

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**TRABAJO DE DISERTACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
INGENIERO CIVIL**

**“ANÁLISIS DE CASOS BIBLIOGRÁFICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS
CON ADITIVOS QUÍMICOS: QUIMIBOND, ZYCOTHERM, REDISSET, HUSIL,
EVOTHERM EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARPETAS DE RODADURA EN
CUATRO PAÍSES LATINOAMERICANOS”**

AUTORES:

JHONN JEFFERSON SOSA FARINANGO

RENE FABRICIO BENAVIDES CADENA

DIRECTOR:

ING. WILSON CANDO T.

QUITO, AÑO 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo, está dedicado a mis padres, María Elena y Augusto, quienes son la principal inspiración y quienes me han brindado su apoyo incondicional en toda mi educación, con su esfuerzo y dedicación me han enseñado a ser una gran persona, con sus motivaciones me han guiado para llegar a esta importante meta de mi vida, esto también se lo dedico a mi abuelita (+) que con sus valores y enseñanzas me hicieron una persona responsable y honesta, quien me enseñó a nunca darme por vencido ante cualquier adversidad de la vida. Por lo tanto, este trabajo es fruto del sacrificio del día a día de mis padres al permitirme tener la mejor educación.

JHONN SOSA

Esta tesis va dedicada a:

Mis padres Liliana Cadena y Fabricio Benavides, por su enorme amor y apoyo incondicional a lo largo de esta carrera, formando la persona que soy hoy en día. A mis abuelitos Magdalena Santacruz y René Benavides por ser una gran guía y un ejemplo a seguir. A mis tíos Lucy Benavides y Byron Benavides por estar siempre ahí bajo cualquier circunstancia. A mi hermana Karolina por a verme acompañado en mis últimos años de la carrera. A mi enamorada Stefania Quise por estar en los momentos más bonitos de la universidad. Finalmente dedico a mis mejores amigos de la universidad (Christopher Paucar, Diana Cárdenas, Angie León, Evelyn Paredes, Jhonn Sosa, Eduardo Espinoza, Enrique Alvear, Carlos Heredia) por formar parte de una etapa muy importante de mi vida, y a mis mejores amigos de la vida Brayan Yépez y Brayan Manjarres.

RENE BENAVIDES

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la bendición que me ha brindado todos los días, por darme la fortaleza y la oportunidad de culminar con éxito esta importante etapa de mi vida.

A mis padres, abuelita (+) y hermana por siempre brindarme su apoyo incondicional en todo momento, por la confianza y sobre todo por haberme enseñado valores para ser una gran persona.

A mi preciosa Valery por ser mi fortaleza y motivación para cumplir con este sueño, por estar a mi lado brindándome su cariño y amor incondicional.

A Ivonne, por estar siempre a mi lado apoyándome y compartiendo alegrías y tristezas a lo largo de este arduo camino.

A mis amigos Diana Cárdenas, Angie León, Evelyn Paredes, René Benavides, Enrique Alvear, Eduardo Espinoza, Carlos Heredia y Christopher Paucar por haberme permitido conocerlos y disfrutar cada día que pasamos en la Universidad.

JHONN SOSA

Primeramente, a Dios por permitirme tener muy buenas experiencias en mi vida universitaria, doy gracias a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por dejarme ser parte de una magnífica universidad a lo largo de mi vida universitaria, agradezco a cada ingeniero de la Facultad de Ingeniería por formar grandes profesionales, finalmente a mi familia por su enorme apoyo durante toda mi carrera

RENE BENAVIDES

Contenido

1. Capítulo I.....	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Introducción	2
1.3. Antecedentes	4
1.4. Justificación.....	6
1.5. Alcance.....	8
1.6. Planteamiento del problema	9
1.7. Objetivos	11
1.7.1. Objetivo General.....	11
1.7.2. Objetivos Específicos.....	11
2. Capítulo II	12
2.1. Marco Teórico	12
2.2. Mezclas Asfálticas.....	12
2.2.1. Estructuras de las Mezclas Asfálticas	12
2.2.2. Agregados	13
2.2.3. Ligante o Betún Asfáltico	13
2.2.4. Propiedades del Asfalto	14
2.2.5. Características de las Mezclas Asfálticas	18
2.2.6. Propiedades Volumétricas de las Mezclas Asfálticas Convencionales	19
2.2.7. Mezclas asfálticas en caliente (MAC)	22
2.2.8. Mezclas asfálticas tibias (MAT)	22

2.3.	Aditivos de Mezclas Tibias	24
2.3.1.	Zycotherm	24
2.3.2.	Quimibond	26
2.3.3.	Rediset™ WMX	28
2.3.4.	Husil.....	31
2.3.5.	Evotherm.....	32
3.	Capítulo III.....	34
3.1.	Evaluación de los Resultados Mediante el uso de los Diferentes Aditivos.	34
3.2.	Procedimiento General de Elaboración de Mezclas Asfálticas Tibias.....	34
3.2.1.	Metodología experimental	34
3.2.2.	Ensayos de agregados (agregado pétreo).....	34
3.2.3.	Ensayos del Ligante o Material bituminoso.....	34
3.2.4.	Elaboración De Mezclas Asfálticas convencionales Según Método Marshall..	35
3.2.5.	Elaboración de las mezclas asfálticas tibias.....	37
3.3.	Recopilación de la metodología de Ensayos de laboratorio de las mezclas asfálticas tibias	38
3.3.1.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Zycotherm en el Ecuador.....	38
3.3.1.1.	Caracterización de los agregados	38
3.3.1.2.	Ensayos de Asfalto	39
3.3.1.3.	Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall).....	40
3.3.1.4.	Resultados de la mezcla asfáltica (HMA)	40
3.3.1.5.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA).....	45

3.3.2.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Quimibond 3000 en Perú	47
3.3.2.1.	Caracterización de los Agregados (MAC 2)	47
3.3.2.2.	Estudios del agregado Grueso	48
3.3.2.3.	Estudios del agregado Fino	48
3.3.2.4.	Cemento asfáltico 60/70.....	49
3.3.2.5.	Requerimientos y Ensayos del cemento asfáltico	50
3.3.2.6.	Ensayo Marshall en Perú.....	52
3.3.2.7.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Lima – Perú).	58
3.3.3.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo QUIMIBOND II en Perú (Lima) 59	
3.3.3.1.	Caracterización de agregados.....	59
3.3.3.2.	Requerimientos del Cemento Asfáltico o Bitumen.....	61
3.3.3.3.	Diseño de la mezcla según el método Marshall Lima – Perú.	62
3.3.4.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Rediset™ WMX en Ecuador	67
3.3.4.1.	Metodología	67
3.3.4.2.	Ensayos de Asfalto	68
3.3.4.3.	Ensayo Marshall (Ecuador).....	70
3.3.4.4.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Ecuador)	75
3.3.5.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Rediset en Colombia.....	77
3.3.5.1.	Metodología	77
3.3.5.2.	Caracterización del cemento asfaltico.....	78
3.3.5.3.	Ensayo Marshall.....	78

3.3.6.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Husil en Colombia	79
3.3.6.1.	Metodología	79
3.3.6.2.	Ensayos a la mezcla de control o referencia	80
3.3.6.3.	Caracterización de los agregados	80
3.3.6.4.	Ensayo de cemento asfáltico	81
3.3.6.5.	Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall) (Colombia)	81
3.3.6.6.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Colombia).....	87
3.3.7.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Husil (Colombia – Bogotá)...	88
3.3.7.1.	Caracterización de agregados.....	88
3.3.7.2.	Requisitos de cemento asfaltico	89
3.3.7.3.	Ensayo Marshall en Mezcla asfáltica caliente (Bogotá – Colombia).....	90
3.3.7.4.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Bogotá - Colombia)	93
3.3.8.	Recopilación de la Fase Experimental del tercer Aditivo Husil (Colombia – Bogotá)	94
3.3.8.1.	Metodología (Colombia – Bogotá)	94
3.3.8.2.	Caracterización de los agregados (Colombia – Bogotá)	94
3.3.8.3.	Caracterización del cemento asfaltico (Colombia – Bogotá).....	95
3.3.8.4.	Diseño de mezclas asfálticas (Método Marshall) (Colombia – Bogotá).....	96
3.3.8.5.	Resultados de elaboración de mezclas asfálticas tibias (WMA) (Colombia- Bogotá)	99
3.3.9.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Evotherm en el Salvador.....	100

