de la profundidad de fresado	31
3.3.	Almacenamiento	33
3.4.	Proceso de trituración	35
3.4.1.	Tratamiento primario del material.....	36
3.4.1.1.	Origen del pavimento asfáltico recuperado	36
3.4.1.2.	Clasificación	38
3.4.1.3.	Limpieza.....	38

3.4.2.	Tratamiento secundario del RAP	40
3.4.2.1.	Control durante la producción.....	40
3.4.2.2.	Limpieza del material triturado.....	42
3.4.3.	Tratamiento terciario.....	43
3.4.3.1.	Control de calidad del RAP	43
3.4.3.1.1.	Toma de muestra	43
3.4.3.1.2.	Porcentaje de AC envejecido	44
3.4.3.1.3.	Granulometría.....	44
4.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	47
4.1.	Caracterización física de los materiales	47
4.1.1.	Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos (ASTM C 136, AASHTO T-27).....	47
4.1.2.	Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos (ASTM D 2419 – AASHTO T 196)	47
4.1.3.	Límite plástico e índice de plasticidad en los suelos (ASTM D 4318 – AASHTO T 90).....	48
4.1.4.	Ensayo de abrasión máquina de Los Ángeles (ASTM C 131, ASTM C535 Y AASHTO T96)	48
4.1.5.	Desintegración al sulfato de sodio ASTM C88, AASHTO T 104.....	49
4.1.6.	Gravedades específicas y absorción de los agregados (ASTM C 127- C 128 – ASSHTO T 84 – T85)	49
4.2.	Caracterización física del pavimento asfáltico recuperado (RAP).....	50

4.2.1.	Análisis granulométrico de los agregados de los agregados gruesos y finos (ASTM C 136, AASHTO T-27).....	50
4.2.2.	Ensayo de extracción de asfalto (ASTM D 2172)....	50
4.2.3.	Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos (ASTM D 2419- AASHTO T 196).....	51
4.2.4.	Gravedades específicas y absorción de los agregados (ASTM C 127- C 128 – ASSHTO T 84 – T85).....	51
4.2.5.	Ensayo de abrasión máquina de los Ángeles (ASTM C 131, ASTM C535 y AASHTO T96)	51
4.3.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto muestra patrón.....	52
4.3.1.	Granulometría	52
4.3.2.	Método Marshall.....	53
4.3.2.1.	Elaboración de mezcla asfáltica	55
4.3.3.	Porcentaje de vacíos.....	55
4.3.4.	Resumen de resultados muestra patrón.....	57
4.3.5.	Conclusiones de resultados muestra patrón	63
4.3.5.1.	Resumen de resultados.....	63
4.3.5.2.	Análisis de resultados	68
4.4.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 10 % RAP	69
4.4.1.	Método Marshall para briquetas con 10 % de RAP	69
4.4.2.	Resumen de resultados ensayos 10 % RAP	69
4.4.3.	Conclusiones de muestra con 10 % de RAP.....	75
4.4.3.1.	Resumen de resultados con 10 % de RAP	75
4.4.3.2.	Análisis de resultados	80

4.5.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 20 % RAP	81
4.5.1.	Método Marshall para briquetas con 20 % de RAP	81
4.5.2.	Resumen de resultados ensayos 20 % RAP	81
4.5.3.	Conclusiones de muestra con 20 % de RAP	87
4.5.3.1.	Resumen de resultados con 20 % de RAP	87
4.5.3.2.	Análisis de resultados.....	92
4.6.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 30 % RAP	93
4.6.1.	Método Marshall para briquetas con 30 % de RAP	93
4.6.2.	Resumen de resultados ensayos 30 % de RAP	93
4.6.3.	Conclusiones de muestra con 30 % de RAP	99
4.6.3.1.	Resumen de resultados con 30 % de RAP	99
4.6.3.2.	Análisis de resultados.....	104
4.7.	Comprobación de resultados, análisis y conclusiones	105
4.8.	Uso de aditivos rejuvenecedores en mezclas asfálticas en caliente con RAP	107
5.	ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	109
5.1.	Mezcla asfáltica	109
5.2.	Contenido de cemento asfáltico en la mezcla	110
5.3.	Gravedad específica de la mezcla asfáltica.....	110
5.4.	Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente	110
5.5.	Determinación de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente..	111
5.6.	Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall	112

CONCLUSIONES..... 113
RECOMENDACIONES 115
BIBLIOGRAFÍA..... 117
ANEXOS..... 119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Asfalto reciclado apilado en botaderos ocupando espacio destinado para otro tipo de desechos.....	5
2.	Acumulación de asfalto retirado en la ciudad de Guatemala	6
3.	Acumulación de asfalto proveniente de bacheo	7
4.	Acumulación de tepes en ciudad de Guatemala	7
5.	Recuperación de asfalto en una planta de reciclado.....	9
6.	Recolección de material por medio del proceso de fresado.....	32
7.	Almacenamiento para minimizar la segregación.....	34
8.	Almacenamiento cubierto para minimizar la humedad.....	35
9.	Planta trituradora Proequipos S.A.	36
10.	Distintos tipos de material en planta	37
11.	Clasificación de material en planta.....	38
12.	Material contaminado con concreto hidráulico y materia orgánica.....	39
13.	Material contaminado con materia orgánica.....	39
14.	Proceso de homogenización del material triturado con cargador frontal	41
15.	Proceso de homogenización del material triturado con minicargador ..	41
16.	Limpieza manual del material triturado.....	42
17.	Limpieza del material en la banda transportadora	42
18.	Toma de muestra de RAP	43
19.	Extractor centrífugo	44
20.	Muestra de RAP con asfalto extraído y tamizado	45
21.	Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	56

22.	Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC	64
23.	GMB Vrs porcentaje de AC.....	64
24.	Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC	65
25.	RICE Vrs porcentaje de AC	65
26.	Vacíos rellenos de asfáltico Vrs porcentaje de AC	66
27.	Estabilidad Vrs porcentaje de AC	66
28.	Fluencia Vrs porcentaje de AC	67
29.	Relación estabilidad/fluencia Vrs porcentaje de AC.....	67
30.	Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC.....	68
31.	Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC	76
32.	GMB Vrs porcentaje de AC.....	76
33.	Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC	77
34.	Rice Vrs porcentaje de AC.....	77
35.	VRA Vrs porcentaje de AC	78
36.	Estabilidad Vrs porcentaje de AC	78
37.	FLOW Vrs porcentaje de AC	79
38.	Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC.....	79
39.	Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC.....	80
40.	Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC	88
41.	GMB Vrs porcentaje de AC.....	88
42.	Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC	89
43.	Rice Vrs porcentaje de AC.....	89
44.	VRA Vrs porcentaje de AC	90
45.	Estabilidad Vrs porcentaje de AC	90
46.	FLOW Vrs porcentaje de AC	91
47.	Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC.....	91
48.	Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC.....	92
49.	Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC	100
50.	GMB Vrs porcentaje de AC.....	100

51.	Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC	101
52.	Rice Vrs porcentaje de AC	101
53.	VRA Vrs porcentaje de AC	102
54.	Estabilidad Vrs porcentaje de AC.....	102
55.	FLOW Vrs porcentaje de AC.....	103
56.	Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC.....	103
57.	Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC	104
58.	Porcentaje de RAP Vrs porcentaje óptimo de AC	106

TABLAS

I.	Niveles de severidad de los baches	29
II.	Graduación granulométrica según el tipo de mezcla	53
III.	Porcentajes teóricos de contenido asfáltico	54
IV.	Dosificación de materiales	54
V.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC	57
VI.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC	57
VII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC	58
VIII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC	58
IX.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC	58
X.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % AC.....	59
XI.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % AC.....	59
XII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC.....	60
XIII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC.....	60
XIV.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC.....	60
XV.	Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC.....	61
XVI.	Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC.....	61
XVII.	Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC.....	62

XVIII.	Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC	62
XIX.	Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC	62
XX.	Tabla de resultados	63
XXI.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC.....	69
XXII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC.....	70
XXIII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC.....	70
XXIV.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC.....	70
XXV.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC.....	71
XXVI.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % de AC	71
XXVII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC	72
XXVIII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC	72
XXIX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC	72
XXX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC	73
XXXI.	Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC	73
XXXII.	Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC	74
XXXIII.	Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC	74
XXXIV.	Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC	74
XXXV.	Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC	75
XXXVI.	Tabla de resultados	75
XXXVII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC.....	81
XXXVIII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC.....	82
XXXIX.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC.....	82
XL.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC.....	82
XLI.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC.....	83
XLII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % de AC	83
XLIII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC	84
XLIV.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC	84
XLV.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC	84
XLVI.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC	85

XLVII.	Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC.....	85
XLVIII.	Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC.....	86
XLIX.	Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC.....	86
L.	Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC.....	86
LI.	Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC.....	87
LII.	Tabla de resultados.....	87
LIII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC	93
LIV.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC	94
LV.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC	94
LVI.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC	94
LVII.	Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,5 % de AC	95
LVIII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC.....	95
LIX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC.....	96
LX.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC.....	96
LXI.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC.....	96
LXII.	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,5 % de AC.....	97
LXIII.	Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC.....	97
LXIV.	Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC.....	98
LXV.	Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC.....	98
LXVI.	Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC.....	98
LXVII.	Estabilidad y fluencia con 7,5 % de AC.....	99
LXVIII.	Tabla de resultados.....	99
LXIX.	Mezclas asfálticas en caliente utilizadas en Guatemala.....	109

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC-20	Asfalto convencional
AC	Cemento asfáltico
Blvd	Bulevar
DTM	Densidad teórica máxima
Cm	Centímetros
cm³	Centímetro cúbico
Ftemp k	Factor de corrección por temperatura del agua
Fvol	Factor de corrección por volumen
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
Gb	Gravedad específica del asfalto
Gmb	Gravedad específica de la mezcla compactada (g/cm ³)
GSE	Gravedad específica efectiva del agregado integrado
Gmm	Gravedad específica máxima de la mezcla
Lcd	Lectura del dial de carga
Ldf	Lectura del dial de flujo
Lbs	Libras
m²	Metros cuadrados
m	Metro
mm	Milímetro
PB	Peso bruto de la muestra de mezcla

PBE	Peso bruto del material de la mezcla seca sin asfalto
Pb	Peso bruto de material de la mezcla sin asfalto sin lavar
PBR	Peso bruto retenido acumulado de material lavado en cada tamiz
Waguasss	peso en agua de la muestra en estado sss en g
Ws	Peso en el aire de la muestra en estado seco en g
Wairesss	Peso en el aire de la muestra en estado sss en g
Pma	Peso neto de la muestra al aire
%	Porcentaje
% Ag	Porcentaje de agregado en la mezcla
% AC	Porcentaje de bitumen asfaltico
% pasa	Porcentaje de material pasante en cada tamiz
% Ret	Porcentaje de peso retenido
% Ret.ac	Porcentaje de peso retenido acumulado
sss	Saturado superficialmente seco
REF	Relación estabilidad fluencia
VA	Vacíos de aire
VAM	Vacíos en agregado mineral
VRA	Vacíos rellenos de asfalto

GLOSARIO

AASHTO	Siglas en idioma inglés que corresponden a la entidad <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
Abrasión	Desgaste derivado de la acción mecánica por la fricción entre dos superficies.
Agregado	Material que conforma el esqueleto granular de la mezcla
Agregado grueso	Agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (Nº 4).
Agregado fino	Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (Nº 4).
Agregado filler	Polvo mineral de tamaño menor que pasa el tamiz 0,075 mm (Nº 200).
ASTM	Siglas que corresponden a la entidad <i>American Society for Testing and materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
Asfalto	Material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante para la construcción de carreteras.

Bitumen	Sustancia cementante visco elástica proveniente de la refinación del petróleo.
Briqueta	Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos.
Cemento asfáltico	Asfalto controlado para ser usado como aglomerante en la preparación de mezclas asfálticas.
Compactación	Acción de comprimir o compactar una masa determinada de un material a una densidad requerida.
Densidad	Grado de solidez y rigidez de una mezcla uniformemente compactada distribuyendo su masa en todo su volumen.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo cargas aplicadas.
Fluencia	Capacidad de una mezcla asfáltica de acomodarse a los asentamientos en presencia de una carga aplicada.
PADEGUA	Pavimentos de Guatemala.
Pétreo	Material que proviene de la roca, de una piedra o de un peñasco.

Tara	Recipiente o vehículo donde se transporta una muestra de determinado material.
Tepe	Maqueta de concreto asfáltico extraído de la carpeta de rodadura.
Trabajabilidad	Facilidad con la que la mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada.
Vacío	Espacio de aire entre la mezcla compactada.
Viscosidad	Parámetro usado para medir la consistencia del asfalto.

RESUMEN

La mezcla asfáltica en caliente es generalmente una combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos. Las proporciones de los agregados y el tipo de cemento asfáltico utilizado determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el rendimiento de la misma, como una mezcla específica para un determinado uso y destino.

La mezcla asfáltica es un producto empleado para la pavimentación de vías de comunicación terrestres y calles de acceso. Es un material muy noble debido a su flexibilidad, proporcionada por las propiedades del bitumen asfáltico.

El presente trabajo se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica al adicionarle, como material de aporte, pavimento asfáltico recuperado RAP (por sus siglas en inglés), en proporciones de 10, 20 y 30 % del total del agregado pétreo. Además, conocer sus características físicas y sus propiedades mecánicas con el fin de compararlas contra una mezcla con agregados pétreos utilizados por primera vez, conocer su desempeño y determinar si cumple con las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos (2001).

OBJETIVOS

General

Verificar las características físicas y propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con material recuperado (RAP), para conocer el comportamiento que tiene frente a una mezcla con agregados vírgenes (muestra patrón).

Específicos

1. Demostrar el beneficio de la utilización de pavimento asfáltico recuperado en sustitución de material virgen en nuevas mezclas asfálticas en caliente.
2. Determinar las características físicas y propiedades mecánicas de los materiales constituyentes de una mezcla asfáltica recuperada.
3. Determinar, por medio de ensayos el porcentaje óptimo de pavimento asfáltico recuperado (RAP), que puede ser utilizado en una nueva mezcla asfáltica sin comprometer su calidad y durabilidad.
4. Realizar un estudio comparativo del comportamiento de la mezcla asfáltica con agregados vírgenes y pavimento asfáltico recuperado, y analizar sus propiedades reológicas y mecánicas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, gran parte de la red vial existente en la ciudad de Guatemala se encuentra deteriorada o en estado crítico. Uno de los factores que se debe considerar para conocer el deterioro, es el periodo de vida útil de las carreteras, el cual es la duración estimada en la cual la carretera prestará correctamente la función para la cual ha sido creada. Después de este tiempo, las calles y avenidas necesitarán repararse constantemente, bachear las partes de la carpeta de rodadura que se encuentren dañadas y sustituir con nueva mezcla asfáltica las partes más críticas, las cuales ya no pueden ser reparadas y, de este modo, aumentar el tiempo de servicio del pavimento.

En la ciudad de Guatemala, la mayoría de las reparaciones de calles y avenidas se realiza con concreto asfáltico. Esto genera una alta demanda del uso de agregados y asfalto líquido el cual puede variar en porcentajes de 3-7 % según su tipo y uso; sin embargo, al reparar las carreteras quedan restos de material retirado de las calles, a los cuales se les llama maquetas o tepes de asfalto. Estos, al momento de ser retirados, pueden tener dos destinos: ser trasladados hacia un botadero municipal y con esto contribuir con la contaminación ambiental y reducir el espacio en botaderos destinado para otro tipo de material, o bien pueden ser recogidos y conducidos a un predio, en donde se le dé un tratamiento de reciclaje. En este se realiza una separación y clasificación del material recolectado, para luego ser procesado y triturado para su reutilización en nuevas mezclas asfálticas, a las cuales se les denomina RAP (pavimento asfáltico recuperado), por sus siglas en inglés.

Sin embargo, para llevar un mejor control sobre el tipo de material ingresado a planta es necesario conocer el estado del pavimento existente, por lo cual se debe realizar un estudio acerca de cómo se encuentra la estructura del pavimento actual para hacer una aproximación de qué porcentaje de la mezcla asfáltica recogida en campo podrá ser reutilizada nuevamente en una mezcla asfáltica. El uso de RAP contribuye significativamente a la reducción de la demanda de recursos no renovables naturales (tanto en asfalto como en agregados) y de este modo también reduce la energía y las emisiones asociadas con la explotación de canteras y transporte de materia prima virgen a plantas productoras de mezclas asfálticas.

El presente trabajo es un estudio teórico práctico sobre el uso de pavimento asfáltico recuperado RAP (por sus siglas en inglés), en nuevas mezclas asfálticas en caliente, desde su proceso de depuración hasta la colocación en una nueva mezcla asfáltica. Conociendo las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla con material recuperado, así como los procesos de control de calidad que debe de cumplir para ser aceptada dentro de los estándares establecidos.

1. ASFALTO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

1.1. Antecedentes del asfalto

La construcción de carreteras data desde los egipcios, sin embargo, los trabajos más importantes de la antigüedad son los realizados por los romanos, los cuales diseñaron una red impresionante de calzadas que salían desde Roma y la comunicaban con casi todo el mundo conocido en ese entonces. En Italia, tienen sus orígenes las primeras carreteras diseñadas para el transporte de vehículos motorizados.

En una carretera, el pavimento es la superficie artificial creada para darle estabilidad y solidez al piso. Actualmente, en lo que a la construcción de carreteras se refiere, la ingeniería civil utiliza dos tipos de pavimentos principalmente. El primero es el pavimento flexible, el cual está hecho a base de asfalto; y el segundo el pavimento rígido, elaborado a base de losas de concreto hidráulico.

Los pavimentos más utilizados a la fecha son los flexibles, los cuales representan cerca del 95 % del total de carreteras en el mundo. Esto se debe principalmente a dos causas. La primera es que por mucho tiempo ha persistido la idea de que los costos que representaba la construcción de pavimentos rígidos eran mucho mayores; y la segunda es que anteriormente existía abundancia y bajos costos del material asfáltico, derivado del petróleo.

En la actualidad, y como resultado del avance en los estudios de la utilización de concreto para pavimentos, nuevas metodologías se han

desarrollado, presentando una opción competitiva no solo en costos, sino que en materia de duración y bajo mantenimiento.

1.2. Bacheos, reparaciones y rehabilitación en la ciudad de Guatemala

El bacheo es probablemente el método de reparación más utilizado en pavimentos asfálticos. Todos los pavimentos necesitan mantenimiento por lo cual el bacheo es un método constantemente utilizado en la ciudad de Guatemala. Los baches no ocurren por causas naturales, si no que se producen por el tránsito vehicular.

El bacheo no es otra cosa que la reparación superficial o en profundidad de un área dañada del pavimento. Esta reparación puede ser temporal o permanente. Una reparación oportuna de los baches ayuda considerablemente en bajar los costos de mantenimiento de los pavimentos, ya que si estos no se reparan a tiempo, puede entrar agua a la subrasante y provoca fallas mayores. Generalmente, para las operaciones de bacheo se utilizan mezclas de cemento asfáltico en caliente hechas en planta, ya que estas, a pesar de tener un costo más elevado que otras, producen parches de duración mayor.

Últimamente se han utilizado diversos tipos de asaltos modificados, los que no necesitan un clima demasiado exigente para su colocación en obra. Estas son mezclas asfálticas en frío, no requieren de maquinaria pesada y son fáciles de colocar.

Las reparaciones en las fisuras en los pavimentos asfálticos pueden ocurrir por diversos motivos; por lo tanto, el tratamiento que se les dará estará directamente relacionado con el tipo de fisura que encontremos en el pavimento.

Los tipos de fisuras que comúnmente encontramos son:

- Fisuras en forma de piel de cocodrilo
- Fisuras de borde
- Fisuras longitudinales a lo largo de los bordes
- Fisuras a lo largo de la junta de las vías
- Fisuras de reflexión
- Fisuras de contracción
- Fisuras de desplazamiento

Los pavimentos pueden presentar, por un lado, grietas y ranuras por toda su superficie y, por otro, una superficie brillante y lisa que se ha pulido por el intenso paso de vehículos. En estas superficies propician que la estabilidad del vehículo sea muy deficiente y que patine y no se sujete bien por desprendimiento de pequeños trozos de la superficie del vial.

Para renovar estas carreteras, el pavimento dañado puede removerse mediante fresado y ser enviado a una planta para su procesamiento y reciclado posterior, o bien puede emplearse una máquina especial que recicla los materiales en el mismo lugar.

Los pasos que se siguen para la rehabilitación de un pavimento dañado son:

- Analizar los daños y anomalías producidas sobre el pavimento que se desee reciclar.
- Limpieza general de todas las superficies antes de iniciar el proceso.
- Analizar el espesor del pavimento y la calidad de la mezcla asfáltica reciclada.

- Uso de la maquinaria adecuada para iniciar el fresado.
- Uso de una maquina recicladora asfáltica en dicho pavimento, si se dispone de ella, si no se emplearía el asfalto reciclado en planta con las máquinas convencionales.

1.3. Destino y uso de asfalto removido (contaminación ambiental)

En medioambiente se define contaminante a toda aquella sustancia que no puede ser asimilada por el sistema. Un contaminante es cualquier clase de materia, ya sea artificial o natural, que no hay manera de integrarla dentro del ciclo ecológico y biológico natural. Existen varias clases de contaminantes en forma de gas, líquido o en estado sólido que destacan por influir negativamente en el entorno.

En la naturaleza existen contaminantes naturales como, por ejemplo, en las zonas volcánicas en donde se expulsan al entorno gases nocivos o, en otros casos, emanaciones de aguas contaminantes. Esto último ocurre en los fondos oceánicos, donde los volcanes expulsan soluciones metálicas sobresaturadas con concentraciones letales para la vida. Tanto esos gases como esos líquidos tienen efectos devastadores sobre la vida cuando contaminan aguas subterráneas o tierras con vegetales y cultivos.

En el caso de los contaminantes artificiales y, por tanto, producidos por actividades humanas, destacan sobre todo los vertidos de petróleo en el mar. Estos dos ejemplos mencionados no son ni malos ni buenos en sí; simplemente ocurre que, en esas concentraciones y cantidades, no pueden ser asimilados por el entorno, ya que estas sustancias no están donde deberían.

1.3.1. Posibles destinos del material removido

El material removido durante las reparaciones o rehabilitaciones, comúnmente es considerado como desperdicio, y tiene como destino: botaderos o plantas de recuperación.

1.3.1.1. Botaderos

El material reciclado en el casco urbano de la ciudad de Guatemala, por lo general, es llevado a botaderos municipales lo cual implica un gasto y un impacto ambiental considerable.

En la ciudad de Guatemala no existe ningún lugar físico aprobado para el desecho de material derivado del petróleo, como aceites, emulsiones o asfaltos, por lo cual el material recuperado debe trasladarse hacia cualquier botadero municipal, por el daño que puede causarle al medio ambiente.

Figura 1. **Asfalto reciclado apilado en botaderos ocupando espacio destinado para otro tipo de desechos**



Fuente: Laboratorio Proequipos S.A.

1.3.1.2. Acumulación en las calles

Debido a que no existe ningún lugar destinado específicamente para verter el asfalto extraído de las calles, algunas empresas optan por dejar el material a un costado de las calles y carreteras de la ciudad de Guatemala. Lo dejan por largos periodos hasta que son retirados y trasladados hacia algún botadero, lo cual afecta el volumen de los mismos y ocupa un lugar destinado para otros tipos de desechos. Esto contamina la ciudad de Guatemala, no solamente por el impacto ambiental que produce la acumulación de tepes en las calles, sino también la contaminación visual que provocan. De igual manera, este material en periodos de invierno podría ocasionar inconvenientes con los sistemas de drenaje, ya que puede llegar a obstaculizar los tragantes de agua pluvial. En las siguientes imágenes se muestra asfalto removido a un costado de las calles en distintos puntos de la ciudad de Guatemala.

Figura 2. **Acumulación de asfalto retirado en la ciudad de Guatemala**



Fuente: calzada San Juan zona 19.

Figura 3. **Acumulación de asfalto proveniente de bacheo**



Fuente: Blvd Vista Hermosa zona 15.

Figura 4. **Acumulación de tepes en ciudad de Guatemala**



Fuente: Blvd. Vista Hermosa Zona 15.

1.3.1.3. Recuperación en una planta de trituración

Las secciones de asfalto que están envejecidas y cuya vida útil ha terminado pueden ser utilizadas nuevamente mediante el proceso de reciclaje. En una planta de recuperación de RAP, este material pasa a tener un nuevo uso empleando sus mismos componentes para nuevas mezclas asfálticas. En una planta de recuperación de RAP, se recibe el asfalto previo a una inspección realizada para conocer la calidad del mismo; si proviene de carreteras y trabajos de bacheo que son sustituidas por nuevos trazados de carreteras o autopistas, o bien de determinados tramos que han sido modificados o proceden del fresado de superficies dañadas que necesitan una renovación.

Al ser llevado el pavimento hacia una planta de reciclado de RAP, se soluciona el problema de la acumulación de material en las calles de la ciudad de Guatemala, así como los inconvenientes que puedan causarse por la obstrucción de tragantes de agua pluvial por la acumulación de este material. Al mismo tiempo, se soluciona el problema de la acumulación de asfalto en botaderos municipales, los cuales no son adecuados para este tipo de material.

Otro de los beneficios que ofrece la reutilización del asfalto es el aporte que representa al ser incluido en una nueva mezcla asfáltica, tanto como agregado en sustitución de material virgen como también el aporte que representa el contenido de asfalto presente en el RAP.

Figura 5. **Recuperación de asfalto en una planta de reciclado**



Fuente: Laboratorio Proequipos S.A.

1.4. Antecedentes de uso de pavimento asfáltico reciclado en Guatemala

En Guatemala, se han realizado trabajos de investigación enfocados en la reutilización del asfalto, teniendo como fin principal preservar los recursos naturales y ahorrar costos de traslado de material.

1.4.1. Proceso de reciclado “in situ”

Con este proceso de reciclado de asfalto se tiene la capacidad de reciclar capas de gran espesor en un único proceso. Esto se logra mediante la utilización de máquinas recicladoras. El elemento más importante de una

máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador, el cual está equipado con un gran número de puntas.

El tambor rota y pulveriza el material del pavimento existente. Cuando la máquina recicladora avanza por el tramo a rehabilitar, el tambor de la máquina rota y el agua proveniente de un tanque acoplado a dicha máquina, se llena por medio de mangueras ubicadas dentro de la cámara de mezclado. El flujo de agua es medido con exactitud por medio de un microprocesador ubicado en el sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido óptimo de humedad y, al mismo tiempo, lograr el máximo porcentaje de compactación de la capa trabajada.

Mientras se realiza este proceso, se puede introducir directamente a la cámara de mezclado los agentes estabilizadores escogidos, ya sea líquidos de lechada cemento/agua o emulsión asfáltica, de manera separada o combinada. También se puede inyectar el asfalto espumado dentro de la misma cámara por medio de una barra aspersora. De requerirse la utilización de algún agente estabilizador como la cal, esta normalmente se esparce en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. Se hace transitar la máquina recicladora sobre ella, mezclando la cal con el material recuperado y, por último, se le inyecta agua para proporcionar la humedad necesaria.

Los trenes de reciclado se pueden configurar de diferente forma, según sea el tipo de reciclado que se requiera. En los distintos casos, la máquina recicladora empuja o hala el equipo conectado a ella para ejercer la fuerza necesaria sobre el tren y lograr el reciclado efectivo del pavimento.

El tren de reciclado se utiliza cuando el material se estabiliza con cemento. Es importante realizar una medición lo más exacta posible de la tasa de

aplicación requerida de cemento y agua antes de mezclarse para formar la lechada. Esta lechada se bombea a la recicladora por medio de una manguera que la inyecta en la cámara pulverizadora. Sin embargo, también existe la posibilidad de realizar el mismo procedimiento con la aplicación de la cal, que es esparcir el cemento sobre el pavimento existente delante de la recicladora, y se coloca en lugar del mezclador de lechada, el tanque de agua.

El material que sale de la recicladora se debe compactar inicialmente con un rodillo pesado vibratorio para que la capa reciclada logre alcanzar una densidad uniforme. Posteriormente, el material se debe perfilar con una motoniveladora antes de ser compactado nuevamente, esta vez por medio de un compactador neumático y un rodillo vibratorio.

Cuando la emulsión o el asfalto espumado se aplican juntos con la lechada de cemento, la configuración del tren de reciclado debe ser de forma similar al anterior.

Si se esparce el cemento sobre la superficie del camino delante del tren de reciclado, el tanque de asfalto se debe acoplar a la recicladora y el tanque de agua se empuja, colocándose delante del tren de reciclado.

1.4.2. Proceso de reciclado de asfalto espumado

El proceso para la obtención del asfalto espumado es inyectar una porción de agua, la cual va de 1 a 2 %, una porción de concreto asfáltico (de 2 % a 3 % en peso), aire comprimido a una masa de asfalto a temperaturas entre 160 °C a 180 °C. Estos, dentro de una cámara de expansión, se mezclan y al producirse la fusión entre agua y el concreto asfáltico caliente, se produce la evaporación e

inmediata expansión en el vapor de agua saturado, formando gran cantidad de burbujas que recubren inmediatamente el material reciclado.

Debido a la expansión de vapor de agua saturado, el volumen se multiplica de 15 a 20 veces.

El primero en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería, Universidad Estatal de Iowa en 1956. Luego esta tecnología, fue refinada por Mobil Oil, la cual desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto para generar espuma. El sistema desarrollado por Wirtgen, a mediados de los años 90, inyecta aire y agua al asfalto en la cámara de expansión.

Resulta necesaria la utilización de cemento conjuntamente con el asfalto espumado, debido a que con este agente se puede mejorar la trabajabilidad y resistencia de la capa estabilizada y reducir al mismo tiempo la excesiva humedad que pueda tener.

Cuando se cuenta con materiales con elevado porcentaje de plasticidad se debe utilizar cal debido a que ello ayuda a reducir la plasticidad que los materiales existentes puedan tener, la aplicación de la misma puede darse en porcentajes que van desde el 1 % al 3 % según el nivel al que se requiera la reducción del índice de plasticidad. Así mismo, estos agentes estabilizadores pueden modificar el porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200 (0,075 milímetros) por lo que debe cuidarse y controlarse este aspecto para no variar considerablemente la granulometría del suelo.

A pesar de que la aplicación del asfalto espumado se descubrió en los años 50, en Guatemala y el mundo han sido pocos los proyectos construidos aplicando esta tecnología.

El procedimiento de diseño de las mezclas se realiza de la misma forma que con el diseño tipo Marshall; incluso las probetas requieren de las mismas especificaciones para su fabricación. Sin embargo, la estabilidad y la fluencia no son elementos requeridos para su ensayo y son sustituidos por el ensayo a tracción indirecta.

1.4.3. Estabilización de base con asfalto existente

Cuando se posee una carpeta de concreto asfáltico o doble tratamiento, y la superficie está afectada por fallas con niveles de agrietamiento severo, es posible mejorar las características de la rodadura mediante la estabilización del material RAP incluyendo en la capa de base, en este caso del tipo granular. Esto se logra mediante el reciclado profundo y su objetivo primordial es el de mejorar las propiedades de los materiales reciclados y reintegrar los niveles de serviciabilidad originales.

La profundidad de este reciclado y la estabilización RAP/base granular, pueden variar según las condiciones en campo. Estas profundidades generalmente se encuentran entre 15,0 cm y 25,0 cm. Puede haber situaciones en las que se supere esta profundidad, como en el caso de que los niveles de tránsito superen significativamente la capacidad estructural, tomando en cuenta el espesor de capa de base existente y las propiedades de la misma.

2. INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA

2.1. Antecedentes

En Guatemala se están llevando a cabo estudios con el fin de crear un sistema de transporte que sirva a las personas en forma eficiente, en lugar de convertirse en una crisis que limite la libre locomoción. Esta es una necesidad básica, ya que los problemas de transporte van en aumento a medida que crece la población. Otro aspecto relacionado a la problemática actual del transporte es la necesidad de más espacios para habitar; esto provoca movimientos hacia suburbios y zonas periféricas que, a su vez, requieren medios de transporte adecuados para la migración.

La demanda para mayor movilidad personal lleva a las personas a comprar automóviles con el propósito de transportarse a sus destinos, salir de paseo, entre otros. Es por ello que, en la República de Guatemala, desde 1920 fue creada por Acuerdo Gubernativo la Dirección General de Caminos DGC. La DGC forma parte, con relación de dependencia del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda CIV y es el ente rector de la infraestructura vial del país. Su objetivo es dotar al país de una adecuada infraestructura vial, de calidad y estructura geográfica, que satisfaga las necesidades de movilización de personas y bienes por carreteras en forma fluida, económica y segura. Su creación se realizó durante el gobierno del licenciado Carlos Carrera, como ente gubernamental encargado de normar la construcción y el mantenimiento de las carreteras.

Posteriormente, fue suprimida durante el gobierno del General Lázaro Chacón, según Acuerdo Gubernativo del 8 de noviembre de 1930, el cual ordenaba la realización de las obras viales por medio de contratos. Simultáneamente, fue emitido otro decreto que creó la Comisión Nacional de Caminos.

Dentro de los rubros en los cuales se manejan los recursos antes mencionados se encuentran los siguientes:

- Realización de estudios, diseños y planes de gestión
- Supervisión de construcción
- Obras de construcción
- Obras de rehabilitación
- Obras de mejoramiento
- Trabajos de conservación
- Otras obras

El 18 de febrero de 1997, según Acuerdo Gubernativo No. 186-97 fue creada la Unidad Ejecutora de Conservación Vial COVIAL, la cual pasó a hacerse cargo de los contratos de mantenimiento de carreteras. Desapareció con ello la División de Mantenimiento por Contrato.

2.2. Tipos de carreteras en el departamento de Guatemala

La infraestructura vial en Guatemala ha sido clasificada según el tipo de ruta formulada con base en las localidades que comunican a continuación. Se listan los lineamientos utilizados para dicha clasificación.

- Rutas centroamericanas (CA)
 - Unen la capital con fronteras o desde otra ruta centroamericana.
 - Unen puertos de importancia desde la capital o desde otra ruta centroamericana.
 - Atraviesan longitudinalmente o transversalmente la República.
 - Reúnen las mejores condiciones de diseño que la topografía les permite.
 - Derecho de vía: 25 m (12,50 m de cada lado de la línea central).
 - Área de reserva: 80 m (40,00 m de cada lado de la línea central).

- Rutas nacionales (NA)
 - Unen cabeceras departamentales.
 - Unen rutas centroamericanas con cabeceras departamentales.
 - Conectan rutas centroamericanas.
 - Unen rutas centroamericanas con puertos de importancia comercial para el país.
 - Red auxiliar de las rutas centroamericanas.
 - Derecho de vía: 25 m. (12,50 m. de cada lado de la línea central).
 - Área de reserva: 80 m. (40,00 m. de cada lado de la línea central).

- Rutas departamentales (RD)
 - Interconecta cabeceras departamentales.
 - Unen cabeceras departamentales entre sí.
 - Une cabeceras municipales con rutas centroamericanas o rutas nacionales u otras departamentales.

- Derecho de vía: 20.00 m. (10,00 m. de cada lado de la línea central).
- Caminos rurales (CR)
 - Interconectan a las comunidades rurales de los correspondientes municipios.

Otra forma de clasificación de las rutas de la infraestructura vial en Guatemala, es la que se utiliza con fines específicos de realizar una mejor planificación y orientación de las inversiones aplicadas a las carreteras. Dicha clasificación es primaria, secundaria y terciaria.

- Red vial primaria

Tiene como propósito facilitar y fortalecer la comunicación directa a nivel macro y regional entre las regiones, políticas continuas establecidas según Decreto No. 70-86 (Ley Preliminar de Regionalización e Internacionalidad), al comunicar de y hacia los principales puertos marítimos y puestos fronterizos con los países vecinos, constituye la red básica de carreteras troncales o colaterales. Actualmente, la red vial primaria está conformada por las Rutas Centroamericanas (CA), tramos específicos de Rutas Nacionales (RN) y Rutas Departamentales (RD), así como la Franja Transversal del Norte (FTN).

- Red vial secundaria

Su objetivo es completar la red vial primaria, facilitar la comunicación regional, así como proveer de una comunicación directa en lo posible entre las cabeceras de departamentos contiguos, orientadas a comunicar hacia y desde

los mayores centros de población y producción; conformado una red complementaria o alterna a la red vial primaria. La constituyen la Ruta CA-9 Sur "A", en sus tramos: Palín – Escuintla y Escuintla – Puerto San José, rutas nacionales y rutas departamentales.

- Red vial terciaria

Su propósito es el completar la red vial primaria y secundaria, proporciona comunicación en la medida de lo posible entre las cabeceras departamentales con sus respectivos municipios y aldeas. Está orientada a permitir el ingreso y egreso de insumos, productos y servicios desde los centros de consumo o producción. La mayor parte la constituyen caminos de terracería o balastro y caminos rurales.

2.3. Estado de las carreteras

Las estructuras de pavimento se proyectan y construyen para que estén en servicio durante el horizonte de proyecto o vida útil definido de la obra. Su función principal es proporcionar al usuario seguridad, confort y eficiencia a un costo mínimo razonable.

Al estar en operación, una obra se deteriora progresivamente debido a las acciones del tránsito y medio ambiente, presenta diferentes condiciones de servicio a través de los años. Al principio los deterioros pueden ser pequeños, pero conforme pase el tiempo, serán más graves y acelerarán la falla del pavimento. Por ello, una obra requiere mantenimiento o conservación para, por lo menos, asegurar su vida de proyecto y proporcionar un servicio adecuado. Si esto no fuera así representaría pérdida de patrimonio vial, asignación de

recursos cuantiosos y pérdida de competitividad que pone en riesgo el desarrollo sustentable y sostenible de un país.

Para evaluar el grado de deterioro de un pavimento se tiene que determinar el tipo de falla que este presenta y puede ser funcional o estructural.

La falla funcional es aquella que presentan los caminos cuando las deformaciones superficiales son mayores a las tolerables, de acuerdo con el tipo de camino que se trate, ya que, se puede tener una superficie de rodamiento con deformaciones aceptables para caminos secundarios pero que pueden considerarse inconvenientes para autopistas. Presentándose algunos de los siguientes deterioros: ondulaciones longitudinales, deformaciones transversales, textura de la superficie, baches y áreas reparadas, entre otros.

La identificación de una falla funcional se podrá realizar, en ciertos casos, de manera rápida de forma visual, mediante personal que cuente con una amplia experiencia en la materia que definirá el valor del índice de servicio, así como el tipo y causa de los deterioros.

Por su parte, la falla estructural es una deficiencia del pavimento que ocasiona, de inmediato o posteriormente, una reducción en la capacidad de carga de este. Implica una destrucción de alguna o algunas capas del pavimento que puede generarse debido a que el tránsito que circula por el pavimento es mayor al calculado en proyecto.

En otras ocasiones, puede presentarse prematuramente debido, principalmente, a espesores reducidos, materiales de mala calidad que, combinados con un mal drenaje y una baja compactación, lo podemos encontrar en grietas en la carpeta en forma de piel de cocodrilo,

desprendimiento del pétreo, asentamientos de gran amplitud, calavereo, entre otros.

Para conocer si un camino presenta una falla estructural no bastará con realizar una inspección visual, como en el caso de la falla funcional. Será necesario realizar un reconocimiento completo de la zona fallada mediante estudios y sondeos, recopilación de información referente a la construcción y conservación del camino, entre otros, a fin de identificar el origen de los deterioros y proponer trabajos de conservación o rehabilitación que prolonguen su vida. Es así que, en función de los registros anuales de los índices de servicio, se elaborará una curva en donde se muestre aproximadamente el tiempo en que la vía llegará a su falla estructural y se obtendrá un punto en donde la estructura requerirá una reconstrucción total.

2.3.1. Componentes estructurales del pavimento

Un pavimento está compuesto por un conjunto de capas superpuestas. A continuación, se muestran los elementos que componen la estructura del pavimento flexible:

- Subrasante

Es la capa de terreno que soporta la estructura del pavimento y que se prolonga hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe cumplir con los requisitos de resistencia, secciones transversales y pendientes especificadas según norma.

- Subbase

Es la capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la carpeta de rodadura del pavimento. También trabaja como una capa de drenaje y controla la ascensión capilar de agua, protege la estructura del pavimento, por lo que generalmente se utilizan materiales granulares.

- Base

La capa de base se encuentra ubicada en la parte inferior de la carpeta de rodadura. Esta recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. Está conformada por una mezcla de piedra y grava combinada con material de relleno, en algunos casos con asfalto espumado, pavimento asfáltico recuperado (RAP), cemento o aglomerantes. A estas últimas se les conocer como base estabilizada o base negra.

- Carpeta de rodadura

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico o una mezcla homogénea de materiales pétreos, polvo mineral, cemento asfáltico, aditivos y en este caso RAP, conocido como pavimento flexible.

Las funciones de la carpeta de rodadura son:

- Impermeabilizar el pavimento para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.

- Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en condiciones de pista húmeda.
- Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce, sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

2.3.2. Factores que afectan el comportamiento del pavimento

El pavimento flexible, como todo material, se va desgastando con el paso del tiempo, lo cual se ve reflejado en el deterioro de las carreteras de nuestro país. Por tanto, se deben realizar mantenimientos regulares a la red vial. Si no se realiza este tipo de mantenimiento preventivo o correctivo, en el pavimento se producen daños que comprometerán la estructura del mismo, ocasionando molestias a los usuarios que transitan en estas vías.

Estos daños pueden ser: fisuras, deformaciones, pérdida parcial de capas estructurales, daños superficiales. Los factores que pueden ocasionar estos daños son:

- Factor carga

La acumulación de esfuerzos de tracción provoca fatiga y deformaciones permanentes sobre el pavimento lo cual afecta la capacidad estructural del pavimento.

- Factor temperatura

Los cambios bruscos de temperatura en algunas partes del territorio nacional pueden afectar la integridad estructural del pavimento, debido a que los cambios de temperatura originan grietas térmicas cuando el asfalto se contrae o se expande.

- Factor humedad

La humedad provoca en el pavimento pérdida de resistencia y desprendimiento de sus agregados, siendo un factor influyente para la generación de baches en las carretas a nivel nacional.

2.3.3. Periodo de diseño

Todas las carreteras tienen un tiempo de vida útil así han sido diseñadas y después de este tiempo será necesario realizar trabajos de rehabilitación para devolverle un adecuado nivel de transitabilidad. El pavimento debe ser diseñado para soportar el efecto acumulativo del tránsito durante un periodo establecido. Se puede definir el periodo de diseño como un tiempo en el cual el pavimento construido deberá proveer un adecuado nivel de servicio que asegure la accesibilidad, movilidad y seguridad del usuario.