3.3.9.1.	Metodología	100
3.3.9.2.	Ensayos a la mezcla de control o referencia	100
3.3.9.3.	Caracterización de los agregados	101
3.3.9.4.	Ensayo de cemento asfáltico	102
3.3.9.5.	Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall).....	103
3.3.9.6.	Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA).....	108
3.3.10.	Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Evotherm en el Salvador (Ciudad Universitaria).....	110
3.3.10.1.	Caracterización de los agregados	111
3.3.10.2.	Ensayo de cemento asfáltico	111
3.3.10.3.	Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall).....	112
3.4.	Análisis de resultados de la Investigación.....	118
3.4.1.	Aditivo Zycotherm.....	118
3.4.2.	Aditivo Husil.....	122
3.4.3.	Aditivo Quimibond	127
3.4.4.	Aditivo Rediset	131
3.4.5.	Aditivo Evotherm.....	136
3.4.6.	Variación promedio de la estabilidad Marshall al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.....	140
3.4.7.	Variación promedio del Flujo Marshall al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en convencionales	142

3.4.8.	Variación promedio del porcentaje de vacíos al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente	143
3.5.	Porcentajes de aditivos utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas tibias (MAT).....	145
3.6.	Análisis de costos de elaboración de mezclas asfálticas tibias	148
3.7.	Beneficios de las Mezclas Asfálticas tibias.....	150
3.7.1.	Emisiones.....	150
3.7.2.	Consumo de energía.....	151
3.7.3.	Beneficios Económicos.....	152
3.7.4.	Beneficios de Producción	153
3.7.5.	Beneficios de la aplicación en obra.	153
3.8.	Desventajas de las mezclas asfálticas tibias	153
4.	Capítulo IV.....	156
4.1.	Conclusiones	156
4.2.	Recomendaciones.....	158
	Bibliografía.....	159

Índice de Figuras

Figura 1.1. Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura.....	1
Figura 1.2. Emisiones con diferentes grados de temperatura.	9
Figura 2.1. Uso del ligante.....	14
Figura 2.2. Acción de desenvuelta del agua	15
Figura 2.3. Composición del Asfalto	17
Figura 2.4. Estructura coloidal del asfáltenos	18
Figura 2.5. Mezcla asfáltica.....	19
Figura 2.6. Vacíos en mezclas HMA compactadas	21
Figura 2.7. Eficiencia de compactación.....	24
Figura 2.8. Variaciones las emisiones al utilizar Rediset.	30
Figura 2.9. Aditivo REDISSETM WMX	31
Figura 3.1. Extracción de cemento asfáltico para la investigación.....	50
Figura 3.2. Emisiones de los gases producidos en las mezclas asfálticas.	151

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Porcentaje mínimo de VAM	21
Tabla 2.2. Especificaciones del Zycotherm	25
Tabla 2.3. Propiedades del Quimibond 3000	27
Tabla 2.4. Datos técnicos de Quimibond 3000	27
Tabla 3.1. Resultados de caracterización de los agregados (Ecuador)	38
Tabla 3.2. Requisitos de Cemento Asfáltico AC-20 (Ecuador)	39
Tabla 3.3. Resultados de caracterización del cemento asfáltico AC-20 (Ecuador)	40
Tabla 3.4. Resultados de briquetas con su respectivo porcentaje de asfalto (Ecuador).....	41
Tabla 3.5. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Ecuador).....	41
Tabla 3.6. Requisitos para ensayo Marshall (Ecuador)	42
Tabla 3.7. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 7% (Ecuador)	45
Tabla 3.8. Resultados de mezcla asfáltica tibia con y sin aditivo (Ecuador).....	46
Tabla 3.9. Gradación para la mezcla asfáltica (Perú).	47
Tabla 3.10. Resultados de ensayos en los agregados gruesos (Perú).....	48
Tabla 3.11. Resultados de ensayos en los agregados finos (Perú).....	49
Tabla 3.12. Clasificación de cemento asfáltico por temperatura (Perú)	50
Tabla 3.13. Requerimiento del cemento asfáltico por penetración (Perú).....	51
Tabla 3.14. Requerimientos del cemento asfáltico por viscosidad (Perú).....	51
Tabla 3.15. Resultado de requisitos del cemento asfáltico por penetración (Perú).	52
Tabla 3.16. Requisitos Ensayo Marshall para mezclas asfálticas (Perú).....	53
Tabla 3.17. Resultados de briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Perú).	54
Tabla 3.18. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Perú).....	54
Tabla 3.19. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Perú).	57
Tabla 3.20. Resultados de mezcla asfáltica con aditivo y sin aditivo (Perú).....	58

Tabla 3.21. Requisitos del Agregado Grueso (Perú – Lima)	60
Tabla 3.22. Requisitos del Agregado Fino.....	60
Tabla 3.23. Tipo de cemento asfáltico por temperatura.....	61
Tabla 3.24. Requerimientos del cemento asfaltico según EG 2013.....	61
Tabla 3.25. Resultados del cumplimiento del cemento asfaltico	62
Tabla 3.26. Parámetros de diseño según EG 2013.....	63
Tabla 3.27. Resultados de las briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Perú - Lima) 63	
Tabla 3.28. Asfalto óptimo de MAT con aditivo QUIMIBOND a 140 °C.	66
Tabla 3.29. Tipo de material (Ecuador)	67
Tabla 3.30. Combinada de Mezcla (Ecuador).....	67
Tabla 3.31. Control de diseño (Ecuador)	68
Tabla 3.32. Requerimientos de calidad del ligante por su viscosidad a 60°C	69
Tabla 3.33. Variación de Viscosidad debido al Efecto del TFOT (Ecuador)	69
Tabla 3.34. Requisitos del Ensayo Marshall (Ecuador).....	70
Tabla 3.35. Diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall (Ecuador)	71
Tabla 3.36. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Ecuador).....	71
Tabla 3.37. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ecuador)	75
Tabla 3.38. Resultado de porcentaje de Vacíos en diferentes temperaturas (Ecuador)	76
Tabla 3.39. Estabilidad Marshall (Ecuador)	76
Tabla 3.40. Caracterización de los agregados (Rediset Colombia)	77
Tabla 3.41. Requerimientos de calidad del ligante	78
Tabla 3.42. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Rediset Colombia)..	79
Tabla 3.43. Resultados de caracterización de agregados (Colombia).....	80
Tabla 3.44. Resultado de los Requisitos del cemento asfáltico AC 60-70	81
Tabla 3.45. Resultado de cada porcentaje de asfalto (Colombia).....	82