2.4. Tipos de fallas

Existen diferentes tipos de fallas en el concreto asfáltico que dependen del tipo y magnitud de la carga aplicada, así como del uso y calidad de los materiales empleados en la construcción de una carretera.

El mantenimiento oportuno de la superficie de rodadura pretende conservarla en buen estado, de tal manera que preste el servicio para el cual fue diseñada de una manera eficiente.

2.4.1. Fisura piel de cocodrilo

Serie de fisuras interconectadas que forman pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanzan su valor máximo y se propagan a la superficie.

Este tipo de fisuras ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. Si la base y la subbase son débiles, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos.

Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera instancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache.

2.4.2. Fisuras en bloque

Las fisuras en bloque son un conjunto de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0,10 a 9,0 m². La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

Su causa es principalmente la contracción volumétrica de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. También suelen ocurrir en pavimentos bituminosos colocados sobre bases granulares estabilizadas o mejoradas con cemento Portland, que se producen a raíz de la contracción eventual de la capa de base estabilizada, y esta se refleja en la superficie del pavimento. A veces es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura o en la base y subbase. La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción. También se debe a cambios de volumen del agregado fino de las mezclas asfálticas con un liante de penetración baja.

Las fisuras en bloque se miden en metros cuadrados de superficie dañada o afectada. Normalmente ocurren a un nivel de severidad en una sección del pavimento, pero cuando se observa diferentes niveles de severidad, se miden y registran separadamente. En caso que no se puedan diferenciar, la totalidad del área se califica con la mayor severidad observada.

2.4.3. Fisuras en arco

Son fisuras en forma de luna en cuarto creciente que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito. Por ejemplo, cuando se frena un vehículo en una cuesta, las líneas estarán en sentido contrario.

Son producidas cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento. Esto ocurre generalmente cuando se combinan una mezcla asfáltica

de baja estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento.

La falta de riego de liga, un exceso de ligante o la presencia de polvo durante la ejecución de los riegos, son factores que con frecuencia conducen a tales fallas. Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos. La causa también puede ser un contenido alto de arena en la mezcla, sea arena de río o finos triturados.

2.4.4. Fisura transversal

Fractura de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente de 90° con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril o limitarse a los 0,60 m próximos al borde del pavimento.

2.4.5. Fisura longitudinal

Fractura que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera. Puede localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable.

2.4.6. Fisura por reflexión de junta

Se presentan en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica, sobre un pavimento de concreto rígido. Consiste en la propagación

ascendente hacia la superficie asfáltica de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

Son causadas principalmente por el movimiento de las losas de concreto, como resultado de cambios de temperaturas o cambios en los contenidos de humedad.

Las grietas por reflexión se propagan dentro de la capa asfáltica, como consecuencia directa de una concentración de tensiones; asimismo, si por la aplicación de las cargas de tránsito las losas experimentan deflexiones verticales importantes en las juntas, la reflexión se produce con mayor rapidez. El tránsito puede producir la rotura de la capa asfáltica en la proximidad de las fisuras reflejadas, resultando en peladuras y eventualmente baches.

2.5. Tipos de baches

Desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares. Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento y fundación, o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo cuero de cocodrilo, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, es decir, se ha cumplido el tiempo de vida útil.

Existen tres niveles de severidad: bajo (B), mediano (M) y alto (A) en función del área afectada y de la profundidad del bache, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla I. **Niveles de severidad de los baches**

PROFUNDIDAD MÁXIMA (cm)	DIÁMETRO PROMEDIO DEL BACHE (cm)		
	MENOR A 70	DE 70 A 100	MAYOR A 100
Menor de 2.5	B	B	M
De 2.5 a 5.0	B	M	A
Mayor de 5.0	M	M	A

Fuente: Secretaría de Integración Económica Centroamericana. Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras. Tomo III b

Los baches pueden afectar únicamente la carpeta asfáltica, pero también la estructura principal del pavimento (base y subbase), por lo que el tratamiento varía según el caso.

3. PROCESOS DE RECICLADO

3.1. Generalidades

El RAP puede obtenerse de varias fuentes. El método más común es a través del proceso de fresado. Otras fuentes de comunes de recolección de RAP pueden ser el levantamiento total de la carpeta de rodadura y el desperdicio de mezcla en la planta de producción. Con relación al desperdicio de la mezcla, todas las operaciones en una planta de asfaltos generan algunos residuos de material durante la puesta en marcha, la transición entre las mezclas y limpieza en general, este material también puede utilizarse como fuente de RAP. Otra fuente de RAP que, de no ser utilizada de esta manera sería tomada como material de desperdicio para botaderos, son los camiones cargados con demasiada mezcla para terminar el trabajo o la mezcla que no puede colocarse en tiempo (debido a inclemencias del clima). Este material también puede utilizarse como fuente de RAP.

3.2. Control de producción del RAP

Es necesario aplicar buenas prácticas para la recuperación de pavimento asfáltico envejecido, por lo cual deben considerarse los siguientes procesos en la producción de pavimento asfáltico recuperado.

3.2.1. Selección de la profundidad de fresado

La selección de la profundidad de fresado es una decisión de la unidad de planificación de la entidad que va a realizar la rehabilitación de un pavimento.

La profundidad de fresado deberá debe de basarse en un examen visual de los núcleos para determinar la profundidad de las grietas en la superficie y la ubicación de capas o interfaces débiles. La eliminación de estas capas ayuda a lograr un rendimiento a largo plazo de la superposición de la carpeta asfáltica. Los núcleos deben tomarse al menos una vez cada 400 metros en el carril de carreteras, y uno por carril por bloque en las calles dentro de la ciudad. También es importante comprobar la sección transversal de las capas de pavimentos a través de los carriles, ya que los caminos a menudo se han ensanchado con el paso del tiempo.

El proceso de fresado también se utiliza para mejorar el perfil de la calzada o bien la pendiente transversal, según sea la necesidad. Debe tenerse en cuenta que la profundidad de fresado puede variar en un mismo tramo carretero. Se hace mención de esta consideración ya que el espesor variable puede afectar la integridad estructural del pavimento restante, así como la uniformidad del material molido.

Figura 6. **Recolección de material por medio del proceso de fresado**



Fuente: Padegua

3.3. Almacenamiento

En la mayoría de los casos el RAP procesado se mueve desde la ubicación en la que se tamiza o tritura a otra ubicación más conveniente, para alimentar a la planta de asfalto. Esta es una oportunidad para mezclar el material y mejorar su consistencia.

Para este movimiento se recomienda utilizar un cargador frontal, para cavar en la reserva de RAP, en el lugar en donde está siendo triturado, moverlo en diferentes direcciones alrededor de la pila y remezclar las cargas mientras se moviliza a la ubicación final. A continuación, se dan algunas recomendaciones de cómo deben ser los lugares adecuados para el almacenamiento de RAP.

- El almacenamiento para minimizar la segregación

El lugar de almacenamiento debe proveer las condiciones para que el material no sufra de segregación; al igual que los áridos vírgenes existe una potencia para los materiales de RAP, que sufran de segregación.

Este problema surge cuando el material no tiene movimiento. Al estar en reposo por tiempos prolongados provoca que las partículas de RAP más grandes, por tener mayor energía cinética, tienden a rodar hacia abajo, hacia la parte inferior de la reserva, quedando las partículas finas de RAP en la parte superior de la misma. Este problema puede ser minimizado al contar con un área de trabajo lo suficientemente grande y con acceso para un cargador frontal que pueda remezclar la reserva de RAP.

A continuación, se muestra un ejemplo de almacenamiento para minimizar la segregación.

Figura 7. **Almacenamiento para minimizar la segregación**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

- El almacenamiento para minimizar la humedad

El contenido de humedad de los agregados y RAP es un factor principal que afecta la tasa de producción y costes de una planta de asfaltos. Esto porque el material debe secarse antes de entrar a las tolvas mezcladoras. La mejor práctica para minimizar la acumulación de humedad en cualquier reserva es cubrir el material con un refugio o estructura para evitar la precipitación. Otra buena práctica es colocar el material sobre una superficie pavimentada y con pendiente para ayudar a drenar el agua. Del mismo modo, las reservas de rap deben limitarse a una altura máxima de 30 pies para reducir el potencial de auto consolidación de la reserva.

A continuación, se muestra un ejemplo de almacenamiento cubierto.

Figura 8. **Almacenamiento cubierto para minimizar la humedad**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

3.4. Proceso de trituración

El proceso de trituración debe ser examinado cuidadosamente y de cerca para asegurarse que el material molido no está contaminado con tierra, material de base, geotextiles u otros residuos.

Los materiales triturados contaminados solo deben de utilizarse como material de hombro y deberán de ser almacenados por separado del RAP que será utilizado en la mezcla de asfáltica.

Por último, la superficie fresada debe ser inspeccionada para verificar que tenga una textura uniforme. Una textura no uniforme ocasionada por puntas desgastadas o rotas en el tambor de fresado puede causar problemas con la

compactación de capas finas. También pueden causar una superficie insegura para motocicletas, si la superficie está abierta al tráfico.

A continuación, se muestra una planta trituradora utilizada en el reciclado de asfalto.

Figura 9. **Planta trituradora Proequipos S.A.**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

3.4.1. Tratamiento primario del material

Para garantizar la calidad del RAP es necesario llevar un control del material que ingresa a planta, su procedencia y ubicación.

3.4.1.1. Origen del pavimento asfáltico recuperado

El pavimento asfáltico recuperado puede obtenerse de varias formas, pero la más común es a través del proceso de fresado de pavimento. La superficie fresada debe ser inspeccionada constantemente para verificar la profundidad

del fresado, para evitar que el material sea contaminado con material de base u otros residuos. De igual manera, durante el transporte del material hacia una planta de procesamiento de RAP, se deben tomar las precauciones necesarias para que no sea contaminado.

Otras fuentes de recolección de pavimento asfáltico recuperado son: la demolición de capas específicas de asfalto y los residuos de mezcla asfáltica en una planta de asfalto. Todas las plantas de asfalto generan algunos residuos de material durante las operaciones de puesta en marcha, la transición entre los distintos tipos de mezcla asfáltica y limpieza en general. Este material también puede ser reutilizado en nuevas mezclas asfálticas

En la siguiente figura se puede observar los distintos tipos de material que ingresan a una planta recicladora de pavimento.

Figura 10. **Distintos tipos de material en planta**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

3.4.1.2. Clasificación

En la planta de tratamiento, al llegar el material debe ser separado para una inspección visual y así evitar la contaminación del material previamente almacenado. Esta inspección y clasificación se realiza con el fin de conocer la calidad del material, ya que como se mencionó, el proceso de fresado se realiza en varios puntos de la ciudad de Guatemala, por lo cual es necesario conocer el tipo de pavimento reciclado ingresado a los bancos de material, tal como se muestra en las siguientes imágenes.

Figura 11. **Clasificación de material en planta**



Fuente: Laboratorio Proequipos S.A.

3.4.1.3. Limpieza

Siguiendo con el tratamiento primario, se realiza una limpieza general del RAP, se retira todo el material que esté contaminado con tierra, material de base, geotextiles, concreto hidráulico, material orgánico y cualquier otro material

que no pertenezca al asfalto recuperado. Todo material que no cumpla con estos requisitos debe ser retirado y trasladado hacia un botadero de desperdicio. A continuación, se muestran imágenes de asfalto recuperado contaminado.

Figura 12. **Material contaminado con concreto hidráulico y materia orgánica**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

Figura 13. **Material contaminado con materia orgánica**



Fuente: Laboratorio de Proequipos S.A.

3.4.2. Tratamiento secundario del RAP

Después de ser evaluado y clasificado, el material debe ser triturado y homogenizado para integrarse a una nueva mezcla asfáltica.

3.4.2.1. Control durante la producción

Como se ha mencionado, el asfalto recuperado puede provenir de múltiples fuentes y composiciones, por lo cual es indispensable una correcta homogenización de todo el material antes de entrar al proceso de trituración. Como resultado de este proceso resulta un material uniforme, adecuado para su uso en una nueva mezcla asfáltica.

La humedad y temperatura son otros factores que pueden afectar el proceso de trituración del RAP. Cuando está muy húmedo y la temperatura ambiente es muy elevada, el RAP será más pegajoso, tiende a acumularse en los alimentadores cargador frontal (*payloader*), minicargador (*uniloader*) y máquinas trituradoras. También se adhiere a las bandas transportadoras y obstruye las mallas de la trituradora por donde pasa el material procesado, el cual debe de ser retirado de forma manual. Esto afecta directamente la calidad del material, por la cantidad de asfalto envejecido presente en el material recuperado y también afecta el contenido de la gradación, otro inconveniente que presenta es con el mantenimiento de las unidades de alimentación y procesamiento del RAP, ya que debido a esto se deben de revisar las máquinas con regularidad para verificar que no exista ningún tipo de anomalía durante el proceso.

A continuación, se muestra el proceso de homogenización del RAP triturado.

Figura 14. **Proceso de homogenización del material triturado con cargador frontal**



Fuente: Laboratorio de Proequipos

Figura 15. **Proceso de homogenización del material triturado con minicargador**



Fuente: Laboratorio de Proequipos

3.4.2.2. Limpieza del material triturado

Se debe realizar limpieza manual del RAP durante el proceso de trituración, para la eliminación de cualquier material que no pertenezca al asfalto recuperado.

Figura 16. Limpieza manual del material triturado



Fuente: Proequipos S.A.

Figura 17. Limpieza del material en la banda transportadora



Fuente: Laboratorio Proequipos

3.4.3. Tratamiento terciario

Terminado el proceso, el material triturado debe de cumplir con los estándares de calidad establecidos por la normativa guatemalteca.

3.4.3.1. Control de calidad del RAP

Se realiza un control del material triturado para verificar su calidad y que cumpla con los requerimientos indicados en las Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos, para poder ser integrado a una nueva mezcla asfáltica.

3.4.3.1.1. Toma de muestra

Se recomienda realizar un muestreo por cada 1 000 toneladas de producción en la planta trituradora. Para el muestreo se recomienda homogenizar el material triturado con un cargador frontal.

Figura 18. **Toma de muestra de RAP**



Fuente: Laboratorio de Proequipos

3.4.3.1.2. Porcentaje de AC envejecido

Para conocer el porcentaje de asfalto presente en el RAP se procede a realizar el ensayo de extracción de asfalto ASTM D 2172, con un extractor centrífugo y utilizando como solvente gasolina. Con la debida precaución se extrae el material bituminoso del RAP, como se muestra a continuación en las imágenes.

Figura 19. **Extractor centrífugo**



Fuente: Laboratorio Proequipos.

3.4.3.1.3. Granulometría

Se realiza el análisis granulométrico con el objeto de determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de la muestra de material reciclado, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente descendiente.

Este método se utiliza como control de calidad en el RAP para verificar que cumpla con los requerimientos indicados en las Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos, para poder ser integrado en el esqueleto estructural de una mezcla asfáltica.

En la siguiente imagen se muestra el material tamizado.

Figura 20. **Muestra de RAP con asfalto extraído y tamizado**



Fuente: Laboratorio Proequipos.

4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

4.1. Caracterización física de los materiales

Previo a la realización del diseño de la mezcla asfáltica, es necesario conocer las características de cada uno de los agregados a utilizar, para lo cual se realizan los siguientes ensayos.

4.1.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos (ASTM C 136, AASHTO T-27)

Este método se utiliza principalmente para determinar la distribución de las partículas de los agregados que serán utilizados en la mezcla asfáltica. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables al territorio nacional.

La determinación exacta del material de tamiz μm 75 (No. 200) no se puede lograr mediante este ensayo. El método que se debe emplear para este ensayo está dado por la norma ASTM C-117 determinación de la cantidad de material fino que pasa por el tamiz de 75 μm (No. 200).

4.1.2. Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos (ASTM D 2419 – AASHTO T 196)

Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la posible presencia de finos arcillosos presentes en la muestra de agregado fino que

pueden afectar negativamente la mezcla asfáltica.

También es un método de ensayo utilizado en campo, que permite determinar rápidamente la variación de calidad de los agregados durante su proceso de producción o colocación en la mezcla asfáltica.

4.1.3. Límite plástico e índice de plasticidad en los suelos (ASTM D 4318 – AASHTO T 90)

El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia de estado líquido al estado plástico.

El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua determinado por este procedimiento, con el cual el suelo permanece en estado plástico.

4.1.4. Ensayo de abrasión máquina de Los Ángeles (ASTM C 131, ASTM C535 Y AASHTO T96)

Este ensayo se realiza para conocer la resistencia al desgaste de los agregados pétreos o triturados empleando el ensayo de abrasión por medio de la máquina de Los Ángeles. Este método se refiere al procedimiento que debe seguirse para realizar el ensayo de desgaste de los agregados menores a

37,5 mm (1½”) y los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de Los Ángeles.

4.1.5. Desintegración al sulfato de sodio ASTM C88, AASHTO T 104

Mediante este método se pretende obtener información acerca de la calidad de los agregados, los cuales estarán expuestos a agentes atmosféricos antes de ser utilizados en la mezcla asfáltica. Se simula con esta prueba la acción de los agentes atmosféricos en los materiales.

La norma indica el procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio según sea el caso. Seguidamente, el material debe ser secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables. La fuerza de expansión interna derivada de la rehidratación de la sal después de su reinmersión, simula la expansión del agua por congelamiento.

4.1.6. Gravedades específicas y absorción de los agregados (ASTM C 127- C 128 – ASSHTO T 84 – T85)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas *bulk*, *bulk* saturada y superficialmente seca, así como la absorción después que los agregados con tamaño igual o mayor a 4,75 mm (tamiz No. 4) han estado sumergidos en agua durante 24 horas. Este método de ensayo no se debe aplicar a los agregados pétreos livianos.

4.2. Caracterización física del pavimento asfáltico recuperado (RAP)

Al igual que con los agregados vírgenes, previo al diseño de una mezcla asfáltica, también es necesario conocer las características físicas del pavimento asfáltico recuperado, por lo cual se realizan ensayos para conocer la calidad del RAP que será incorporado a la mezcla. Para la caracterización del RAP no existen especificaciones por lo que se intenta acoplar el RAP a las especificaciones de material virgen.

4.2.1. Análisis granulométrico de los agregados de los agregados gruesos y finos (ASTM C 136, AASHTO T-27)

Se emplea este método para conocer la distribución de las partículas del pavimento asfáltico recuperado que será reutilizado en una nueva mezcla asfáltica, con la diferencia de que antes de la prueba de análisis granulométrico es necesario realizar el ensayo de extracción de asfalto (ASTM D 2172), para que el análisis granulométrico sea solamente de los agregados sin ningún porcentaje de asfalto.

4.2.2. Ensayo de extracción de asfalto (ASTM D 2172)

Este método se utiliza para determinar el porcentaje de materia bituminosa contenido en el pavimento asfáltico recuperado, para conocer el porcentaje de asfalto que aportará el RAP a la nueva mezcla asfáltica.

Para realizar esta prueba se emplea un extractor centrífugo y como solvente, gasolina. Los agregados obtenidos mediante este método se pueden utilizar para la prueba de análisis granulométrico del RAP.

**4.2.3. Ensayo de equivalente de arenas y agregados finos
(ASTM D 2419- AASHTO T 196)**

Este ensayo se utiliza para conocer la posible presencia de finos arcillosos en el pavimento asfáltico recuperado que tengan un tamaño menor a 4,75 mm (tamiz No. 4), lo cual podría afectar negativamente la mezcla asfáltica.

**4.2.4. Gravedades específicas y absorción de los agregados
(ASTM C 127- C 128 – ASSHTO T 84 – T85)**

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas *bulk*, *bulk* saturada y superficialmente seca. Para los agregados finos y gruesos se realiza la prueba con el RAP para conocer su gravedad específica, así como la absorción del RAP con tamaño igual o mayor a 4,75 mm (tamiz No. 4) y que deben haber estado sumergidos en agua durante 24 horas.

**4.2.5. Ensayo de abrasión máquina de los Ángeles (ASTM C
131, ASTM C535 y AASHTO T96)**

Este ensayo se realiza para conocer la resistencia al desgaste del RAP. Se emplea el ensayo de abrasión por medio de la máquina de Los Ángeles. Este método se refiere al procedimiento que debe seguirse para realizar el ensayo de desgaste de los agregados menores a 37,5 mm (1½") y los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾"), por medio de la máquina de Los Ángeles.

4.3. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto muestra patrón

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto se utilizó el método Marshall, debido a que se encuentra dentro de las Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.

El método es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contenga agregados con un método máximo de 25 milímetros (1 pulgada) o menor. El método utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 milímetros aproximadamente de alto y 102 milímetros de diámetro. Se prepara mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto agregado (ASTM D1559) (AASHTO T-245).

Los aspectos principales del método Marshall son:

- La densidad - análisis de vacíos.
- Estabilidad - flujo de los especímenes compactados.

4.3.1. Granulometría

La graduación de los agregados es un factor importante que influye en la deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente. Para el siguiente diseño se procede a conocer el tamaño máximo nominal de cada uno de los agregados en estado seco (libre de humedad) por medio de una serie de tamices y de esta forma determinar su escala granulométrica. En la siguiente tabla se muestra el tamaño máximo nominal de cada tipo de mezcla y la

abertura de los tamices requeridos para los porcentajes pasantes, para un diseño de una mezcla tipo E (12,5 mm) 1/2 de pulgada.

Tabla II. **Graduación granulométrica según el tipo de mezcla**

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras de la Dirección General de Caminos.