Tabla 3.46. Requisitos para ensayo Marshall (Colombia)	83
Tabla 3.47. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 5.3% (Colombia).....	87
Tabla 3.48. Resultados del método Marshall aplicadas en mezclas asfálticas tibias. Sin Husil (Colombia)	88
Tabla 3.49. Resultados del método Marshall aplicada en mezclas tibias. Con Husil (Colombia)	88
Tabla 3.50. Requisitos de agregados pétreos (Bogotá - Colombia).....	89
Tabla 3.51. Requisitos de cementos asfáltico	90
Tabla 3.52. Parámetros de diseño de las mezclas asfálticas convencionales (Bogotá – Colombia)	90
Tabla 3.53. Resultados obtenidos de las mezclas asfálticas con su porcentaje de CA	91
Tabla 3.54. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ecuador)	93
Tabla 3.55. Resultados de MAT con aditivo (HUSIL) y sin aditivo (Bogotá - Colombia)....	94
Tabla 3.56. Caracterización del agregado pétreo	95
Tabla 3.57. Caracterización del cemento asfáltico	95
Tabla 3.58. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Colombia-Bogotá)	96
Tabla 3.59. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Colombia - Bogotá)	99
Tabla 3.60. Resultados del método Marshall aplicada en mezclas tibias (Colombia – Bogotá)	100
Tabla 3.61. Ensayos a agregados grueso, grava 3/4"	101
Tabla 3.62. Ensayos a grava 1/2"	101
Tabla 3.63. Ensayos a la arena triturada	102
Tabla 3.64. Requisitos de cemento asfáltico CA-30 (El Salvador)	103
Tabla 3.65. Resultados de los ensayos determinados con cada porcentaje de asfalto (El Salvador).....	104

Tabla 3.66. Requisitos para ensayo Marshall (El Salvador)	104
Tabla 3.67. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 5.3%.	108
Tabla 3.68. Resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas con varias temperaturas de elaboración y CA 5.3%. Sin Evotherm (El Salvador)	109
Tabla 3.69. Resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas con varias temperaturas de elaboración y CA 5.3%. Con Evotherm (El Salvador).....	110
Tabla 3.70. Resultados de caracterización de agregados (Ciudad Universitaria - El Salvador)	111
Tabla 3.71. Especificaciones del cemento asfáltico (Ciudad Universitaria - El Salvador) ..	112
Tabla 3.72. Resultados de briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Ciudad Universitaria - E l Salvador)	113
Tabla 3.73. Requisitos del ensayo Marshal (Ciudad Universitaria - El Salvador)	114
Tabla 3.74. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ciudad Universitaria - El Salvador)	117
Tabla 3.75. Resultados del Ensayo Marshal (Ciudad Universitaria - El Salvador)	117
Tabla 3.76. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.....	118
Tabla 3.77. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.	120
Tabla 3.78. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.	121
Tabla 3.79. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.....	123

Tabla 3.80. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.	124
Tabla 3.81. Cuadro de variación de porcentaje vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.	126
Tabla 3.82. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.....	127
Tabla 3.83. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.	129
Tabla 3.84. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.	130
Tabla 3.85. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset.	132
Tabla 3.86. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset.....	133
Tabla 3.87. Cuadro de variación de porcentaje vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset.	135
Tabla 3.88. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.	136
Tabla 3.89. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.	138

Tabla 3.90. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.....	139
Tabla 3.91. Promedio de la variación de la Estabilidad Marshall aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales	141
Tabla 3.92. Promedio de la variación del Flujo Marshall aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales	142
Tabla 3.93. Promedio de la variación del porcentaje de vacíos aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales.....	144
Tabla 3.94. Valores óptimos de los diferentes aditivos utilizados en cuatro países latinoamericanos	145
Tabla 3.95. Costos de los diferentes aditivos en cuatro países Latinoamericanos	148

Índice de Gráficos

Gráfico 3.1. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de Vacíos (Ecuador).....	42
Gráfico 3.2. Porcentaje de asfaltos vs Densidad Bulk (Ecuador)	43
Gráfico 3.3. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ecuador).....	43
Gráfico 3.4. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ecuador)	44
Gráfico 3.5. Porcentaje de asfalto vs VAM (Ecuador)	44
Gráfico 3.6. Porcentaje de asfalto vs VAF (Ecuador).....	45
Gráfico 3.7. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Perú).....	55
Gráfico 3.8. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Perú).	55
Gráfico 3.9. Porcentaje de asfalto vs VAF (Perú).....	56
Gráfico 3.10. Porcentaje de asfalto vs VA (Perú).....	56
Gráfico 3.11. Porcentaje de asfalto vs VAM (Perú).	57
Gráfico 3.12. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Perú - Lima).....	64
Gráfico 3.13. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Perú - Lima).	64
Gráfico 3.14. Porcentaje de asfalto vs VA (Perú - Lima).	65
Gráfico 3.15. Porcentaje de asfalto vs VAM (Perú - Lima).	65
Gráfico 3.16. Porcentaje de asfalto vs VAF (Perú - Lima).....	66
Gráfico 3.17. Porcentaje de asfalto vs Densidad de Bulk (Ecuador).....	72
Gráfico 3.18. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ecuador).....	72
Gráfico 3.19. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ecuador)	73
Gráfico 3.20. Porcentaje de asfalto vs VAM. (Ecuador)	73
Gráfico 3.21. Porcentaje de asfalto vs VA. (Ecuador).....	74
Gráfico 3.22. Porcentaje de asfalto vs VAF. (Ecuador).....	74
Gráfico 3.23. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Colombia)	84
Gráfico 3.24. porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Colombia)	84

Gráfico 3.25. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Colombia)	85
Gráfico 3.26 porcentaje de asfalto vs Flujo (Colombia).....	85
Gráfico 3.27. Porcentaje de asfalto vs VAM. (Colombia).....	86
Gráfico 3.28. Porcentaje de asfalto vs VAF (Colombia)	86
Gráfico 3.29. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Bogotá - Colombia).	92
Gráfico 3.30. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Bogotá - Colombia).....	92
Gráfico 3.31. Porcentaje de asfalto vs VA (Bogotá - Colombia).	92
Gráfico 3.32. Porcentaje de asfalto vs VAM (Bogotá - Colombia).....	93
Gráfico 3.33. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Colombia - Bogotá)	97
Gráfico 3.34. Porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Colombia - Bogotá)	97
Gráfico 3.35. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Colombia - Bogotá)	98
Gráfico 3.36. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Colombia - Bogotá).....	98
Gráfico 3.37. Porcentaje de asfalto vs % VAM.....	99
Gráfico 3.38. Porcentaje de asfalto vs V.A.....	105
Gráfico 3.39. Porcentaje de Asfalto vs Densidad Bulk (El Salvador)	106
Gráfico 3.40. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (El Salvador)	106
Gráfico 3.41. Porcentaje de asfalto vs Flujo (El Salvador).....	107
Gráfico 3.42. Porcentaje de asfalto vs VAM.	107
Gráfico 3.43. Porcentaje de asfalto vs VAF (El Salvador)	108
Gráfico 3.44. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Ciudad universitaria - El Salvador).....	114
Gráfico 3.45. Porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Ciudad universitaria - El Salvador)	115
Gráfico 3.46. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ciudad universitaria - El Salvador)	115
Gráfico 3.47. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ciudad universitaria - El Salvador).....	116
Gráfico 3.48. Porcentaje de asfalto vs VMA (Ciudad universitaria - El Salvador).....	116

Gráfico 3.49. Gráfico 3.48. Porcentaje de asfalto vs VAF (Ciudad universitaria - El Salvador).....	117
Gráfico 3.50. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.	119
Gráfico 3.51. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.	120
Gráfico 3.52. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.	122
Gráfico 3.53. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil al 1% a diferentes temperaturas de mezclado en distintos sectores de Colombia.....	123
Gráfico 3.54. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.	125
Gráfico 3.55. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil de 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.	126
Gráfico 3.56. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Quimibond de 0.7% y 0.8%, a diferentes temperaturas de mezclado.....	128
Gráfico 3.57. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Quimibond de 0.70% y 0.80%, a diferentes temperaturas de mezclado.....	129
Gráfico 3.58. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.	131
Gráfico 3.59. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Rediset al 2% a diferentes temperaturas de aplicados en Ecuador y Colombia.	132
Gráfico 3.60. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando REDISSET al 2%, a diferentes temperaturas de mezclado.....	134