4.3.2. Método Marshall

Para el diseño de mezcla asfáltica se utiliza el método Marshall debido a que se encuentra dentro de las *especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, 2001*, sección 401.

Para conocer el contenido de asfalto que debe agregarse a la mezcla asfáltica, es necesario saber el porcentaje en peso que aportan los agregados y sumado al cemento asfalto AC-20, constituirán la mezcla asfáltica.

Tabla III. **Porcentajes teóricos de contenido asfáltico**

Punto	% AC	% Agregado	% Total de la mezcla
1	5,0	95,0	100
2	5,5	94,5	100
3	6,0	94,0	100
4	6,5	93,5	100
5	7,0	93,0	100

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la tabla III se procede a calcular el peso del cemento asfáltico a utilizar en cada punto del diseño.

Tabla IV. **Dosificación de materiales**

Porcentaje de AC-20 a utilizar	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,50 %	7,0 %
Peso de cemento asfáltico a utilizar	64,53	70,95	77,43	83,84	90,32
Peso de los agregados	1226,00	1219,00	1213,00	1206,00	1200,00
Peso total de la mezcla	1290,53	1289,95	1290,43	1289,84	1290,32

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.1. Elaboración de mezcla asfáltica

De acuerdo con las dosificaciones de agregados y cemento asfáltico a utilizar, se procede a la elaboración de la mezcla asfáltica. Los agregados y cemento asfáltico deben estar en un horno a una temperatura de 340° Fahrenheit para poder ser mezclados. Se procede a realizar tres briquetas por punto siendo mezcladas a una temperatura de 320° Fahrenheit.

Con los agregados y el cemento asfáltico debidamente mezclados se procede a compactarlos en moldes normados. Son compactados con 75 golpes de cada lado según *especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección general de Caminos*. Se procede a realizar la compactación a una temperatura de 285 a 315° Fahrenheit.

4.3.3. Porcentaje de vacíos

Parte importante del diseño de la mezcla es la determinación de la gravedad específica de la muestra asfáltica compactada, ya que es un indicador del porcentaje de vacíos de la mezcla. Los vacíos son un parámetro importante en el diseño de la mezcla asfáltica, el cual se logra establecer por medio del método Marshall. Este determina el porcentaje de contenido asfáltico presente en la mezcla y el contenido de material mineral.

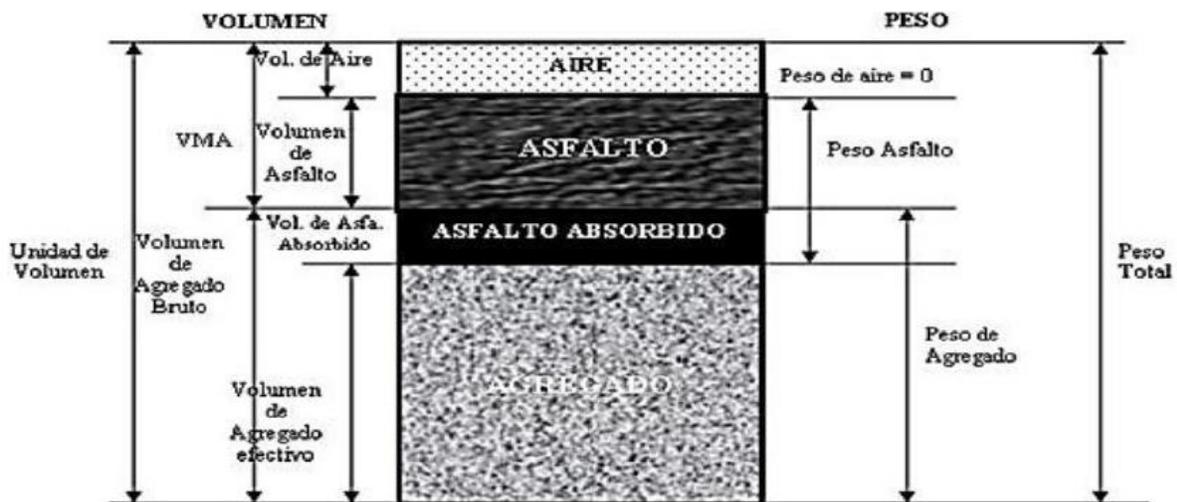
Los vacíos del agregado mineral VAM son definidos como espacios vacíos granulares internos entre las partículas de agregado en una mezcla pavimentada compactada que incluye vacíos de aire y contenido de asfalto expresado como un porcentaje del volumen total. Cuanto mayor sea el VAM más espacio disponible habrá para las películas de asfalto. Si la película de

asfalto que cubre las partículas del agregado es más gruesa, la mezcla será más durable.

Los vacíos de relleno asfáltico VRA indican el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado VAM que se encuentran llenas de asfalto.

El VAM abarca asfalto y aire; por lo tanto, el VRA se calcula al restar los vacíos de aire VA que son pequeñas bolsas de aire que se localizan entre las partículas de agregado revestidas de asfalto y los vacíos de agregado mineral VAM el resultado de esta resta. Se divide nuevamente por los vacíos de agregado mineral VAM y el resultado se expresa como porcentaje.

Figura 21. **Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica**



Fuente: *Strategic Highway Research Program SHRP. A – 369 – 1994.*

4.3.4. Resumen de resultados muestra patrón

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de las briquetas Marshall.

Tabla V. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 1							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
5,0 %	1	1 280,00	759	1 286,00	527	527,50	2,4265	2,4216891
	2	1 278,00	758	1 285,00	527	527,50	2,4227	
	3	1 284,00	759	1 290,00	531	531,50	2,4158	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 2							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
5,5 %	1	1 282,00	761	1 285,00	524	524,50	2,4442	2,4442
	2	1 280,00	760	1 283,00	523	523,50	2,4451	
	3	1 284,00	761	1 286,00	525	525,50	2,4434	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 3							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
6,0 %	1	1 288,00	771	1 290,00	519	519,49	2,4793	2,4755
	2	1 286,00	769	1 289,00	520	520,49	2,4707	
	3	1 284,00	767	1 285,00	518	518,49	2,4764	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 4							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
6,5 %	1	1 283,00	770	1 284,00	514	514,49	2,4937	2,4980
	2	1 281,00	771	1 282,00	511	511,49	2,5045	
	3	1 284,00	771	1 285,00	514	514,49	2,4957	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 5							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
7,0 %	1	1 280,00	766	1 281,00	515	515,49	2,4831	2,4928
	2	1 278,00	768	1 279,00	511	511,49	2,4986	
	3	1 277,00	767	1 278,00	511	511,49	2,4966	

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos se procede a calcular los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos de agregado, mineral VAM y los vacíos de relleno asfáltico VRA.

Tabla X. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % AC**

Punto 1						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,0 %	1	2,4265	2,6446	8,25	16,72	50,68
	2	2,4227		8,39	16,85	50,21
	3	2,4158		8,65	17,09	49,37
	Promedio	2,4217		2,6446	8,43	16,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % AC**

Punto 2						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,5 %	1	2,4442	2,6296	7,05	16,55	57,42
	2	2,4451		7,02	16,52	57,54
	3	2,4434		7,08	16,58	57,30
	Promedio	2,4442		2,6296	7,05	16,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC**

Punto 3						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,0 %	1	2,4793	2,5870	4,16	15,80	73,67
	2	2,4707		4,49	16,10	72,08
	3	2,4764		4,27	15,90	73,12
	Promedio	2,4755		2,5870	4,31	15,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC**

Punto 4						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,5 %	1	2,4937	2,5624	2,68	15,76	83,00
	2	2,5045		2,26	15,40	85,32
	3	2,4957		2,60	15,70	83,41
	Promedio	2,4980		2,5624	2,51	15,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC**

Punto 5						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
7,0 %	1	2,4831	2,5476	2,53	16,57	84,72
	2	2,4986		1,92	16,05	88,02
	3	2,4966		2,00	16,12	87,59
	Promedio	2,4928		2,5476	2,15	16,25

Fuente: elaboración propia.

Del promedio de cada uno de los cuadros anteriores serán para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, por medio del método gráfico.

A continuación, se muestran los resultados de estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall.

Tabla XV. **Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC**

Punto 1			5,0% de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	527,50	0,96	420	10	3 024	302
2	527,50	0,96	430	10	3 096	310
3	531,50	0,96	430	9	3 096	344
Promedio				9,7	3 072	318,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC**

Punto 2			5,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	524,50	0,96	415	12	2 988	260
2	523,50	0,96	430	11	3 096	281
3	525,50	0,96	425	11	3 060	278
Promedio				11	3 048	273

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC

Punto 3			6,0% de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	519,49	1	410	13	3 075	246
2	520,49	1	415	13	3 113	239
3	518,49	1	400	12	3 001	250
Promedio				13	3 063	245

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC

Punto 4			6,5% de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	514,49	1	370	14	2 776	206
2	511,49	1	385	14	2 888	206
3	514,49	1	380	14	2 851	204
Promedio				14	2 839	205

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC

Punto 5			7,0% de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	515,49	1	360	15	2 702	180
2	511,49	1	350	14	2 627	188
3	511,49	1	350	15	2 627	175
Promedio				15	2 652	181

Fuente: elaboración propia.

4.3.5. Conclusiones de resultados muestra patrón

Se muestran los resultados de del método de diseño Marshall para una mezcla con material virgen.

4.3.5.1. Resumen de resultados

Seguidamente, se muestra la tabla de resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica con material virgen.

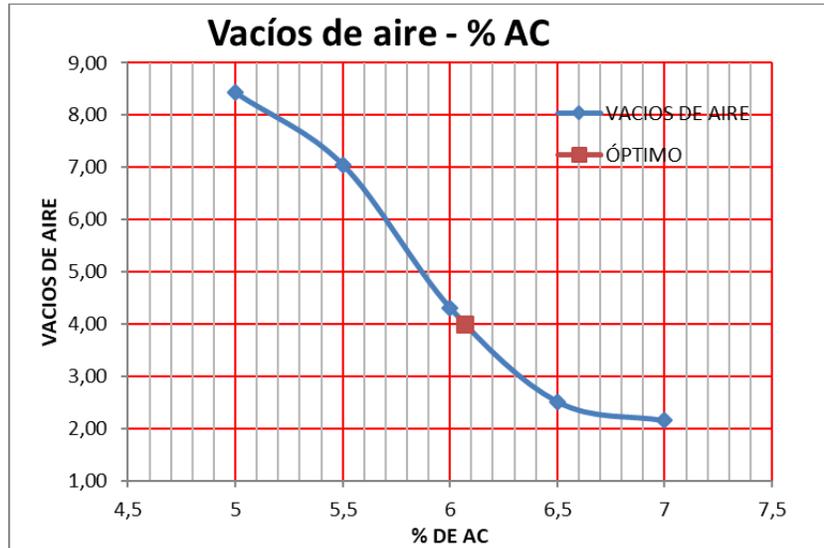
Tabla XX. **Tabla de resultados**

	% AC	GMB	RICE	VA	VAM	VRA	FLOW	Estabilidad	Relación	R- P/A
Óptimo	6,07	2,4794	2,5828	4	15,86	74,1	12,7	3028	240	1,49
Punto 1	5	2,4216891	2,6446	8,43	16,89	50,09	10	3072	319	1,90
Punto 2	5,5	2,4442439	2,6296	7,05	16,55	57,42	11	3048	273	1,69
Punto 3	6	2,4754939	2,587	4,31	15,93	72,95	13	3063	245	1,51
Punto 4	6,5	2,4979645	2,5624	2,51	15,62	83,91	14	2839	205	1,37
Punto 5	7	2,4927775	2,5476	2,15	16,25	86,78	15	2652	181	1,26

Fuente: elaboración propia.

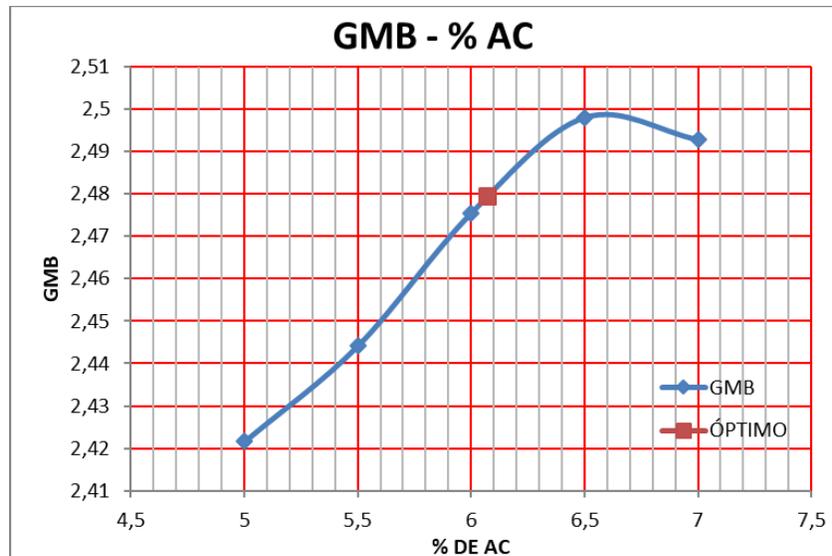
A continuación, se muestran las gráficas utilizadas para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, así como el comportamiento que presenta cada una de acuerdo al porcentaje de asfalto de cada briqueta ensayada.

Figura 22. Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC



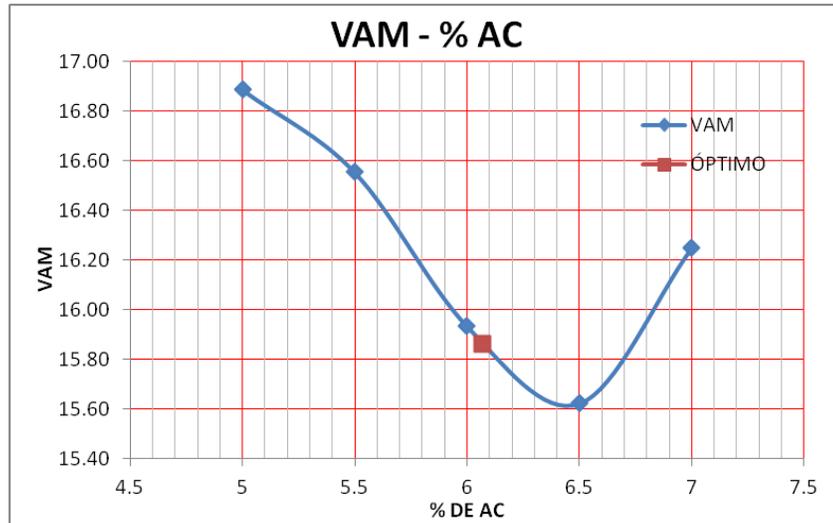
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. GMB Vrs porcentaje de AC



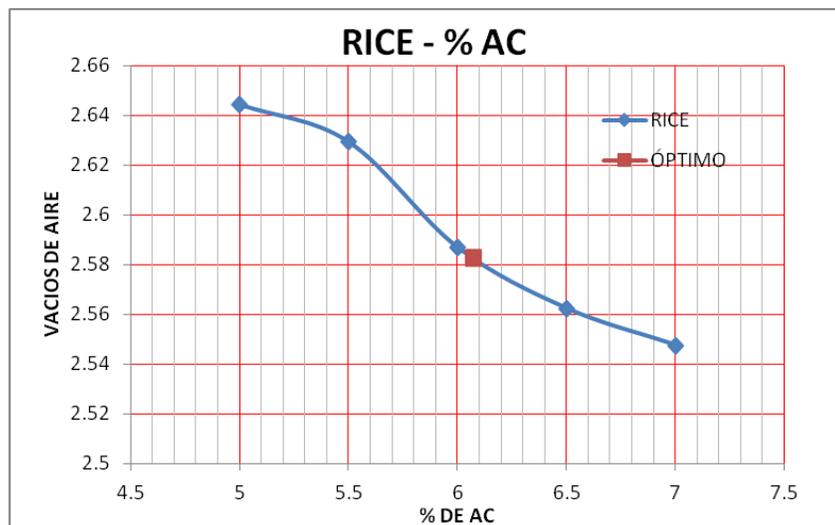
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC



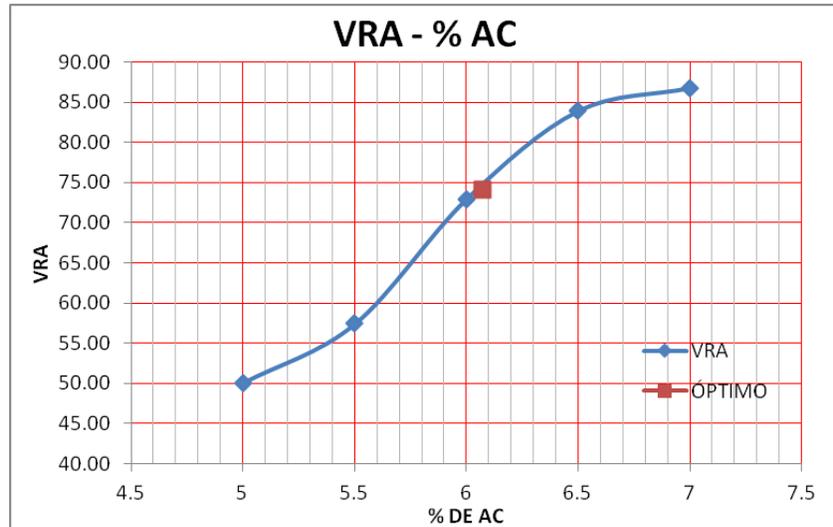
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. RICE Vrs porcentaje de AC



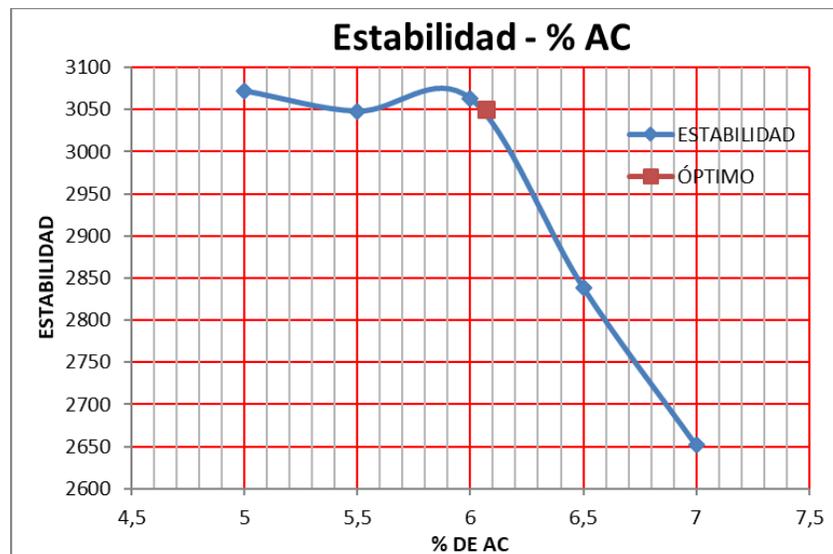
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Vacíos rellenos de asfáltico Vrs porcentaje de AC



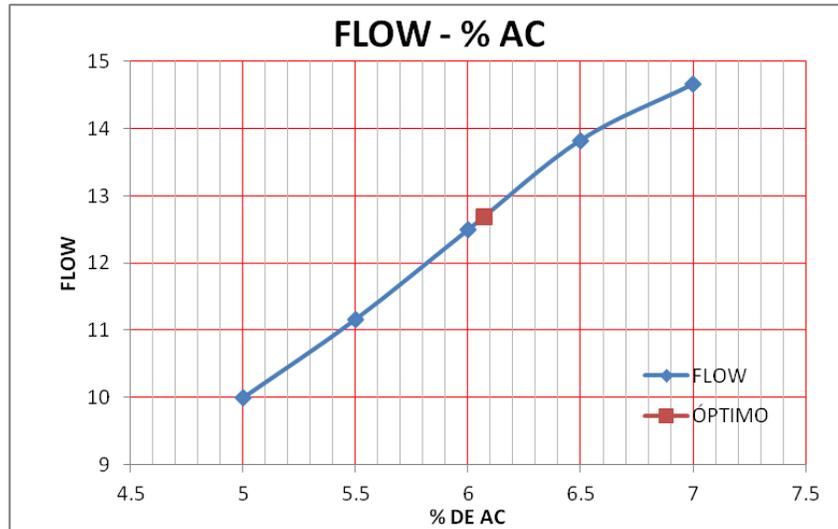
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Estabilidad Vrs porcentaje de AC



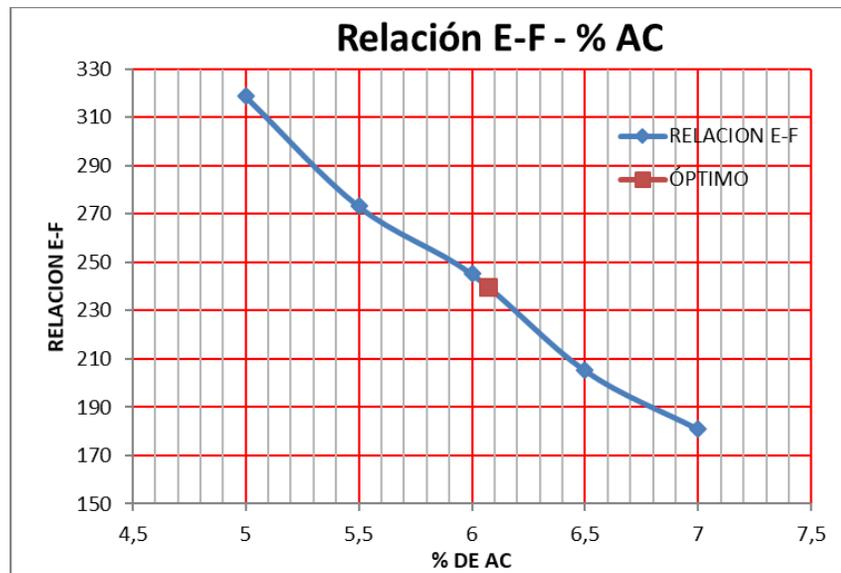
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Fluencia Vrs porcentaje de AC**



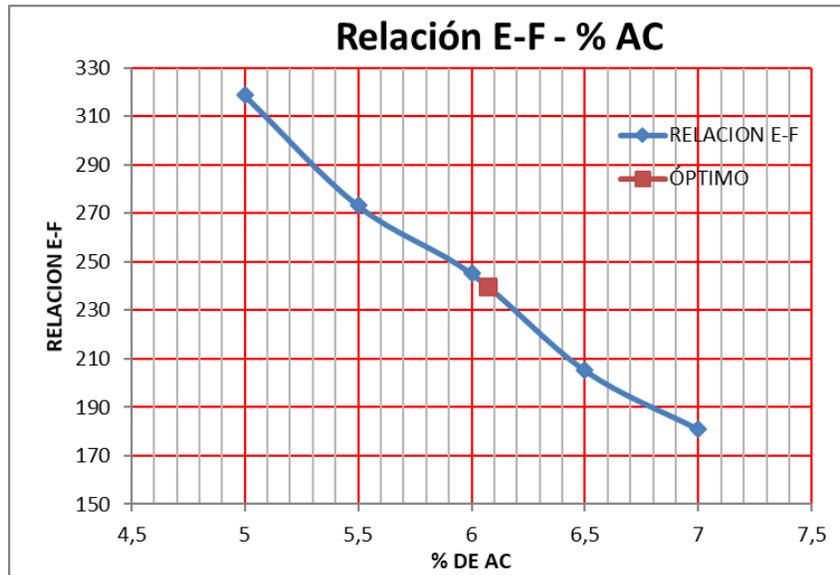
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Relación estabilidad/fluencia Vrs porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC



Fuente: elaboración propia.