Gráfico 3.61. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Rediset de 2%, a diferentes temperaturas de mezclado.	135
Gráfico 3.62. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.	137
Gráfico 3.63. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.	138
Gráfico 3.64. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.	140
Gráfico 3.65. Temperatura de Compactación vs Estabilidad.....	146
Gráfico 3.66. Temperatura de Compactación vs VA.....	146
Gráfico 3.67. Temperatura de Compactación vs Flujo.	147

Capítulo I

1.1. Generalidades

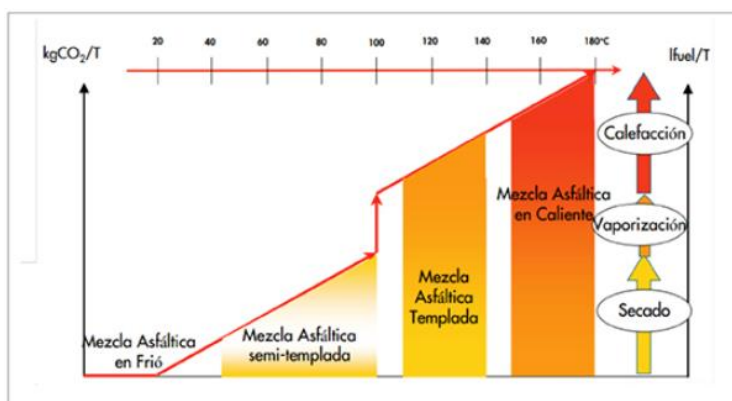
Existen varios tipos de mezclas asfálticas en el cual su rango varió desde las mezclas asfálticas frías, tibias y calientes. Por lo que se han desarrollado nuevos métodos el cual nos permite la reducción significativa de temperatura de compactación, mezclado y tendido, llegando a optimizar a las mezclas asfálticas de 30 a 40°C, con la aplicación de estas metodologías llegamos a reducir el impacto al medio ambiente, emisiones y demanda de combustibles.

Dicha metodología favorece a las mezclas asfálticas en su compactación, adherencia y trabajabilidad a diferencia de las mezclas asfálticas tradicionales, sin modificar los instrumentos de elaboración.

La aplicación de estas metodologías presenta algunas ventajas como:

- Reducción de combustibles.
- Reducción del consumo de energía.
- Llega a entrar en operación en menor tiempo.

Figura 1.1. Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura



Fuente: (Calderón, 2011)

1.2. Introducción

Ante la necesidad que presenta el ser humano de moverse de un lugar a otro ya sea por razones de carácter económico y social, es necesario brindar una red vial en la cual los usuarios tengan un trayecto deseado, por lo que hoy en día debido a estas nuevas exigencias de las personas se han realizado nuevas investigaciones de metodologías de mezclas asfálticas que brindan beneficios tanto para el medio ambiente y su elaboración.

Este tipo de metodologías favorecen al medio ambiente, minimizando las emisiones de CO₂, la degradación de la eficacia del aire y habilidad de ajuste de la constitución de las mezclas asumiendo las condiciones y agregados adecuados de cada región, esto ayuda a disminuir el uso de la energía y el precio de elaboración.

En el ámbito económico se debe presentar redes viales en buen estado, sin deterioro de tal manera evitaremos viajes de tiempos elevados con lo cual se disminuirá recursos y costos a la sociedad.

Conoceremos los beneficios que presentan las mezclas asfálticas tibias en comparación a las convencionales las cuales son disminución de temperatura, reducción del consumo de energía llegando a mejorar las características del pavimento en la compactación, adhesión y la disminución de la contaminación ambiental.

La aplicación de los aditivos químicos se obtendrá en el transcurso de la investigación de acuerdo a las metodologías de elaboración de mezclas asfálticas tibias de diferentes países latinoamericanos.

Estas tecnologías se han empezado a implementar con mayor constancia ya que busca minimizar la incidencia en la deformación permanente, agrietamiento térmico, fatiga, adhesividad y humedad que solían presentar los pavimentos convencionales

La contribución de las mezclas asfálticas tibias con la ayuda de la ingeniería civil es presentar nuevas metodologías de mezclas asfálticas mediante la aplicación de aditivos químicos haciendo reducir las temperaturas de mezclado y compactación, beneficiando la trabajabilidad al momento del tendido del asfalto.

Al referirnos a las mezclas asfálticas tibias y a la aplicación de nuevos métodos de investigación para la elaboración (MAT) mezclas asfálticas tibias haciendo posible mejorar ciertas características, mejor fluidez el asfalto a menor temperatura, reducción de viscosidad a menor temperatura de tal manera que se trabajara con los agregados con dicha temperatura.

Al trabajar con mezclas asfálticas tibias tenemos una reducción de temperatura en un rango entre 30 a 75°C, esta disminución depende del tipo de aditivo químico que se utilice para la fabricación. Esta técnica da una notable disminución de temperatura al fabricar y compactar.

La finalidad de la elaboración de este trabajo es comparar procesos constructivos y la fabricación de mezclas asfálticas tibias utilizando diferentes aditivos químicos de distintos países latinoamericanos con los cuales podamos analizar y comparar técnicas de fabricación e implementación, demostrando los beneficios de esta mezcla a diferencia de las mezclas asfálticas en caliente.

1.3. Antecedentes

A principios de 1800, en Francia, comenzó a implementarse en pisos, aceras y puentes la conocida piedra asfáltica. Luego John Mcadam en Londres inició a elaborar pavimentos con piedra compactadas, friccionadas entre sí; la cual tuvo una gran importancia en el progreso de la vialidad. En el año 1869, en Londres se construyó el primer pavimento asfáltico compactado. Hasta finales de la época de 1800 esta nueva tecnología se había implementado en Europa y Estados Unidos (García, 2010).

Desde los comienzos del instituto del Asfalto en 1919 y luego de unos años después de la AASHTO, no han parado las investigaciones sobre el Asfalto, su mecánica y química, cómo elaborarlo, obtener una durabilidad y economía. También es significativo insistir en el desarrollo de la vialidad en general, su desarrollo es fundamentado por los vehículos a motor y por el incremento de los mismos, ya que a mayor carga es una mayor exigencia para la estructura de un pavimento (García, 2010).

En el año 1997, mediante un tratado elaborado por la comunidad económica europea se empezó a elaborar nuevas tecnologías y técnicas conocidas como mezclas asfálticas tibias debido a los gases (efecto invernadero) que presentan las mezclas asfálticas calientes. En el año 2004, fueron implementadas las mezclas asfálticas tibias en el World Asphalt Show & Conference por la National Asphalt Pavement Association conjunto con la Federal Highway Administration con la finalidad de reducir la contaminación ambiental (Rodríguez, 2014).

Se han usado las mezclas asfálticas tibias exitosamente en distintos países llegando a evidenciar investigaciones desde el año 1956 elaboradas por el profesor Ladis H. Csanyi, el cual realizó investigaciones sobre el porcentaje de betún espumado para usarlo como un ligante hacia el suelo, para el año 1968, los derechos de la investigación Csanyi fueron

adquiridos por Mobil Oil Australia llegando a modificar el proceso original el cual incluía vapor al betún caliente sustituyéndolo por agua fría (Rodríguez, 2014).

Debido a la necesidad de trabajar con menores temperaturas se implementaron los diferentes tipos de mezclas tibias que se conoce actualmente y se ha obtenido grandes ventajas por facilidad de trabajo y disminución de la contaminación ambiental en diferentes países (García, 2010).

En Colombia se comienza a realizar las investigaciones por el año 2015 debido al aumento de emisiones de gases tóxicos de métodos tradicionales (mezclas asfálticas calientes) es por eso que se realizan investigaciones con aditivo de aceite de palma para evitar la emisión de contaminantes.

En el 2016, en Perú surge la necesidad frente a las condiciones industriales y se ve sometido a los cambios climáticos, es por eso que se ve obligado a fomentar nuevas técnicas de investigación como en este caso las mezclas asfálticas tibias.

En Ecuador por la falta de investigación todavía no se encuentran registros aplicados a las nuevas técnicas (mezclas asfálticas tibias) implementadas por varios países de Latinoamérica, los únicos registros que presentan son mediante ensayos de laboratorio.

En Argentina, se han analizado los primeros estudios en campo de las mezclas asfálticas tibias en campo que datan desde el año 2005. Hasta el año 2010 se han realizado diferentes estudios tanto en laboratorio como en obra dando buenos resultados y beneficios.

1.4. Justificación

El análisis a desarrollarse es enfocado a nuevas metodologías de mezclas asfálticas tibias aplicadas en distintos países latinoamericanos con la finalidad de llegar a implementar dichas metodologías al Ecuador, el estudio será desarrollado estrictamente de manera bibliográfica ya que por motivos de la pandemia (COVID-19), se dificulta realizar dicha investigación en laboratorios de ingeniería.

El estudio que se realizará se enfocará en las mezclas asfálticas tibias con la presencia de aditivos químicos, ya que en algunas obras de pavimentación asfáltica en distintos países se acostumbra a la elaboración de mezclas asfálticas en calientes las cuales al momento de producción y colocación generan contaminación.

Las distancias desde las plantas asfálticas hasta el lugar de emplazamiento de la obra en ciertas ocasiones suelen ser muy distantes por lo que en el caso de presentar mezclas asfálticas en calientes se pueden llegar a perder algunas características del material es por lo que la producción de las mezclas asfálticas tibias es adecuada para ser transportadas a grandes distancias sin llegar a perder sus propiedades.

La producción de las mezclas asfálticas tibias ayuda a evitar la presencia de un envejecimiento prematuro con respecto a las mezclas asfálticas en caliente cumpliendo con la normativa de adherencia y pretendiendo disminuir la emisión de gases tóxicos.

Los aditivos químicos con los que se lleva a cabo esta investigación se los considero en cuatro países latinoamericanos (Ecuador, Colombia, Perú y El Salvador), se ha tomado en consideración dichos países ya que son los países en los cuales se encuentran implementando nuevas tecnologías en la elaboración de mezclas asfálticas mediante la aplicación de aditivos químicos, los aditivos más común mente utilizados en cada país son: Zycotherm, Rediset, Husil, Quimibond y Evotherm.

De tal manera este análisis ayudará a comprender el comportamiento de las mezclas asfálticas tibias en distintos países con diferentes porcentajes de aditivos y optimizar la colocación de las mezclas asfálticas.

1.5. Alcance

Para esta consulta bibliográfica, se realizará el análisis comparativo entre los aditivos químicos QUIMIBOND, ZYCOTHERM, REDISSET, HUSIL, EVOTHERM en pavimentos flexibles de mezclas asfálticas tibias en los países de Ecuador, Colombia, Perú y El Salvador.

De igual manera se realizará la comparativa de la aplicación de dichos aditivos con la finalidad de conocer la eficiencia de cada uno, los porcentajes adecuados para obtener mezclas asfálticas tibias que presenten un mejor rendimiento a diferencia de las mezclas asfálticas convencionales (MAC).

Del mismo modo la comparación se realizará con guías obtenidas previamente en los países anteriormente nombrados determinando la temperatura de trabajo y compactación necesaria para las mezclas asfálticas tibias.

En función de la consulta bibliográfica obtendremos cual es el mejor aditivo en relación a costos, beneficios ambientales, mejor trabajabilidad en tendido y compactación.

1.6. Planteamiento del problema

En la actualidad existen distintos tipos de aditivos los cuales se han desarrollado por países o regiones lo cual nos permite realizar un análisis comparativo de dichos elementos.

La contaminación por la que nos encontramos pasando hoy en día y por un historial que venimos viviendo desde la época de los 80 nos obliga a tomar medidas e innovar nuevas técnicas para generar sostenibilidad ambiental y generar mitigación hacia el cambio climático.

Uno de los principales factores a nivel global es el sector del transporte ya que representa el 80 por ciento de las emisiones de CO y un 40% de las emisiones de CO₂, por lo que es considerado una de las principales fuentes de contaminación en el medio urbano.

En el transcurso de los años se ha evidenciado la deficiencia de la red vial que presenta el Ecuador, haciendo inversiones muy altas en el ámbito de pavimentos rígidos a comparación de los pavimentos flexibles que son poco durables en su capa de rodadura debido al envejecimiento temprano, por lo que nos obliga a implementar nuevas tecnologías que sean más amigables con el medio ambiente y así mismo reduciendo los costos de producción e implementación.

Figura 1.2. Emisiones con diferentes grados de



Fuente: (Calderón, 2011)

Como podemos observar la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente en comparación de las mezclas asfálticas tibia presentan una gran diferencia al momento la elaboración por las emisiones de gases, es por eso que, gracias a las preocupaciones medioambientales y a las nuevas tecnologías, se las han considerado menos perjudiciales para el medio ambiente.

Como ya se ha mencionado existen muchos beneficios que trae la aplicación de estas nuevas metodologías, pero las que más destacan es la disminución de combustibles y energía ya que estas son las principales emisoras de contaminantes que están perjudicando al planeta.

Otra de las razones fundamentales que se debe de calentar los agregados a altas temperaturas es que los agregados puedan trabajar totalmente cubiertos por las partículas y fluyen de mejor manera, es por eso que la aplicación de los aditivos químicos llegan a obtener las mismas características trabajando con menor temperatura.

En los países ya mencionados el tipo de mezcla asfáltica empleado principalmente son mezclas asfálticas en caliente las cuales son las causantes de un aumento de contaminación generados por gases tóxicos, por las altas temperaturas que trabaja dicha mezcla.

Hoy en día existen entidades reguladoras más estrictas de la contaminación por las cuales se han desarrollado nuevas técnicas de mezclas asfálticas como las mezclas asfálticas tibias implementando aditivos químicos (QUIMIBOND, ZYCOTHERM, REDISSET, HUSIL, EVOTHERM) que nos permiten producir con menores temperaturas, minimizando la contaminación ambiental y llegando a mejorar algunas propiedades de la carpeta asfáltica.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Analizar y comparar bibliográficamente procesos de elaboración, costos y el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tibias utilizando cinco aditivos químicos diferentes en cuatro países latinoamericanos.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Determinar los diferentes porcentajes utilizados de aditivos químicos en la elaboración de las mezclas asfálticas tibias.
- Comparar los distintos métodos de elaboración de la mezcla y compactación en los diferentes países.
- Determinar los beneficios de la utilización de mezclas tibias en los diferentes países analizados.

Capítulo II

2.1. Marco Teórico

2.2. Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas también denominadas como aglomerados, se encuentran conformadas por la mezcla de un ligante (hidrocarbonado) y la combinación de áridos, llegando a cubrir totalmente a los áridos por una película continua de dichos ligantes, se lo puede elaborar de manera mecánica en centrales móviles y fijas.

Luego de la elaboración de las mezclas asfálticas se procede a transportar al lugar de la obra para su debida extensión y compactación, hoy en día no solamente las mezclas asfálticas se las puede aplicar a pavimentos de calles o carreteras sino también en superficies industriales, aeropuertos y pistas deportivas (Kraemer et al., 2004).

En los pavimentos se busca obtener una respuesta estructural adecuada llegando a soportar las solicitaciones del tráfico y bajas deformaciones, esto dependerá de las proporciones de los componentes de los materiales aplicados y de la resistencia que se desee alcanzar (Yepes Piqueras, 2014).