4.3.5.2. Análisis de resultados

Tomando como base los vacíos de aire, se logra identificar por medio del método gráfico los porcentajes óptimos requeridos por el método Marshall de una mezcla tipo “E”, con material virgen. El resultado es un porcentaje óptimo de asfalto de 6,07 % de AC, relación estabilidad fluencia de 240,0 y 2,5828 de gravedad específica teórica RICE. Estos resultados los tomaremos como un punto de comparación contra los diseños con material virgen y porcentaje de RAP incluido en el diseño.

4.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 10 % RAP

Por medio del método Marshall, se determina el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla con material recuperado.

4.4.1. Método Marshall para briquetas con 10 % de RAP

En seguimiento al estudio comparativo se realizan pruebas con 10 % de RAP del porcentaje total de material virgen, con los parámetros indicados por el método Marshall, utilizados en la muestra patrón.

4.4.2. Resumen de resultados ensayos 10 % RAP

A continuación, se muestran los resultados de gravedad específica de cada una de las briquetas ensayadas.

Tabla XXI. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 1							
	Temperatura		22 °C		Factor de corrección		1,000728	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
5,0 %	1	1 275,00	757	1 282,00	525	525,38	2,4268	2,4260157
	2	1 280,00	758	1 287,00	529	529,39	2,4179	
	3	1 276,00	758	1 282,00	524	524,38	2,4333	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 2							
	Temperatura		22 °C		Factor de corrección		1,000728	
	BRIQUETA	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
5,5%	1	1 274,00	755	1 276,00	521	521,38	2,4435	2,4405
	2	1 276,00	756	1 279,00	523	523,38	2,4380	
	3	1 277,00	757	1 280,00	523	523,38	2,4399	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 3							
	Temperatura		22 °C		Factor de corrección		1,000728	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
6,0%	1	1 273,00	759	1 277,00	518	518,38	2,4557	2,4573
	2	1 274,00	760	1 278,00	518	518,38	2,4577	
	3	1 267,00	755	1 270,00	515	515,37	2,4584	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 4							
	Temperatura		22 °C		Factor de corrección		1,000728	
	BRIQUETA	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
6,5%	1	1 272,00	759	1 273,00	514	514,37	2,4729	2,4755
	2	1 271,00	759	1 272,00	513	513,37	2,4758	
	3	1 272,00	760	1 273,00	513	513,37	2,4777	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC**

Punto 5								
% AC - 20	Temperatura		22 °C		Factor de corrección		1,000728	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen Corregido	Gmb	Promedio
7,0%	1	1 269,00	760	1 270,00	510	510,37	2,4864	2,4810
	2	1 273,00	761	1 274,00	513	513,37	2,4797	
	3	1 274,00	761	1 275,00	514	514,37	2,4768	

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos se procede a calcular los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos de agregado, mineral VAM y los vacíos de relleno asfáltico VRA.

Tabla XXVI. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % de AC**

Punto 1						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,0%	1	2,4268	2,6495	8,41	16,16	48,00
	2	2,4179		8,74	16,47	46,93
	3	2,4333		8,16	15,94	48,82
	Promedio	2,4260	2,6495	8,43	16,19	47,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC**

Punto 2						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,5 %	1	2,4435	2,6283	7,03	16,03	56,15
	2	2,4380		7,24	16,22	55,36
	3	2,4399		7,17	16,16	55,63
	Promedio	2,4405	2,6283	7,15	16,14	55,71

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC**

Punto 3						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,0 %	1	2,4557	2,5996	5,53	16,06	65,54
	2	2,4577		5,46	15,99	65,86
	3	2,4584		5,43	15,97	65,98
	Promedio	2,4573	2,5996	5,47	16,01	65,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC**

Punto 4						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,5 %	1	2,4729	2,5755	3,98	15,92	74,98
	2	2,4758		3,87	15,82	75,53
	3	2,4777		3,80	15,76	75,91
	Promedio	2,4755	2,5755	3,88	15,83	75,47

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC**

Punto 5						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
7,0 %	1	2,4864	2,5467	2,37	15,91	85,13
	2	2,4797		2,63	16,14	83,70
	3	2,4768		2,74	16,24	83,10
	Promedio	2,4810	2,5467	2,58	16,10	83,97

Fuente: elaboración propia.

Los promedios de cada uno de los cuadros anteriores serán para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, por medio del método gráfico.

A continuación, se muestran los resultados de estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall.

Tabla XXXI. **Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC**

Punto 1			5,0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	525,38	0,96	415	10	2 988	299
2	529,39	0,96	420	10	3 024	302
3	524,38	0,96	425	11	3 060	278
Promedio				10,3	3 024	293,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC

Punto 2			5,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	521,38	0,96	420	12	3 024	263
2	523,38	0,96	400	11	2 881	262
3	523,38	0,96	400	12	2 881	240
Promedio				12	2 928	255

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC

Punto 3			6,0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	518,38	1	370	12	2 776	231
2	518,38	1	405	13	3 038	234
3	515,37	1	395	13	2 963	228
Promedio				13	2 926	231

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC

Punto 4			6,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	514,37	1	390	13	2 926	225
2	513,37	1	350	13	2 627	202
3	513,37	1	385	14	2 888	206
Promedio				13	2 814	211

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC

Punto 5			7,0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	510,37	1	370	14	2 776	198
2	513,37	1	380	15	2 851	190
3	514,37	1	350	15	2 627	175
Promedio				15	2 751	188

Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Conclusiones de muestra con 10 % de RAP

Se muestran los resultados de del método de diseño Marshall para una mezcla con 10 % de material recuperado.

4.4.3.1. Resumen de resultados con 10 % de RAP

Seguidamente, se muestra la tabla de resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica con 10 % de RAP.

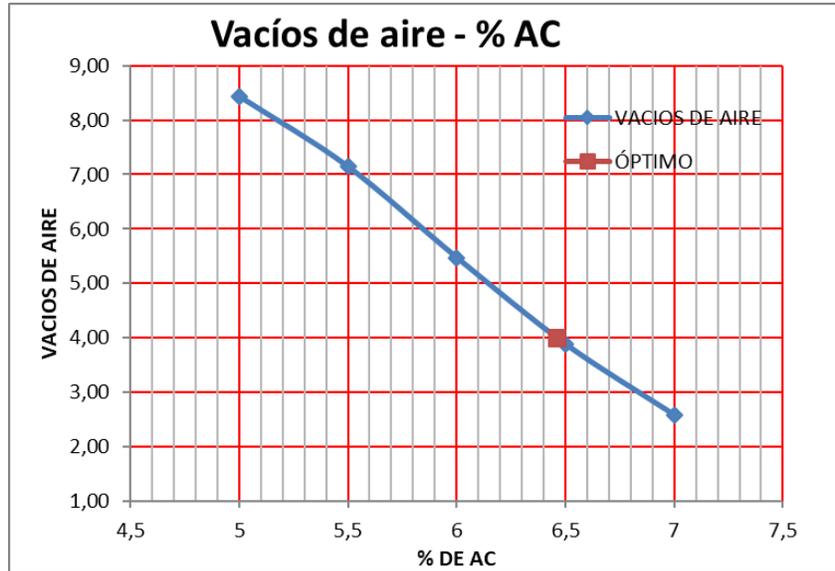
Tabla XXXVI. Tabla de resultados

	% AC	GMB	RICE	VA	VAM	VRA	FLOW	Estabilidad	Relación	R- P/A
Óptimo	6,46	2,4741	2,5772	4	15,83	74,6	13,3	2822	212,5	1,12
Punto 1	5	2,4260157	2,6495	8,43	16,19	47,92	10	3024	293	1,54
Punto 2	5,5	2,4404736	2,6283	7,15	16,14	55,71	12	2928	255	1,36
Punto 3	6	2,457272	2,5996	5,47	16,01	65,79	13	2926	231	1,22
Punto 4	6,5	2,4754722	2,5755	3,88	15,83	75,47	13	2814	211	1,11
Punto 5	7	2,4809659	2,5467	2,58	16,10	83,97	15	2751	188	1,02

Fuente: elaboración propia.

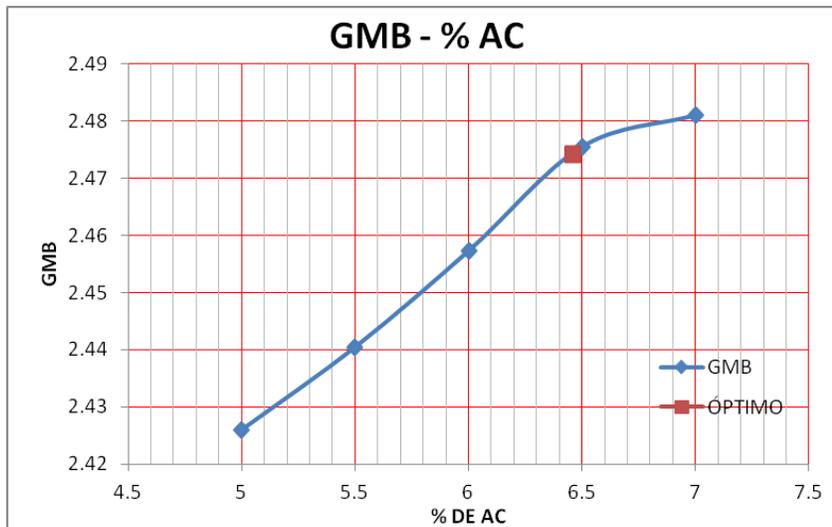
A continuación, se muestran las gráficas utilizadas para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, así como el comportamiento que presenta cada una de acuerdo al porcentaje de asfalto de cada briqueta ensayada.

Figura 31. Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC



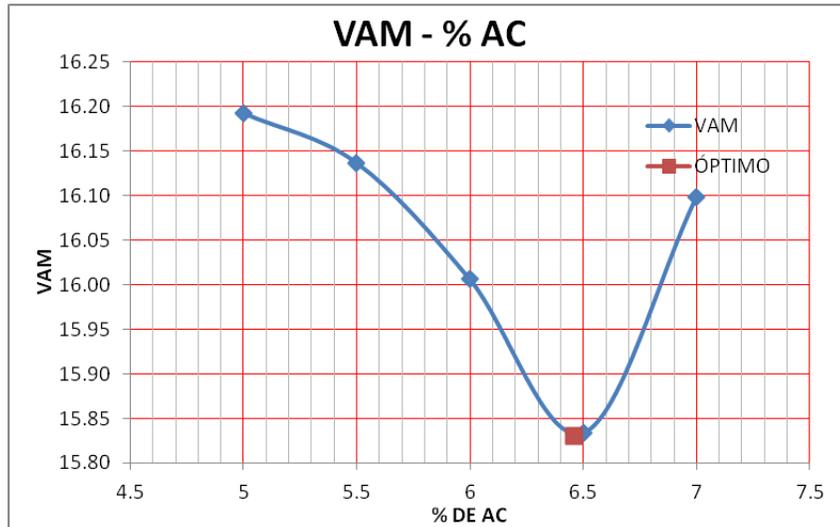
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. GMB Vrs porcentaje de AC



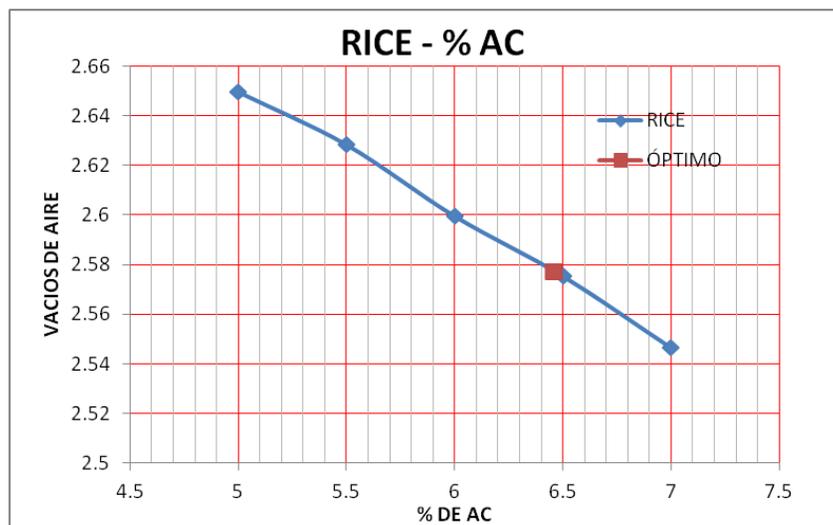
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC



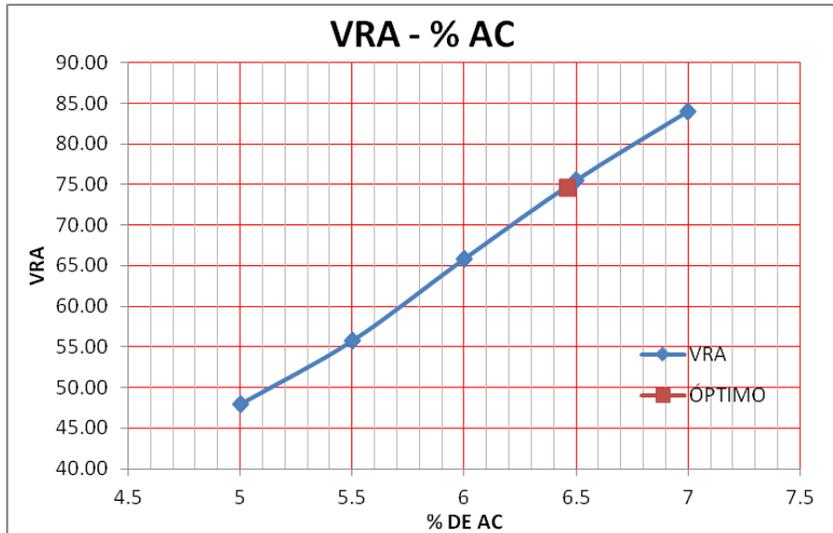
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Rice Vrs porcentaje de AC



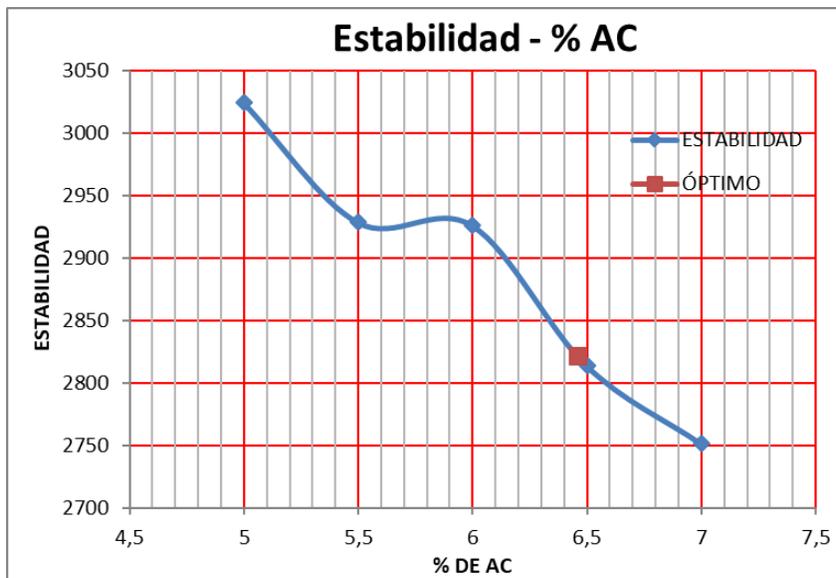
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **VRA Vrs porcentaje de AC**



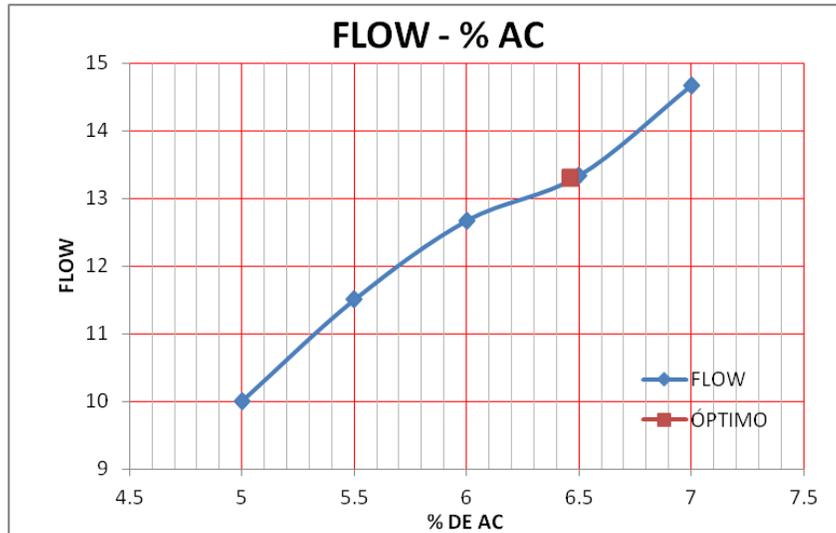
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Estabilidad Vrs porcentaje de AC**



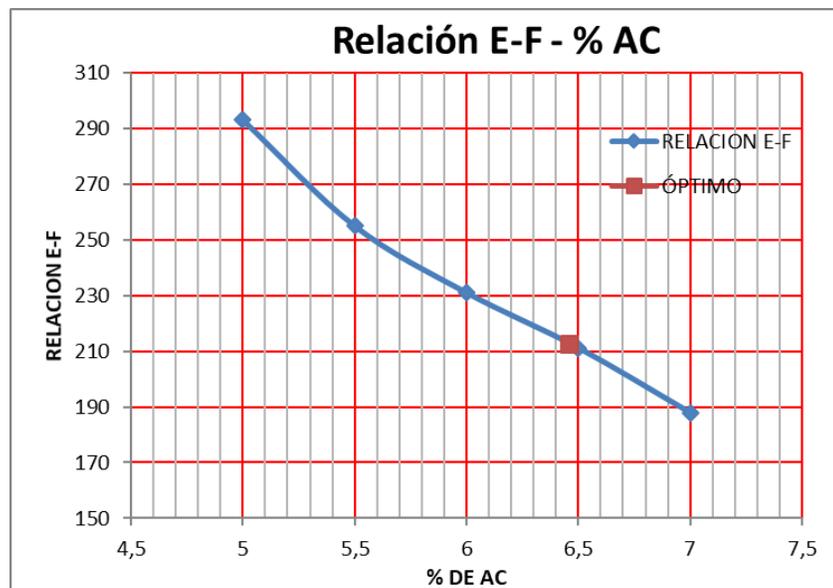
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **FLOW Vrs porcentaje de AC**



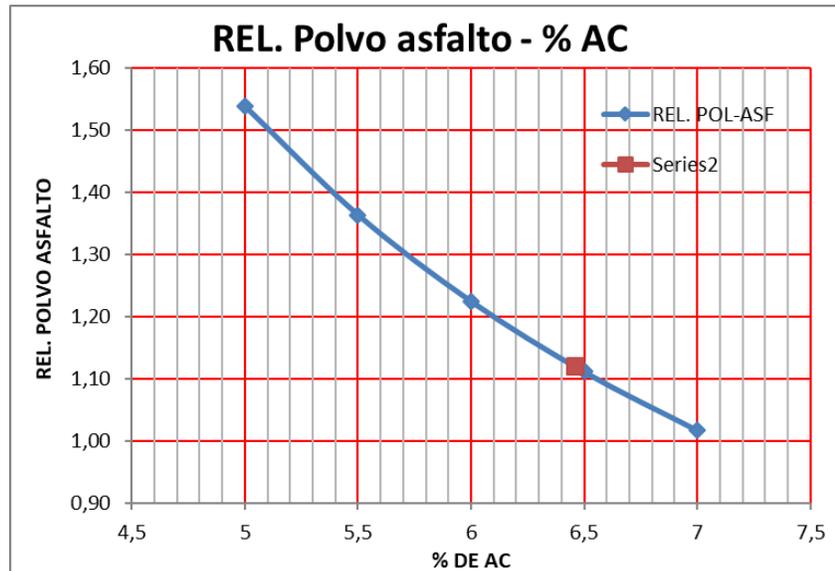
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC



Fuente: elaboración propia.