2.2.1. Estructuras de las Mezclas Asfálticas

La mezcla asfáltica es compuesta por materiales pétreos los cuales son la arena, grava y piedra, estos materiales conforman la mezcla asfáltica, también el asfalto es uno de los principales componentes que es definido como un material ligante es reconocido por su singularidad de color negro y marrón oscuro, este material es obtenido en gran parte por betunes naturales (VISE, 2016).

2.2.2. Agregados

El agregado también conocido como árido en ingeniería civil es una masa de piedra triturada, arena, grava. Compuesta fundamentalmente por sus partículas individuales, pero en algunos casos ha llegado a encontrar algunos sedimentos y arcillas. El agregado no solo sirve para el área de pavimentos sino también para algunas áreas de construcción (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Los agregados lo podemos encontrar en ciertas canteras de piedra o grava y en ciertos depósitos fluviales. Se conoce que la grava proviene de depósitos fluviales y canteras, mientras que la roca triturada es un proceso de rocas extraídas de ciertas canteras. Según los geólogos las rocas son clasificadas en tres grupos los cuales son: sedimentarias, metamórficas e ígneas.

2.2.3. Ligante o Betún Asfáltico

Se considera asfalto a la combinación de hidrocarburos de distintos pesos moleculares, el asfalto depende fundamentalmente de su composición química y de la adecuada distribución de los distintos hidrocarburos.

A temperatura ambiente el asfalto se comporta como un material duro y viscoso por lo que al momento de convertirse en cemento asfáltico (semi sólido) y mezclarlo con aglomerantes es necesario que sea debidamente calentado (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

2.2.3.1. Uso del Ligante

El asfalto es usualmente utilizado en el ámbito de la construcción de carreteras y mantenimientos viales, incluso se lo ha llegado a utilizar en la impermeabilización y sellado de algunos componentes estructurales, dependiendo del clima y la región en la que se

encuentre trabajando se procederá a determinar el tipo y calidad del asfalto (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Figura 2.1. Uso del ligante



Fuente: (Mamlouk & Zaniewski, 2009)

2.2.4. Propiedades del Asfalto

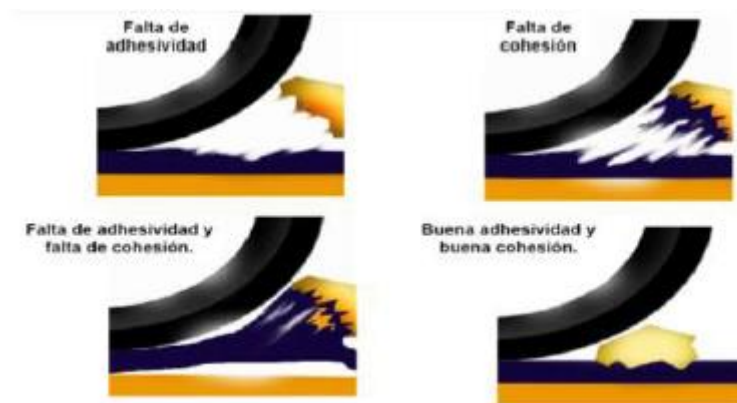
Antiguamente las refinerías no cambiaban las fuentes de abastecimiento de crudo muy a menudo, ya que el intercambio de crudo en el mercado no era muy habitual. Esto permitió que las fuentes asfálticas tengan las mismas características. Las nuevas fuentes de abastecimiento de crudo hacen que existan nuevas variaciones en las propiedades del asfalto como son físicas y químicas. Ante la presencia de estas nuevas variaciones es necesario evaluar al asfalto en condiciones particulares hasta poder llegar a predecir el rendimiento que presentará debido a sus propiedades geológicas. Aunque existan estas variaciones tanto en las propiedades físicas y químicas hay ciertas propiedades que no varían, es por eso que se ha considerado que las principales propiedades físicas del betún tanto para mantenimientos de carreteras y diseño de construcción son: la susceptibilidad térmica, cohesión, adhesión y durabilidad.

2.2.4.1. Adhesión y Cohesión

Cohesión es una propiedad del asfalto el cual permite que las partículas de agregados se mantengan firmes en el pavimento acabado. Adhesión es la propiedad del asfalto el cual permite tener una mejor adhesión al agregado, en la mezcla del pavimento.

El asfalto debe tener la capacidad de mezclar a los agregados, obtener cohesión para la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua, este hecho perjudica al asfalto ya que presenta una separación con el agregado produciendo una disminución de la cohesión de la mezcla (Linares et al., 2010).

Figura 2.2. Acción de desmenuamiento del agua



Fuente: (Linares et al., 2010)

2.2.4.2. Susceptibilidad Térmica

Una de las propiedades principales que presenta el asfalto es la susceptibilidad térmica, ya que se conoce que todos los betunes son termoplásticos esto nos quiere decir que si el asfalto se presenta de manera blanda y menos viscosa es porque su temperatura aumenta a diferencia que si se encuentra de manera dura más viscosa es ocasionada cuando su temperatura disminuye, a esto fenómeno se lo conoce como susceptibilidad térmica.

Es muy importante saber la susceptibilidad con la temperatura se encuentra trabajando, ya que es la que nos brindara cual es la temperatura a la cual se debe de elaborar

la mezcla del betún con los agregados y la temperatura más recomendable a la cual debe de ser compactada la mezcla al momento de tenderla en la vía.

Otro punto muy importante que debe presentar el asfalto es que sea susceptible a la temperatura indicada ya que debe presentar ciertas condiciones tales como fluidez a altas temperatura para que cubra totalmente a los agregados mientras se encuentran mezclando de tal manera se distribuirán de mejor manera las partículas al momento de realizar la compactación. Continuamente debe de ser lo suficientemente viscoso ya que al momento que se encuentre a temperatura ambiente mantenga unidos los agregados ya compactados.

2.2.4.3. Durabilidad

Es la propiedad del asfalto en la cual podemos analizar la duración de las características iniciales cuando es propenso a métodos normales de envejecimiento y degradación. Esta propiedad es calificada de acuerdo al comportamiento del pavimento con el paso del tiempo.

El comportamiento del pavimento está sujeta a las características del árido, al diseño de la mezcla y a la elaboración en la construcción, estos componentes son los principales influentes en la durabilidad del betún. No obstante, podemos realizar pruebas las cuales puedan analizar la durabilidad del asfalto.

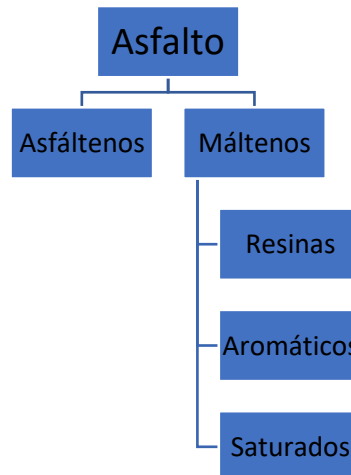
2.2.4.4. Propiedades Químicas del Asfalto

Las propiedades químicas del asfalto son especiales ya que son reversibles como material de construcción de carreteras.

Principalmente, el asfalto está combinado por diferentes tipos de aromáticos y composición de heterocíclicos que comprenden de azufre, hidrocarburos parafínicos, oxígeno y nitrógeno; en su mayoría son solubles en sulfato de carbono. El asfalto, al momento de ser

diluido en un solvente como el heptano, puede dividirse en dos tipos como: máltenos y asfáltenos (Linares et al., 2010).