4.4.3.2. Análisis de resultados

Tomando como base los vacíos de aire, se logran identificar por medio del método gráfico los porcentajes óptimos requeridos por el método Marshall de una mezcla tipo "E", con material virgen y mezcla asfáltica recuperada en un 10 %. El resultado es un porcentaje óptimo de asfalto de 6,46 % de AC, relación estabilidad fluencia de 212,5 y 2,5772 de gravedad específica teórica RICE. Estos resultados serán comparados junto a los otros ensayos de diseños con material recuperado para conocer el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica al agregarle RAP.

4.5. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 20 % RAP

Por medio del método Marshall, se determina el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla con material recuperado.

4.5.1. Método Marshall para briquetas con 20 % de RAP

En seguimiento al estudio comparativo se realizan pruebas con 20 % de RAP del porcentaje total de material virgen, con los parámetros indicados por el método Marshall, utilizados en la muestra patrón.

4.5.2. Resumen de resultados ensayos 20 % RAP

A continuación, se muestran los resultados de gravedad específica de cada una de las briquetas ensayadas.

Tabla XXXVII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 1							
	Temperatura		21 °C		Factor de Corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
5,0 %	1	1 270,00	754	1 282,00	528	528,50	2,4030	2,4058003
	2	1 273,00	756	1 284,00	528	528,50	2,4087	
	3	1 269,00	755	1 282,00	527	527,50	2,4057	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII.

Tabla XXXIX. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 2							
	Temperatura		21 °C		Factor de Corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
5,5 %	1	1 272,00	753	1 278,00	525	525,50	2,4206	2,4234
	2	1 271,00	753	1 276,00	523	523,50	2,4279	
	3	1 275,00	755	1 281,00	526	526,50	2,4217	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 3							
	Temperatura		21 °C		Factor de Corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
6,0 %	1	1 275,00	756	1 279,00	523	523,50	2,4355	2,4374
	2	1 274,00	756	1 278,00	522	522,50	2,4383	
	3	1 274,00	756	1 278,00	522	522,50	2,4383	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 4							
	Temperatura		21 °C		Factor de Corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
6,5 %	1	1 279,00	760	1 280,00	520	520,49	2,4573	2,4613
	2	1 276,00	759	1 277,00	518	518,49	2,4610	
	3	1 276,00	760	1 277,00	517	517,49	2,4657	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC**

Punto 5								
% AC - 20	Temperatura		21 °C		Factor de Corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
7,0%	1	1 274,00	760	1 275,00	515	515,49	2,4714	2,4756
	2	1 276,00	762	1 277,00	515	515,49	2,4753	
	3	1 276,00	763	1 277,00	514	514,49	2,4801	

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos se procede a calcular los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos de agregado, mineral VAM y los vacíos de relleno asfáltico VRA.

Tabla XLIII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,0 % de AC**

Punto 1						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,0%	1	2,4030	2,6446	9,13	16,52	44,70
	2	2,4087		8,92	16,32	45,35
	3	2,4057		9,03	16,43	45,00
	Promedio	2,4058	2,6446	9,03	16,42	45,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC**

Punto 2						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,5 %	1	2,4206	2,6130	7,36	16,35	54,96
	2	2,4279		7,08	16,10	56,00
	3	2,4217		7,32	16,31	55,11
	Promedio	2,4234		7,26	16,26	55,36

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC**

Punto 3						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,0 %	1	2,4355	2,5847	5,77	16,28	64,55
	2	2,4383		5,66	16,19	65,00
	3	2,4383		5,66	16,19	65,00
	Promedio	2,4374		5,70	16,22	64,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC**

Punto 4						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,5 %	1	2,4573	2,5631	4,13	15,98	74,17
	2	2,4610		3,98	15,86	74,87
	3	2,4657		3,80	15,69	75,79
	Promedio	2,4613		3,97	15,84	74,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC**

Punto 5						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
7,0 %	1	2,4714	2,5366	2,57	15,95	83,89
	2	2,4753		2,42	15,82	84,73
	3	2,4801		2,23	15,65	85,78
	Promedio	2,4756	2,5366	2,40	15,81	84,80

Fuente: elaboración propia.

Los promedios de cada uno de los cuadros anteriores serán para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, por medio del método gráfico.

A continuación, se muestran los resultados de estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall.

Tabla XLVIII. **Estabilidad y fluencia con 5,0 % de AC**

Punto 1			5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	528,50	0,96	430	10	3 095,82	310
2	528,50	0,96	420	11	3 024,07	275
3	527,50	0,96	410	10	2 952,32	295
Promedio				10,3	3 024,07	293,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC

Punto 2			5.5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	525,50	0,96	360	11	2 593,59	236
2	523,50	0,96	415	12	2 988,20	249
3	526,50	0,96	370	12	2 665,34	222
Promedio				11,7	2 749,04	235,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC

Punto 3			6.0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	523,50	0,96	335	13	2 414,22	185,7095188
2	522,50	1	345	12	2 589,55	215,7960333
3	522,50	1	350	13	2 626,92	202,0708
Promedio				12,67	2 543,57	201,1921174

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC

Punto			6.5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	520,49	1	340	14	2 552,18	189
2	518,49	1	335	13	2 514,82	193
3	517,49	1	330	14	2 477,45	177
Promedio				13,5	2 514,82	186

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC**

Punto 5			7.0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	515,49	1	310	15	2 327,98	155
2	515,49	1	320	16	2 402,71	150
3	514,49	1	310	16	2 327,98	145
Promedio				15,7	2 352,89	150

Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Conclusiones de muestra con 20 % de RAP

Se muestran los resultados de del método de diseño Marshall para una mezcla con 20 % de material recuperado.

4.5.3.1. Resumen de resultados con 20 % de RAP

Seguidamente, se muestra la tabla de resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica con 20 % de RAP.

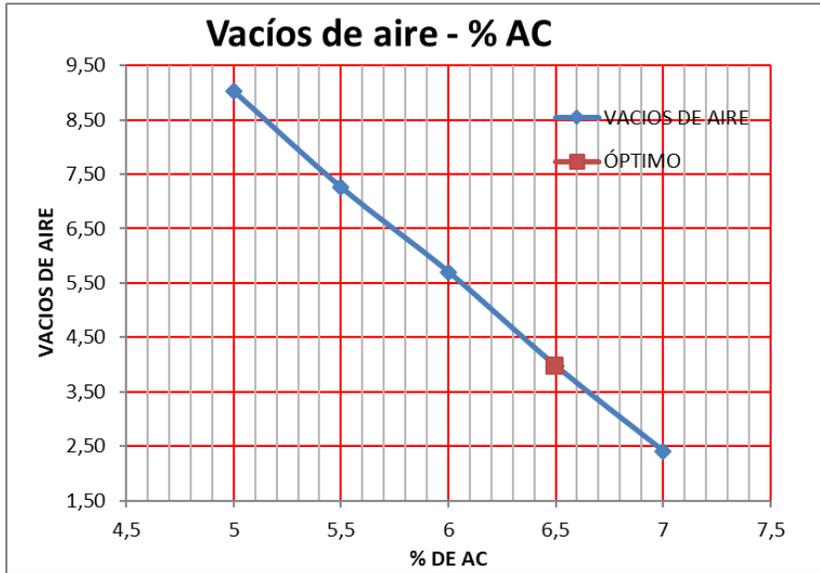
Tabla LIII. **Tabla de resultados**

	% AC	GMB	RICE	VA	VAM	VRA	FLOW	Estabilidad	Relación	R- P/A
Óptimo	6,49	2,4611	2,5636	4	15,84	74,76	13,5	2507	188	1,1
Punto 1	5	2,4058003	2,6446	9,03	16,42	45,02	10	3024	293	1,52
Punto 2	5,5	2,4233717	2,613	7,26	16,26	55,36	12	2749	236	1,35
Punto 3	6	2,4373793	2,5847	5,70	16,22	64,85	13	2544	201	1,21
Punto 4	6,5	2,4613354	2,5631	3,97	15,84	74,94	14	2515	186	1,10
Punto 5	7	2,4756303	2,5366	2,40	15,81	84,80	16	2353	150	1,01

Fuente: elaboración propia.

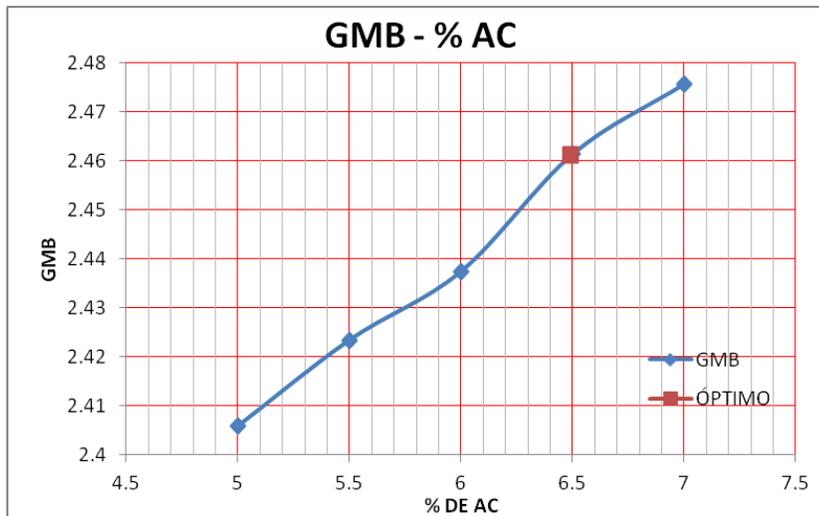
A continuación, se muestran las gráficas utilizadas para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto con 20 % de RAP, así como el comportamiento que presenta cada una de acuerdo al porcentaje de asfalto de cada briqueta ensayada.

Figura 40. Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC



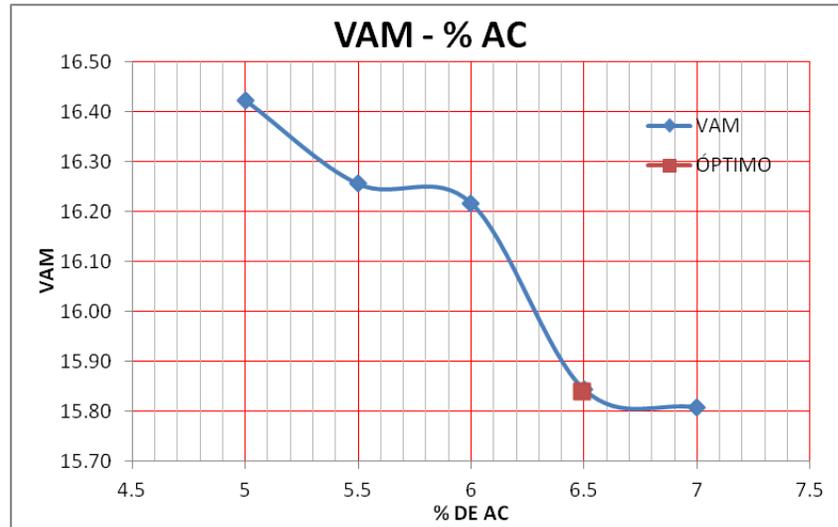
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. GMB Vrs porcentaje de AC



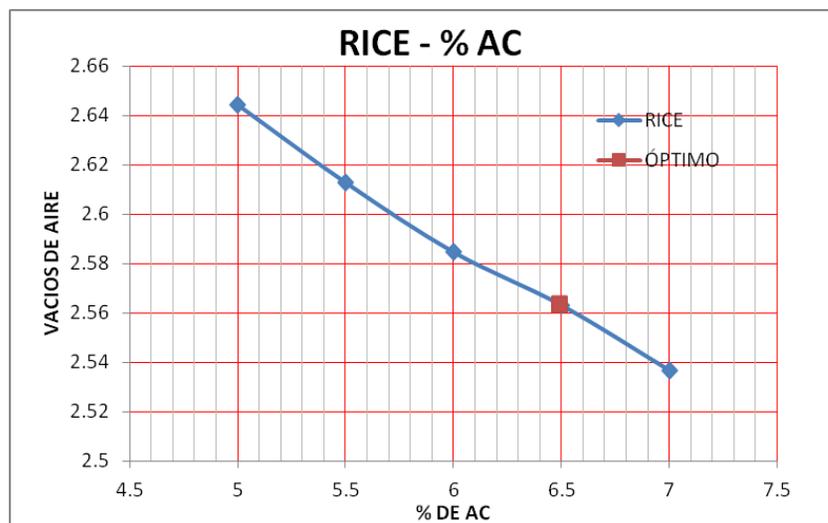
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC



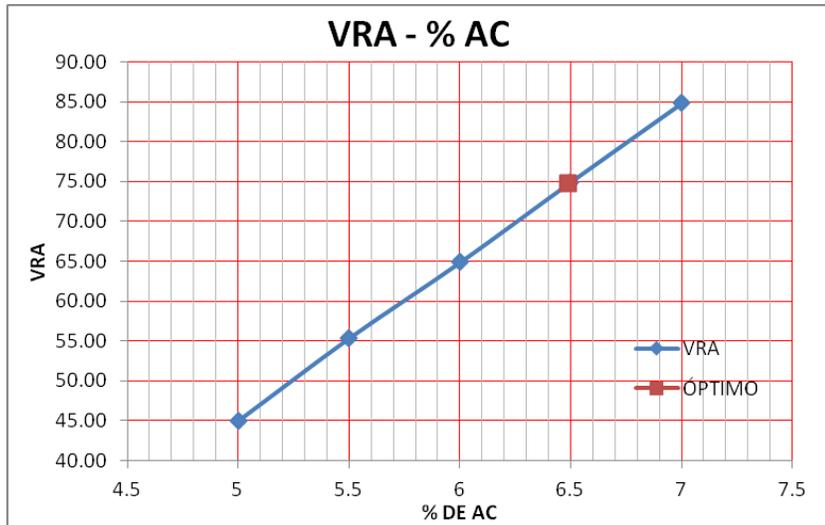
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Rice Vrs porcentaje de AC



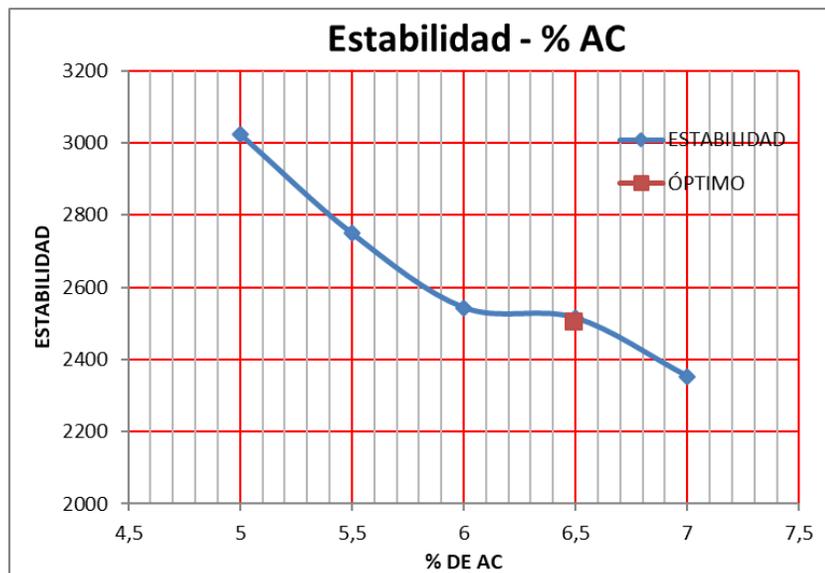
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. VRA Vrs porcentaje de AC



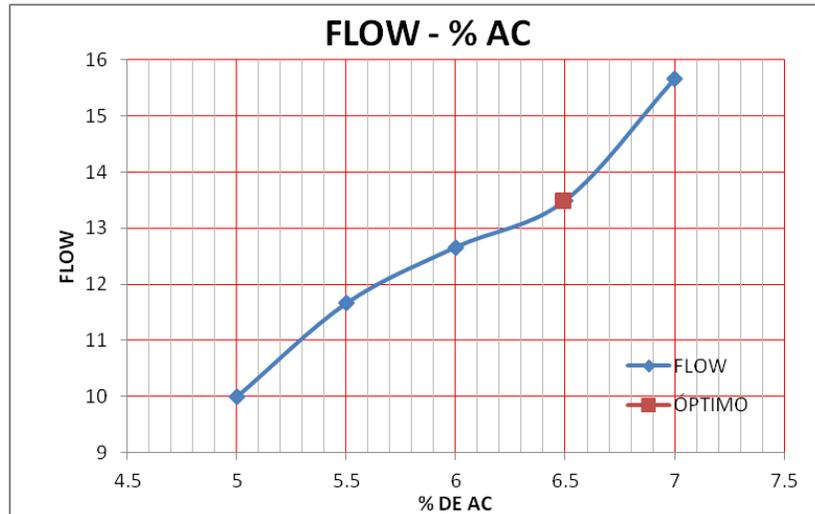
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Estabilidad Vrs porcentaje de AC



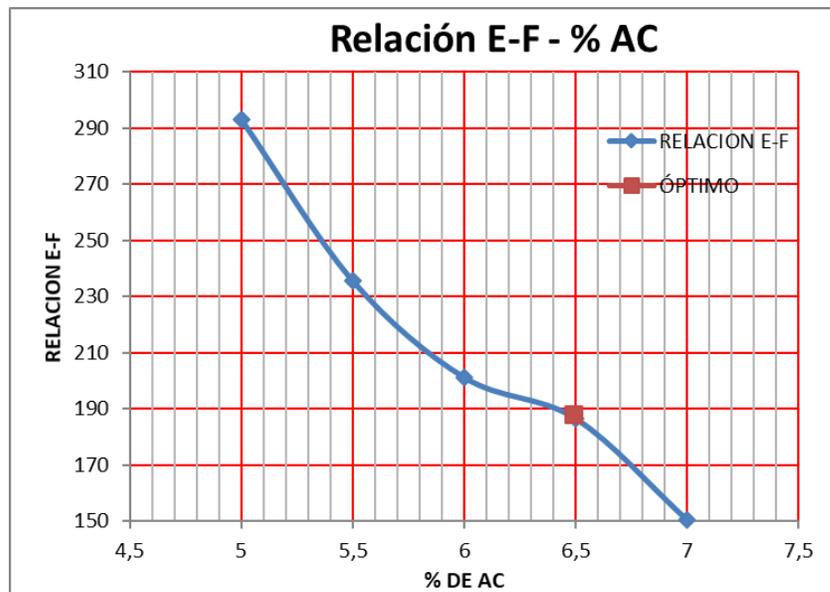
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **FLOW Vrs porcentaje de AC**



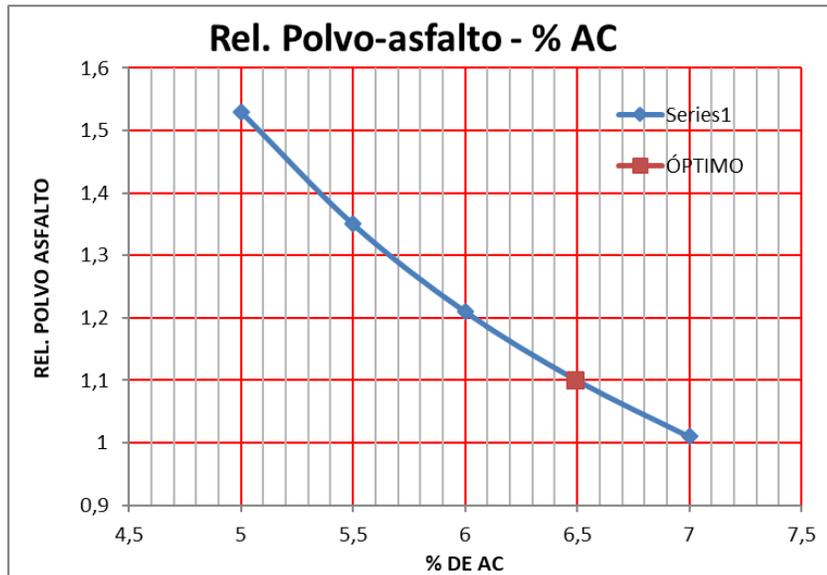
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC



Fuente: elaboración propia.

4.5.3.2. Análisis de resultados

Tomando como base los vacíos de aire, se logra identificar por medio del método gráfico los porcentajes óptimos requeridos por el método Marshall de una mezcla tipo “E”, con material virgen y mezcla asfáltica recuperada en un 20 %. El resultado es un porcentaje óptimo de asfalto de 6,49 % de AC, relación estabilidad fluencia de 188,0 y 2,5636 de gravedad específica teórica RICE. Estos resultados serán comparados junto a los otros ensayos de diseños con material recuperado para conocer el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica al agregarle RAP.

4.6. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto 30 % RAP

Por medio del método Marshall, se determina el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla con material recuperado.

4.6.1. Método Marshall para briquetas con 30 % de RAP

En seguimiento al estudio comparativo se realizan pruebas con 30 % de RAP del porcentaje total de material virgen, con los parámetros indicados por el método Marshall, utilizados en la muestra patrón.

4.6.2. Resumen de resultados ensayos 30 % de RAP

A continuación, se muestran los resultados de gravedad específica de cada una de las briquetas ensayadas.

Tabla LIV. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 5,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 1							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
5,5 %	1	1 267,00	746	1 274,00	528	528,50	2,3973	2,4034216
	2	1 269,00	750	1 277,00	527	527,50	2,4057	
	3	1 265,00	747	1 272,00	525	525,50	2,4072	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 2							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
6,0%	1	1 263,00	748	1 268,00	520	520,49	2,4265	2,4229
	2	1 265,00	746	1 269,00	523	523,50	2,4164	
	3	1 265,00	747	1 268,00	521	521,49	2,4257	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 6,5 % de AC**

% AC - 20	Punto 3							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
6,5%	1	1 262,00	748	1 264,00	516	516,49	2,4434	2,4489
	2	1 267,00	752	1 269,00	517	517,49	2,4484	
	3	1 263,00	750	1 264,00	514	514,49	2,4549	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,0 % de AC**

% AC - 20	Punto 4							
	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
7,0%	1	1 258,00	748	1 259,00	511	511,49	2,4595	2,4574
	2	1 264,00	752	1 265,00	513	513,49	2,4616	
	3	1 266,00	751	1 267,00	516	516,49	2,4512	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Gravedad específica de la mezcla compactada con 7,5 % de AC**

Punto 5								
% AC - 20	Temperatura		21 °C		Factor de corrección		1,000950	
	Briqueta	Peso seco	Peso agua	Peso Saturado	Volumen	Volumen corregido	Gmb	Promedio
7,5 %	1	1 267,00	754	1 268,00	514	514,49	2,4626	2,4611
	2	1 269,00	755	1 270,00	515	515,49	2,4617	
	3	1 270,00	755	1 271,00	516	516,49	2,4589	

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos se procede a calcular los vacíos de aire en la mezcla, los vacíos de agregado, mineral VAM y los vacíos de relleno asfáltico VRA.

Tabla LIX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 5,5 % de AC**

Punto 1						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
5,5 %	1	2,3973	2,6132	8,26	16,68	50,49
	2	2,4057		7,94	16,39	51,56
	3	2,4072		7,88	16,34	51,76
	Promedio	2,4034	2,6132	8,03	16,47	51,27

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,0 % de AC**

Punto 2						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,0 %	1	2,4265	2,5845	6,11	16,11	62,07
	2	2,4164		6,50	16,46	60,50
	3	2,4257		6,14	16,14	61,94
	Promedio	2,4229		6,25	16,24	61,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 6,5 % de AC**

Punto 3						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
6,5 %	1	2,4434	2,5513	4,23	15,98	73,54
	2	2,4484		4,04	15,81	74,48
	3	2,4549		3,78	15,59	75,75
	Promedio	2,4489		4,01	15,79	74,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,0 % de AC**

Punto 4						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
7,0 %	1	2,4595	2,5280	2,71	15,88	82,94
	2	2,4616		2,63	15,81	83,38
	3	2,4512		3,04	16,16	81,20
	Promedio	2,4574		2,79	15,95	82,51

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica con 7,5 % de AC**

Punto 5						
% AC - 20	Briqueta	Gmb	RICE	Vacíos de aire	VAM	VRA
7,5 %	1	2,4626	2,4970	1,38	16,22	91,52
	2	2,4617		1,41	16,26	91,31
	3	2,4589		1,53	16,35	90,67
	Promedio	2,4611	2,4970	1,44	16,28	91,17

Fuente: elaboración propia.

El promedio de cada uno de los cuadros anteriores será para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, por medio del método gráfico.

A continuación, se muestran los resultados de estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall

Tabla LXIV. **Estabilidad y fluencia con 5,5 % de AC**

Punto 1			5,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	528,50	0,96	420	10	3 024	302
2	527,50	0,96	430	10	3 096	310
3	525,50	0,96	430	9	3 096	344
Promedio				9,7	3 072	318,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. Estabilidad y fluencia con 6,0 % de AC

Punto 2			6,0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	520,49	0,96	430	11	3 096	281
2	523,50	0,96	440	11	3 168	288
3	521,49	0,96	400	13	2 881	222
Promedio				12	3 048	264

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVI. Estabilidad y fluencia con 6,5 % de AC

Punto 3			6,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	516,49	1	370	14	2 776	198
2	517,49	1	360	13	2 702	208
3	514,49	1	350	14	2 627	188
Promedio				14	2 702	198

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. Estabilidad y fluencia con 7,0 % de AC

Punto 4			7,0 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	511,49	1	360	15	2 702	180
2	513,49	1	320	16	2 403	150
3	516,49	1	310	14	2 328	166
Promedio				15	2 477	166

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. Estabilidad y fluencia con 7,5 % de AC

Punto 5			7,5 % de AC			
Briqueta	Volumen	Factor de corrección	Lectura de carga	FLOW	Estabilidad	Relación estabilidad fluencia
1	514,49	1	360	15	2 702	180
2	515,49	1	350	14	2 627	188
3	516,49	1	350	15	2 627	175
Promedio				15	2 652	181

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Conclusiones de muestra con 30 % de RAP

Se muestran los resultados de del método de diseño Marshall para una mezcla con 30 % de material recuperado.

4.6.3.1. Resumen de resultados con 30 % de RAP

Seguidamente, se muestra la tabla de resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica con 30 % de RAP.

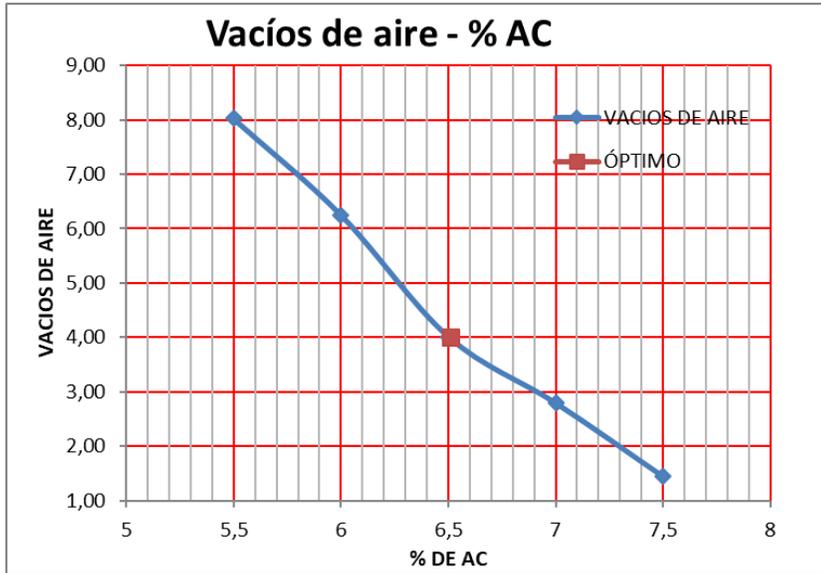
Tabla LXIX. Tabla de resultados

	% AC	GMB	RICE	VA	VAM	VRA	FLOW	Estabilidad	Relación	R- P/A
Óptimo	6,07	2,4794	2,5828	4	15,86	74,1	12,7	3028	240	1,49
Punto 1	5,5	2,4034216	2,6132	8,03	16,47	51,27	10	3072	319	1,34
Punto 2	6	2,4229007	2,5845	6,25	16,24	61,50	12	3048	264	1,20
Punto 3	6,5	2,4488775	2,5513	4,01	15,79	74,59	14	2702	198	1,09
Punto 4	7	2,4574206	2,528	2,79	15,95	82,51	15	2477	166	1,00
Punto 5	7,5	2,4610948	2,497	1,44	16,28	91,17	15	2652	181	0,92

Fuente: elaboración propia.

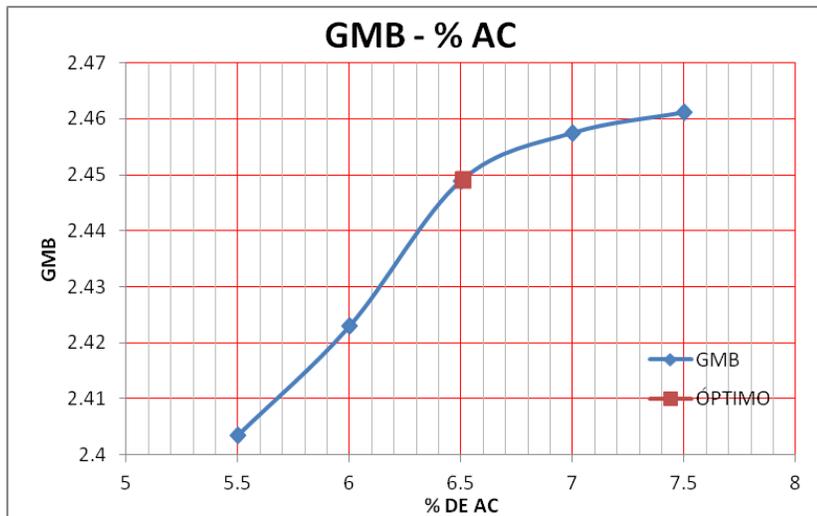
A continuación, se muestran las gráficas utilizadas para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, así como el comportamiento que presenta cada una de acuerdo con el porcentaje de asfalto de cada briqueta ensayada.

Figura 49. Vacíos de aire Vrs porcentaje de AC



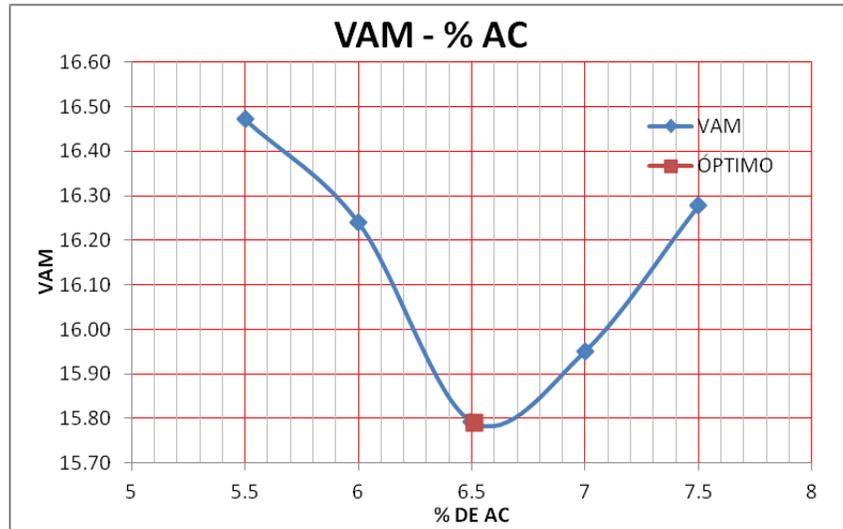
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. GMB Vrs porcentaje de AC



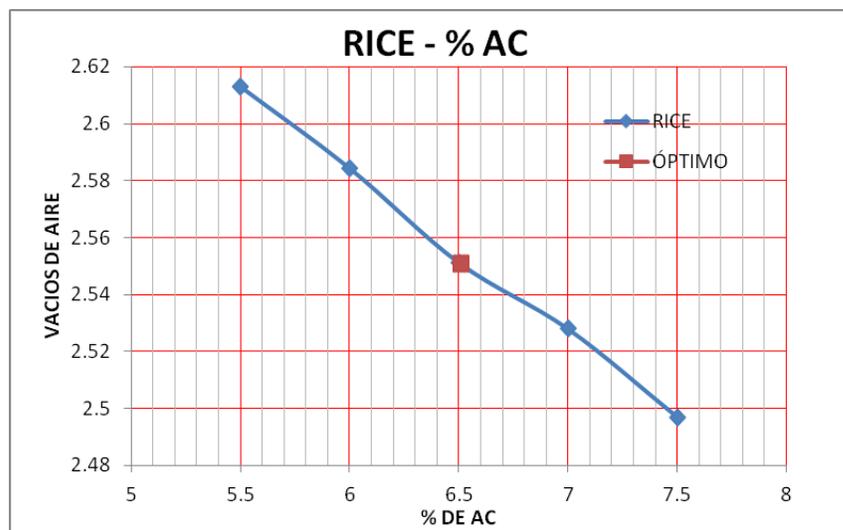
Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Vacíos de agregado mineral Vrs porcentaje de AC



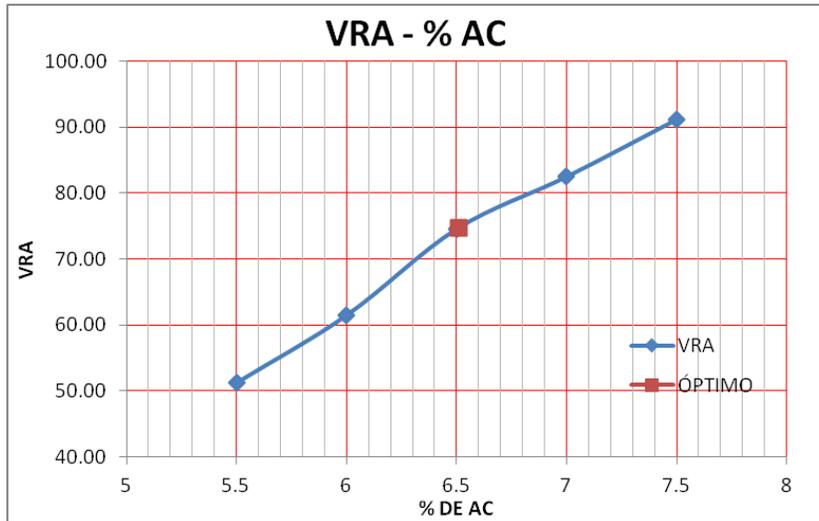
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Rice Vrs porcentaje de AC



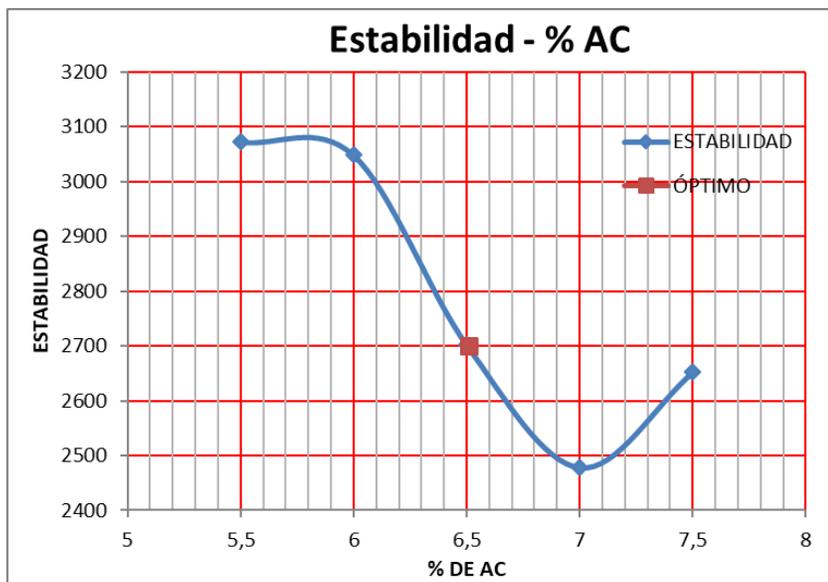
Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **VRA Vrs porcentaje de AC**



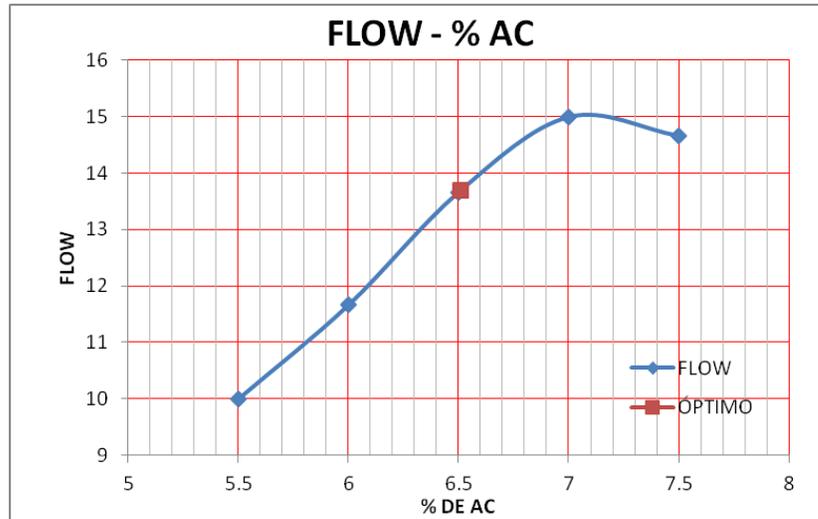
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Estabilidad Vrs porcentaje de AC**



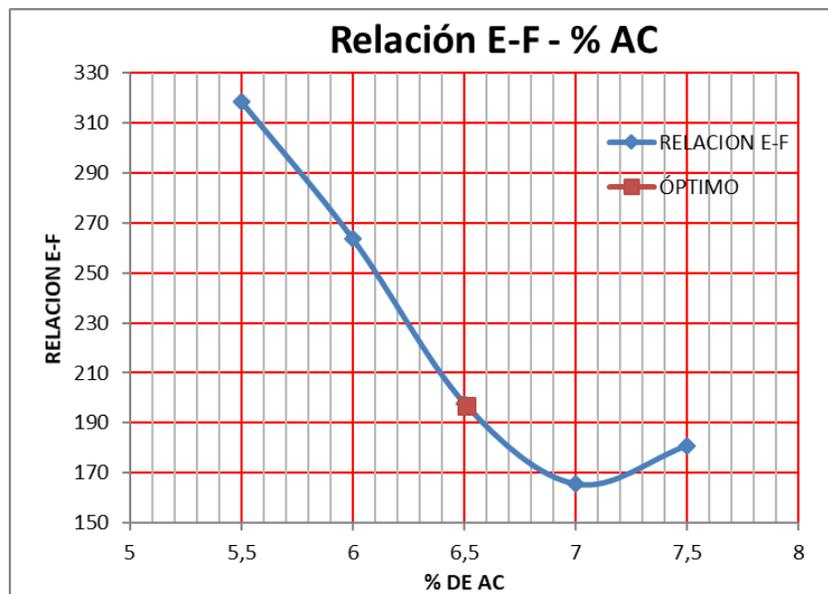
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **FLOW Vrs porcentaje de AC**



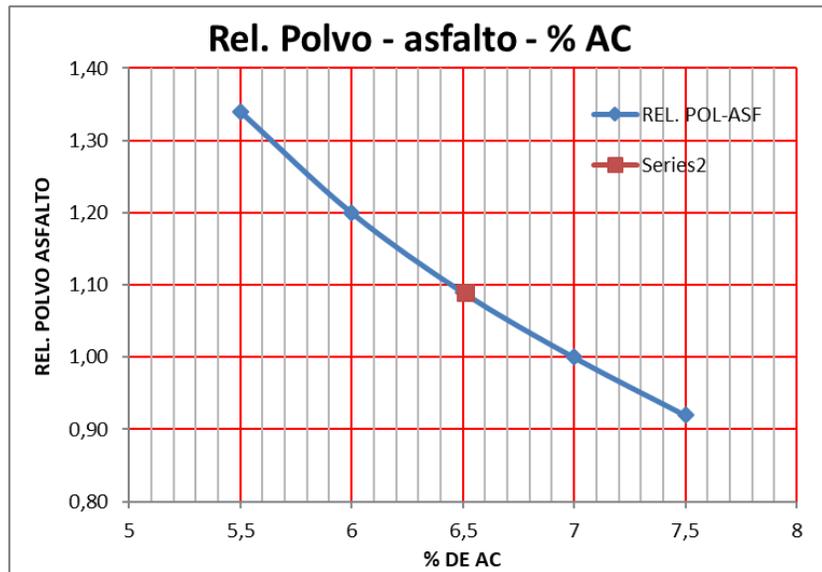
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Relación estabilidad fluencia Vrs porcentaje de AC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Relación polvo asfalto Vrs porcentaje de AC



Fuente: elaboración propia.

4.6.3.2. Análisis de resultados

Tomando como base los vacíos de aire, se logra identificar por medio del método gráfico los porcentajes óptimos requeridos por el método Marshall de una mezcla tipo "E", con material virgen y mezcla asfáltica recuperada en un 30 %. El resultado es un porcentaje óptimo de asfalto de 6,51 % de AC, relación estabilidad fluencia de 240,0 y 2,5828 de gravedad específica teórica RICE. Estos resultados serán comparados junto a los otros ensayos de diseños con material recuperado para conocer el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica al agregarle RAP.