Figura 2.3. Composición del Asfalto



Fuente: (Linares et al., 2010)

- Los asfáltenos considerados compuestos muy pesados por lo que son de mayor punto de ebullición, son compuestos químicos y orgánicos ya que una vez separados de los máltenos se caracterizan por ser de color pardo oscuro o negro dando la apariencia a un polvo grueso de grafito, son los que le dan su color y dureza al asfalto de tal manera que se encuentran disueltos en los máltenos siendo la fase no continua del asfalto (Linares et al., 2010).
- Máltenos, en cambio los máltenos son considerados líquidos viscosos que llegan a formar la fase continua del asfalto, estos se encuentran mayormente relacionados a las propiedades mecánicas que presentan los asfaltos, usualmente las porciones de máltenos son mayores en comparación a la de los asfáltenos en el asfalto. Son aquellos que brinda de gran calidad a un asfalto debido a su composición química y naturaleza es por eso que se han subdividido en:

- Aromáticos: este compuesto se lo puede identificar como un líquido viscoso de tono negrozco, este puede facilitar la admisión de polímeros modificadores que contiene un asfalto. Los aromáticos conforman el 40% al 65% del total del asfalto.
- Resinas: esta tiene la propiedad de adherirse al asfalto, mediante las moléculas intermediarias del asfalto. El tono es negro y se las puede identificar como semisólidos y sólidos.
- Saturados: se las puede identificar como aceites viscosos de una tonalidad amarillenta, en la cual podemos ver a los máltenos y asfáltenos flotar como islas.

Figura 2.4. Estructura coloidal del asfáltenos



Fuente: (Linares et al., 2010)

Las cantidades de estos compuestos (máltenos y asfáltenos) pueden variar dependiendo del espesor de película que deseamos en los agregados, también del tipo de áridos que usemos en la mezcla y de algunos factores extras como la luz, temperaturas muy altas y el oxígeno (Linares et al., 2010).

2.2.5. Características de las Mezclas Asfálticas

La mezcla asfáltica es caracterizada por la mezcla de un aglomerante semisólido o solido se distingue de pardo oscuro o negro, que se suaviza cuando la temperatura va subiendo progresivamente, los principales componentes son los hidrocarburos pesados y los

agregados gruesos y finos. Ya que estos se adquieren de la refinería del petróleo (Flores & Rojas, 2019).

Figura 2.5. Mezcla asfáltica



Fuente: (Flores & Rojas, 2019)

2.2.6. Propiedades Volumétricas de las Mezclas Asfálticas Convencionales

Las mezclas asfálticas en caliente están compuestas alrededor de 95% agregados (fino, grueso, medio) y 5% de cemento asfáltico. Esta mezcla asfáltica tradicional trabaja a temperaturas que bordean los 150°C.

2.2.6.1. Densidad de la Mezcla

La mezcla asfáltica tiene una densidad que se la conoce como una masa de mezcla por unidad de volumen. En el transcurso de elaboración de la mezcla asfáltica caliente el (Asphalt Institute, 2014) define que:

Las principales densidades importantes son la máxima densidad y la densidad Bulk son medidas en el transcurso de elaboración de diseño de la mezcla, es necesario estos valores ya que nos permiten calcular el porcentaje de vacíos de aire obtenidas de muestras mientras estaba en su proceso de fabricación del diseño.

2.2.6.2. Porcentaje de Vacíos o Vacíos de Aire

El envejecimiento de una carpeta asfáltica depende de la mezcla in situ que nos proporciona el porcentaje de vacíos de aire. La mezcla puede tener menor permeabilidad al

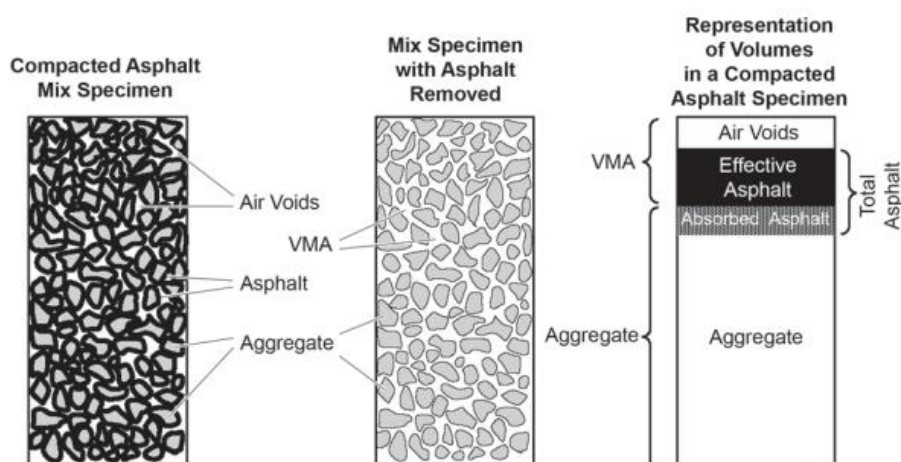
tener menor cantidad de vacíos de aire. Al obtener una mayor cantidad de vacíos permite que el agua atraviese a la mezcla, por este motivo produce daños a la carpeta asfáltica. Cuando se obtiene una cantidad super baja lleva a producir ahuellamiento, exudación y corrugación (Asphalt Institute, 2014).

2.2.6.3. Vacíos en el Agregado

Dado que los diseños de mezcla generalmente apuntan a un 4 por ciento de vacíos de aire, los huecos en el agregado mineral (VAM) deben permanecer lo suficientemente altos para lograr un adecuado espesor de la capa de asfalto, lo que nos permitiría obtener una durabilidad del pavimento asfáltico. En la presencia de las mezclas asfálticas calientes los valores de VAM inferiores al mínimo tendrán películas delgadas de asfalto y proporcionarán un pavimento de HMA con baja durabilidad (Asphalt Institute, 2014).

2.2.6.4. Vacíos llenos de asfaltos

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) que se encuentra lleno de ligante asfáltico. VAF se utiliza con el fin de obtener el espesor de la capa de asfalto en la mezcla. La duración de la mezcla será pobre al obtener muy bajos VAF, por otro lado, si esta tiene muy alto la mezcla se vuelve inestable. Para tener un rango aceptable dependerá mucho del tráfico. Por ende, al obtener tráfico pesados se solicitan bajos VAF, por el contrario, al obtener un tráfico ligero se solicita un mayor VAF para que la duración de la mezcla asfáltica en caliente pueda ser mayor, sin embargo, puede causar una mezcla blanda expuesta a la exudación (Asphalt Institute, 2014).

Figura 2.6. Vacíos en mezclas HMA compactadas

Fuente: (Asphalt Institute, 2014)

Tabla 2.1. Porcentaje mínimo de VAM

Tamaño Máximo de Partículas Nominales	VAM, mínimo porcentaje			
		Porcentaje de vacíos de aire de diseño		
Mm	Plg	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19	20	21
4.75	No.4	16	17	18
9.5	3/8"	14	15	16
12.5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	1.5	10	11	12
50	2	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9	10	11

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

2.2.6.5. Contenido de Asfalto

Para establecer en gran medida el comportamiento de la mezcla, se la puede obtener mediante la relación entre las características del porcentaje de asfalto y el material granular, con esto se demuestra que la repartición de los materiales es interdependiente.

La superficie del área de los agregados, su tamaño y el porcentaje de absorción se la puede relacionar con el porcentaje de asfalto en la mezcla. Las mezclas que necesitan mayor asfalto son las que presentan mezclas con altas cantidades de agregado fino. Las cantidades de asfalto se requiere que sean altos cuando el porcentaje de material pasante del tamiz 200 son muy altos. Cuando se reduce el asfalto que cubre la superficie es debido a que los agregados tienen altos porcentajes de absorción, debido a esta reducción de asfalto se debe proporcionar suficiente asfalto que sea capaz de envolver las superficies de los agregados con una capa delgada (Asphalt Institute, 2014).

2.2.7. Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Conocido por sus siglas en inglés Hot Mix Asphalt (HMA), es una combinación del cemento asfáltico, agregados y filler el cual es un polvo mineral con la función de rellenar los vacíos en las mezclas asfálticas. Usualmente las temperaturas de las mezclas asfálticas en caliente varían entre 140° y 180°C (Flores & Rojas, 2019).