4.7. Comprobación de resultados, análisis y conclusiones

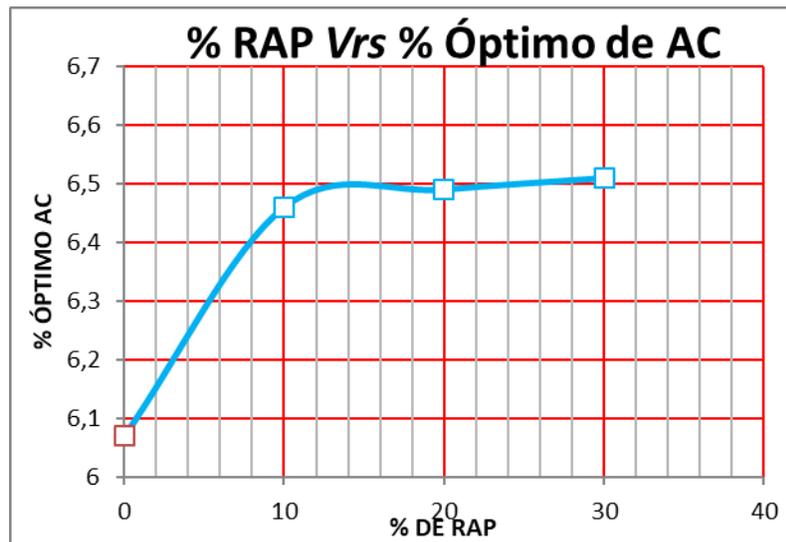
Para determinar el contenido óptimo de asfalto por el método Marshall, es necesario conocer las distintas características de la mezcla asfáltica, para conocer si estas propiedades cumplen con las especificaciones. Para este ensayo se tomó como punto de referencia los vacíos de aire (4 %) con base en esto se obtuvo los siguientes resultados: gravedad específica de la mezcla, vacíos de agregado mineral, vacíos de relleno asfáltico, estabilidad, fluencia y relación estabilidad fluencia. Para una muestra patrón con material virgen y posteriormente para las muestras con 10 %, 20 % y 30 % de RAP. Se puede observar que en cada uno de los parámetros para todas las pruebas cumplen con las especificaciones necesarias por lo cual se considera que todas las muestras anteriores son aptas para la realización de diseños de mezcla asfáltica.

Sin embargo, aunque todas las pruebas cumplieron con los requisitos indicados en las *“especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes”*, cabe resaltar que hay diferencias entre las muestras. Por ejemplo, se puede notar un aumento considerable en el porcentaje óptimo de asfalto entre las pruebas realizadas con agregados vírgenes y las pruebas a las que se les agregó asfalto recuperado. Son las pruebas con material recuperado las que necesitan más asfalto, pero este punto es relativo, ya que hay que considerar que el pavimento reciclado aporta un porcentaje de asfalto a la nueva mezcla. Por tanto, aunque teóricamente la mezcla necesite más asfalto, el asfalto real inyectado será menor debido al porcentaje de asfalto que aporta el RAP.

Otro punto a tomar en consideración, con respecto al asfalto, es que no existe una diferencia significativa entre los porcentajes óptimos de asfalto en las

pruebas a las que se les agregó material reciclado, por lo cual podemos indicar que una vez se ha empezado a utilizar RAP la diferencia entre los porcentajes de asfalto por utilizar no será un factor a considerar.

Figura 58. **Porcentaje de RAP Vrs porcentaje óptimo de AC**



Fuente: elaboración propia.

De igual manera, se puede observar que las lecturas de estabilidad y fluencia no varían de forma abrupta al momento de incrementar el porcentaje de RAP que se utilizar en la mezcla asfáltica. Estas están dentro de especificaciones, por lo cual se puede indicar que la estabilidad y fluencia tampoco serán factores por considerar al momento de establecer un porcentaje óptimo de RAP para una mezcla asfáltica.

Sin embargo, existen factores que pueden hacer variar las características de la mezcla asfáltica al momento de agregarle pavimento asfáltico recuperado. Un ejemplo de esto puede ser la trabajabilidad al momento de colocar la mezcla

asfáltica con alto contenido de RAP en campo; esto se debe a que el asfalto aportado por el RAP es un asfalto envejecido, por lo que no tiene las mismas características de un asfalto utilizado por primera vez. El resultado es una mezcla menos trabajable que una mezcla con materiales a los que no se le agrega RAP en ningún porcentaje.

4.8. Uso de aditivos rejuvenecedores en mezclas asfálticas en caliente con RAP

Como se mencionó anteriormente, uno de los problemas de utilizar grandes cantidades de RAP es la trabajabilidad de la mezcla al momento de ser colocada en campo; sin embargo, se debe aclarar que esto es solamente para mezclas con altos contenidos de RAP.

Debido a los inconvenientes que pueda presentar la trabajabilidad de una mezcla asfáltica a la cual se le ha agregado un alto contenido de material reciclado, se debe buscar alternativas para mejorar el proceso de colocación de la misma. Una solución a esto es disminuir el porcentaje de RAP adicionado a la mezcla asfáltica ya que como se mencionó, el asfalto aportado por el RAP es un asfalto envejecido, de esta manera al disminuir el porcentaje de RAP también se disminuye al porcentaje de asfalto envejecido en la mezcla mejorando con esto la trabajabilidad de la mezcla asfáltica.

Otra alternativa para solucionar el problema de la baja trabajabilidad de la mezcla asfáltica con altos contenidos de RAP puede ser el uso de un agente modificador, que devuelva al asfalto las características perdidas con el tiempo. Rejuvenece el asfalto presente en el pavimento recuperado, se garantiza la trabajabilidad de la mezcla aún con altos contenidos de RAP.

5. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

5.1. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica puede definirse como la combinación en proporciones estrictamente controladas de cemento asfáltico, agregados pétreos de distintas graduaciones, para obtener un producto de alta resistencia y duración, con características de calidad uniformes. Las proporciones de los agregados en la mezcla asfáltica determinan el tipo de mezcla, la cual se basa en el porcentaje de masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11), y el tamaño máximo nominal. Los tipos de mezcla asfáltica en caliente más utilizados en Guatemala se detallan en la siguiente tabla.

Tabla LXX. **Mezclas asfálticas en caliente utilizadas en Guatemala**

Tipo de mezcla	Tamaño máximo nominal del agregado	Uso recomendado
D	19,0 mm (3/4)"	Tráfico pesado
E	12,5 mm (1/2)"	Uso general
F	9,5 mm (3/8)"	Tráfico liviano

Fuente: elaboración propia.

La función de una mezcla asfáltica es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías en comunicación; facilitar la circulación de vehículos, soportar directamente las cargas de los neumáticos y transmitir las a las capas inferiores.

5.2. Contenido de cemento asfáltico en la mezcla

Por medio del ensayo de “*Extracción de asfalto en la mezcla*” ASTM D 2172, se puede determinar el porcentaje de material bituminoso (cemento asfáltico) contenido en la mezcla asfáltica en caliente, mediante la extracción de bitumen con un extractor centrífugo y solventes especificados.

El objetivo de este ensayo es verificar que la mezcla asfáltica ensayada, cumpla con el porcentaje óptimo de asfalto de diseño con una tolerancia de $\pm 0,3$ %.

5.3. Gravedad específica de la mezcla asfáltica

Esta prueba se realiza mediante la metodología del diseño Marshall; es la prueba AASHTO T 166-05 “*Gravedad específica del concreto asfáltico compactado*”, la cual nos permite la determinación de los vacíos presentes en la mezcla asfáltica.

Para determinar la gravedad específica de la mezcla compactada se divide el peso de la muestra seca (briqueta), y la resta de la muestra en agua y la muestra en estado seco saturado, multiplicado por el factor de corrección por temperatura.

5.4. Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente

El método Rice ASTM D- 2041 determina el vacío de aire real en la mezcla. Si el resultado es menor que al especificado en el diseño, esto indicará que algún material es muy absorbente y no estaría cumpliendo con los

parámetros de diseño. La forma en la que este método determina la gravedad específica de una mezcla asfáltica en caliente en su estado suelto, eliminada la presencia de vacíos posibles. El peso específico es la relación del peso de un volumen dado de material a una temperatura de 25 grados Celsius con respecto de un volumen igual de agua a la misma temperatura.

5.5. Determinación de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente

Los vacíos son un parámetro importante en el diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall; estos determinan el contenido de asfalto presente en la mezcla y el contenido de material mineral.

Vacíos de aire VA: los vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada consisten en los pequeños espacios entre las partículas de los agregados y pueden ser calculado a partir del peso específico de los componentes de la mezcla asfáltica. La cantidad de vacíos en la mezcla es inversamente proporcional a la demanda de asfalto en la mezcla.

Vacíos de agregado mineral VAM: son el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. Cuanto mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto; si la película de asfalto que cubre las partículas del agregado es más gruesa, la mezcla será más durable.

Vacíos de relleno asfáltico VRA: indican el porcentaje de vacíos entre las partículas del agregado mineral que se encuentran rellenas de asfalto. Las partículas de VAM abarcan asfalto y aire por lo tanto los vacíos de relleno asfáltico se calculan al restar los vacíos de aire de los vacíos de agregado

mineral y luego dividirlo por los mismos vacíos de agregado mineral y expresarlo como porcentaje.

Contenido de asfalto efectivo P_{be} : el contenido de asfalto efectivo de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por la absorción dentro de las partículas del agregado es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de la mezcla asfáltica.

5.6. Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall

El valor de la estabilidad y fluencia es un indicador en el diseño para determinar la trabajabilidad de la mezcla, y este determina si la mezcla es muy rígida o blanda. Está contemplado por la norma AASHTO T245 y la norma ASTM D-6927, "*Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall*".

Los resultados de los ensayos de estabilidad y fluencia Marshall pueden indicar si la mezcla es muy rígida, esta presentará una alta resistencia a la carga y una baja fluencia; por el contrario, si la mezcla tiene una baja capacidad de carga y alta fluencia, podría ser muy flexible.

CONCLUSIONES

1. Por medio del método de diseño Marshall se logró determinar las propiedades mecánicas y reológicas de una mezcla asfáltica con material virgen, y tres mezclas con material recuperado en proporciones de 10 %, 20 % y 30 % respectivamente. Se comprobó que no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos y sus componentes son aptos para la producción de mezcla asfáltica.
2. La reutilización de los materiales representa siempre un beneficio económico y ambiental en los proyectos de construcción, siempre y cuando se pueda garantizar la calidad del producto final. Esto ha quedado demostrado con la adición de pavimento recuperado en nuevas mezclas asfálticas en caliente.
3. Con base en el control de calidad en mezclas asfálticas en caliente, se realizaron pruebas para conocer la calidad de los materiales que conformarían la mezcla asfáltica, en mezclas con agregados vírgenes y mezclas con pavimento asfáltico recuperado. Y se determinó que ambas mezclas cumplen con las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos.
4. Por medio de los ensayos del método de diseño Marshall, se logró determinar el porcentaje óptimo de asfalto para cada una de las muestras. El estudio demostró hay una diferencia entre el porcentaje óptimo de asfalto de una muestra con agregados vírgenes y muestras

adicionadas con RAP; sin embargo, este punto es relativo ya que como se mencionó, el material recuperado aporta un porcentaje de asfalto a la nueva mezcla, por lo cual el asfalto real inyectado sería menor al momento de adicionar RAP a la mezcla asfáltica.

RECOMENDACIONES

1. Realizar muestreos constantes a los agregados minerales, así como al asfalto recuperado para conocer su estado antes de ser adicionados a la mezcla asfáltica.
2. Almacenar en un lugar adecuado los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica, para evitar su segregación y minimizar su humedad.
3. Homogenizar el material constituyente de la mezcla asfáltica antes de ser ingresados a la planta de asfalto, para mejorar su consistencia.
4. Utilizar el equipo de seguridad adecuado tanto en el proceso de trituración como en los procesos de homogenización, muestreo y colocación de la mezcla asfáltica en caliente.
5. Utilizar la maquinaria adecuada para realizar los muestreos y ensayos de control de calidad del RAP.
6. Realizar control de calidad a la mezcla asfáltica por cada 500 toneladas cortas de producción, como lo especifica la Dirección General de Caminos.
7. Realizar estudios que puedan contribuir a una mejora ambiental en ámbitos de la construcción, velando siempre por conservar la calidad de los materiales.

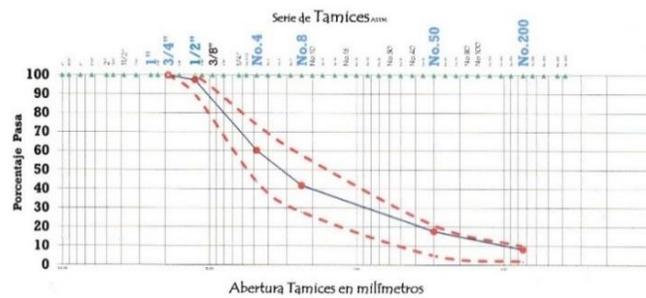
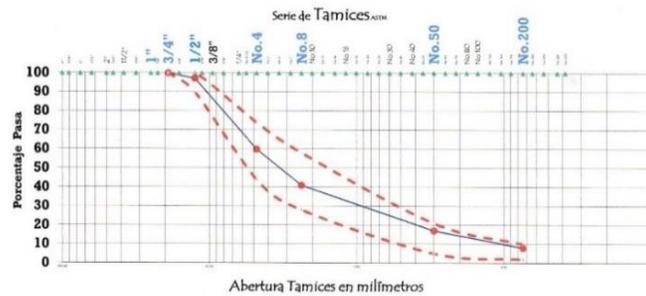
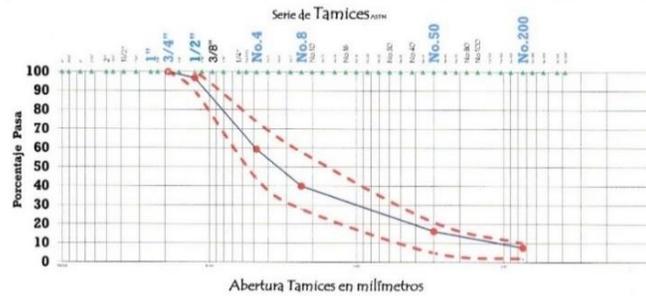
BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highways and Transportation Official. *Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing*, Part 1. 16 a ed. AASHTO 1993, 146 p.
2. COX TUCH, Pablo Missael. *Manual de Laboratorio para estudiantes para el desarrollo de Ensayos en concreto asfáltico en caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. 137 p.
3. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda República de Guatemala. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ingenieros Consultores de Centro América S.A. 2001. 401-3 p.
4. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 417 p.
5. LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996. 74 p.

ANEXOS

Anexo 1. Integración de granulometrías utilizadas en los diseños de mezcla asfáltica

	3/4" a 0		PORCENTAJE RAP								
	RAP		10		20		30				
	1	2	1	2	1	2	1	2			
Dic-18			90	10	80	20	70	30	10	20	30
3/4"	100.00	100.00	90.00	10.00	80.00	20.00	70.00	30.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	96.47	100.00	86.82	10.00	77.18	20.00	67.53	30.00	96.82	97.18	97.53
4	59.00	63.56	53.10	6.36	47.20	12.71	41.30	19.07	59.46	59.91	60.37
8	39.04	48.80	35.14	4.88	31.23	9.76	27.33	14.64	40.02	40.99	41.97
50	15.60	23.04	14.04	2.30	12.48	4.61	10.92	6.91	16.34	17.09	17.83
200	7.42	10.41	6.68	1.04	5.94	2.08	5.19	3.12	7.72	8.02	8.32



Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Resultados de los diseños de mezcla asfáltica utilizando el método Marshall

Pavimentos de Guatemala, S.A.
53 Calle 22-08 Zona 12
PBX 502 24793021



Diseño de Concreto Asfáltico en Caliente

Pruebas Efectuadas	Símbolo	SIN RAP				10% RAP				20% RAP				30% RAP				Especificaciones		
		Resultado																		
Número de Golpes por cara	****	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	300 --- 325
Temperatura de Mezclado °F	****	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	> 284 °F
Temperatura de Compactado °F		240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	4 --- 10
% Optimo de Asfalto Total	Pb	6.07	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	1.10	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4.97	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38	****
% Asfalto Aportado por el Agregado RAP		0.00	0.00	0.455	0.91	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	****
% Asfalto Virgen		6.07	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	6.01	5.14
% Vacíos de Aire	Va	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	74.1	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	15.86	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	15.83	> 14.0
Estabilidad Marshall	Lbs	3040	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	2822	> 1,200
Fluencia Marshall	****	12.7	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	240	212.5	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	184.6	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	Dp	1.49	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	0.6 --- 1.6
Grav.Específica Bruta de la Mezcla AASHTO T 166	Gmb	2.4794	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	2.4741	****
Grav.Específica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209 RICE	Gmm	2.6828	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	2.6772	****
Grav.Específica Bruta del Agregado Integrada	Gsb	2.7680	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	2.7500	****
Grav.Específica Efectiva del Agregado Integrada	Gse	2.8499	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	2.8296	****
Grav.Específica Efectiva del Agregado RICE	Gse	2.8461	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	2.8591	****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	****
% Absorción de Agua	Pwa	1.70	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	****
% Partículas recubiertas con Bitumen AASHTO T195	****	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	> 95.0
% Equivalente de Arena AASHTO T 176	****	75.8	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	> 35.0
% Limite Líquido AASHTO T 89	L.L.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 20.0
Peso Unitario Suelto AASHTO T 19	PUS	1.878	1.825	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	> 1,360 Kgs/Metro3
% Abrasión AASHTO T 96		25.85	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	< 35
% Desintegración al Sulfato de Sodio AASHTO T-104		1.06	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	< 12
% Caras Fracturadas Una	****	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	> 90.0
% Caras Fracturadas Dos	****	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	> 75.0
% Partículas Planas o Alargadas ASTM D 4791	PPA	1.43	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	< 8.0

Especificaciones: Según Libro Azul D.G.C. Edición 2001

Fuente: Padegua.

Anexo 3. Resultado del análisis de laboratorio de la caracterización del cemento asfáltico convencional AC-20



Perenco Guatemala Limited

5ª Av. 5-55 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6196

RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Certificado No. 155672743D8

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACIÓN:	AC-20 [ASTM D 3381]
FECHA:	Enero 09 de 2,019
HORA:	17:55
TANQUE:	2
LOTE:	004 - 2,019

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION ASTM D 3381 TABLA 2	METODO ASTM
GRAVEDAD ESPECIFICA, 60°F,	1.062	N.E.	D 70
PESO (Lbs/Gal)	8.730	N.E.	D 70
GRAVEDAD ESPECIFICA, 77°F,	1.057	N.E.	D 70
PENETRACION, 77°F, 100g, 5 seg.	83	60 min.	D 5
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	2,039	2,000 ± 400	D 2171
VISCOSIDAD, 275°F, cSt.	446	300 min.	D 2170
FLASH POINT, COC, °F	505	450 min.	D 92
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °F	115	N.E.	D 36
SOLUBILIDAD EN TCE, %	99.9	99.0 min.	D 2042
ENSAYOS AL RESIDUO TFOT			D 1754
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	5,470	10,000 max.	D 2171
DUCTILIDAD, 77°F, 5 cm/minuto	100	50 min.	D 113
VTS	3.43	**	

* min. = mínimo

max. = máximo

N.E. = No Especifica

** Dato Calculado sin especificación ASTM, para uso exclusivo del interesado.

Firma del representante de Perenco:

Nombre: Freddy D. Barrios O.

Bote No. 110027315

Entro 12 de 11 2019.

LABORATORIO REFINERIA LA LIBERTAD

2384-6100 Ext. 111 La Libertad, Petén

e-mail: laboratoriolibertad@gt.perenco.com

Fuente: Perenco Guatemala.

Anexo 4. Gráfico del análisis de viscosidad Vrs temperatura



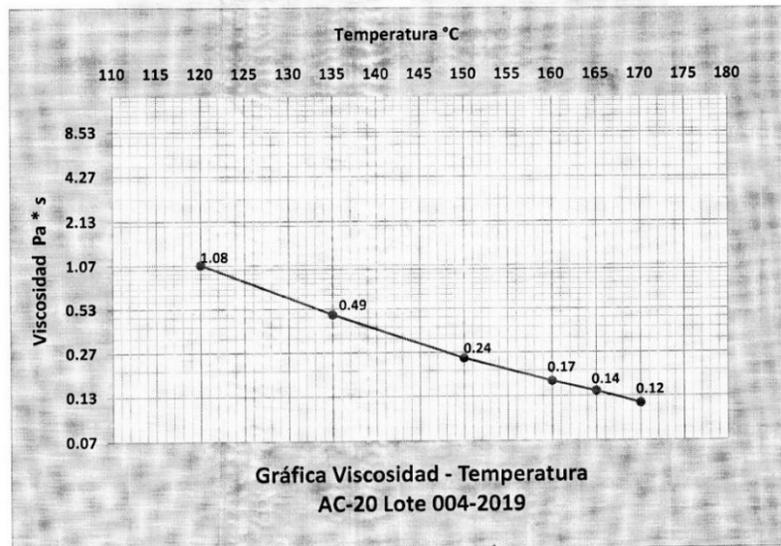
Perenco Guatemala Limited

5ª Av. 5-55 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6196

CURVA REOLOGICA

Certificado No. 155672743D8

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACION:	AC-20 [ASTM D 3381]
METODO DE ENSAYO:	AASHTO T-316
VISCOSIMETRO:	DV-II +
VASTAGO	27
RPM	20
FECHA:	Enero 09 de 2,019
HORA:	17:55
TANQUE:	2
LOTE:	004 - 2,019



Firma del representante de Perenco: 
Nombre: **Fredy D. Barrios O.**

LABORATORIO REFINERIA LA LIBERTAD
2384-6100 Ext. 111 La Libertad, Petén
e-mail: laboratorio@libertad@gt.perenco.com

Fuente: Perenco Guatemala.