2.2.8. Mezclas asfálticas tibias (MAT)

Las mezclas tibias son conocidas como aquellas que se elaboran a menores temperaturas que las mezclas asfálticas en caliente, la temperatura puede variar entre los 100°C y 135°C, para la elaboración de estas mezclas es necesario la aplicación de nuevas tecnologías por lo cual se puede elaborar y colocar los componentes asfálticos a temperaturas menores con respecto a los métodos convencionales aplicados antiguamente. Este método se lo empleó por primera vez en Europa, frente a la necesidad de obtener mezclas asfálticas bituminosas que nos brinden economía de energía con el mismo desempeño de una mezcla asfáltica bituminosa en caliente (Conrado & Córdoba, 2013).

Las mezclas asfálticas en caliente son producidas a una temperatura entre los 135° y los 180° llegando a generar grandes cantidades de contaminación por lo que en la actualidad

la industria de la construcción se enfoca en generar menos componentes contaminantes con la reducción de la temperatura con las mezclas asfálticas tibias (Conrado & Córdoba, 2013).

Las características principales con las que podemos caracterizar a las mezclas asfálticas son mediante la compactación y la temperatura de la mezcla. Por medio de esto se genera varios conceptos para establecer qué se entiende por la mezcla asfáltica tibia.

La mezcla asfáltica tibia (WMA) es una mezcla modificada que puede llegar a reducir las temperaturas de compactación y mezclado mediante el uso de diferentes aditivos, el cual nos permite tener una mezcla asfáltica tibia sin cambiar la calidad como el de la mezcla asfáltica sin modificar (A. Rondón et al., 2017).

Los investigadores creen que la reducción de la temperatura de elaboración en una planta asfáltica la mezcla debe ser de 40 °C, por otro lado, Bonaquist, R. menciona que la mezcla debe tener una temperatura mínima de 28°C para poder denominar la mezcla asfáltica tibia. Al tener una disminución en la compactación y mezclado también se disminuye la energía para la fabricación de la mezcla y de las emisiones a la atmósfera (A. Rondón et al., 2017).

2.2.8.1. Aditivos

Los aditivos de las mezclas asfálticas son mejoradores de adherencia lo que ayuda que trabaje mejor en la interface asfalto – agregado y estos aditivos se sitúan en el fragmento lipofílica al asfalto, similar a grupos polares de la fracción hidrofílica produce una agrupación con los carbonatos y silicatos que se presentan en la superficie del agregado, es decir, que los aditivos crean una relación química entre el asfalto y el agregado incrementando la resistencia a la acción del agua.

Los productos que dan una mejor adherencia son aquellos productos que tienen un mejor enlace químico en la mezcla asfáltica, lo que ayuda a tener un mejor desempeño. Estos

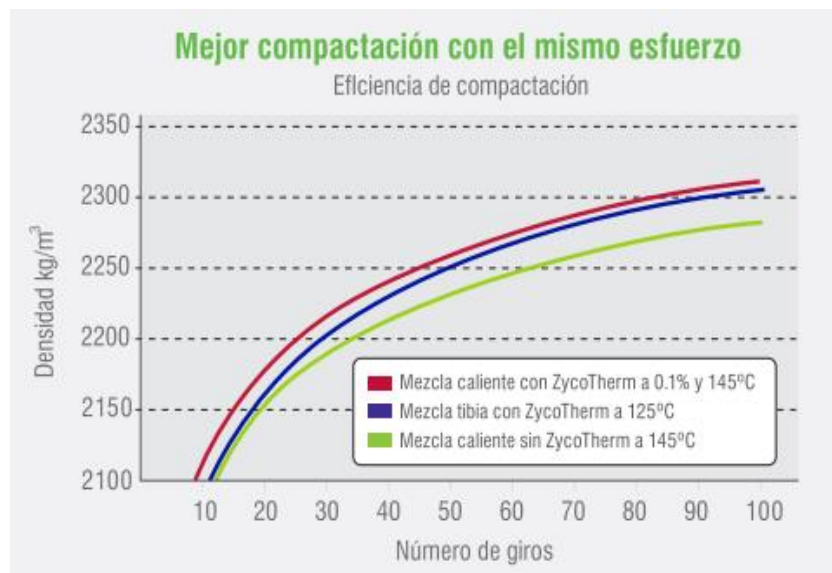
aditivos son conocidos como productos tensoactivos. Lo que permite que los tensoactivos incidan superficialmente sobre las propiedades del sistema (Escobar & Tunala, 2019).

2.3. Aditivos de Mezclas Tibias

2.3.1. Zycotherm

Esta tecnología está compuesta por organosilanos de segunda generación que reaccionan químicamente, la cual nos permite reducir las temperaturas de 10 – 30°C, economizamos considerables cantidades de combustibles. Mejoran la adherencia entre el asfalto y el agregado, permitiendo tener una mejor resistencia a la fatiga (Zydex Inc., n.d.).

Figura 2.7. Eficiencia de compactación.



Fuente: (Zydex Inc., n.d.)

Tabla 2.2. Especificaciones del Zycotherm

Características ZYCOTHERM	
Apariencia	Líquido amarillo pálido
Densidad (25 °C)	1,01 g/mL
Punto de congelación	5-7 °C
Viscosidad a 25 °C	Menor a 300cps
Solubilidad	soluble en agua
Flamabilidad	Inflamable a 80 °C

Fuente: (Zydex Inc., n.d.)

Ventajas

- Conservación en contenido de asfalto (3-4kg/Tn de mezcla)
- Mayor recubrimiento y mejor compactación
- Amplificación de la temporada de pavimentación
- Mejora la sensibilidad del agua
- Asfalto resistente a la sal
- Aumenta la cohesión asfalto-árido
- Amigable con el medio ambiente

Beneficios

- Disminuye la adhesividad de la mezcla al colocar en las volquetas y en los rodillos de compactación con una temperatura de 90 °C. Por otra parte, se puede obtener una mejor trabajabilidad al colocarla y compactarla.
- Minimiza el consumo de combustible, al trabajar a temperaturas bajas en 35 °C lo cual permite ahorrar combustibles en un 20-25%, esto ayuda a tener una mejor transportación a largas distancias y permitiendo tener una trabajabilidad en condiciones frías de 0°C-5°C.

- Desarrolla una mejor compactación en el campo con una temperatura hasta los 90 °C, da la certeza de obtener densidades consistentes al pasar el rodillo en una misma cantidad de pasadas en el momento de la compactación.
- Excluye la peladura, la reactividad con los agregados es promovida por tener una menor temperatura de mezcla causada por el agua residual que está presente en los agregados, esta soporta seis horas o más del ensayo de hervido, con cobertura retenida de un 95%.

Dosificación del Zycotherm

- Es recomendable dosificar del 0.05-0.1%, en función del peso de la mezcla asfáltica.

Mezclado

Este aditivo se puede trabajar por inyecciones por goteo antes que el tanquero cargue en la refinería. Y después al momento que el asfalto sea almacenado en la planta, deben recircular el tanque para lograr un mejor mezclado.

2.3.2. Quimibond

Es un aditivo químico líquido que está compuesto por aminas brindando una alta adherencia en la mezcla asfáltica (el asfalto y el agregado), cuyo beneficio es impedir la creación de bolsas de agua para tener una mejor adherencia del agregado al cemento asfáltico. Este aditivo mejora la trabajabilidad de la mezcla asfáltica. El Quimibond 3000 está compuesto por ingredientes que tienen una mejor cohesión del pavimento por mucho tiempo, considerado como uno de los aditivos más fáciles de dosificar ya que no se tiene que calentar y evita gases tóxicos (QSI Perú S.A., 2019).

Tabla 2.3. Propiedades del Quimibond 3000

Color	Café oscuro
Apariencia	Líquido – Viscoso
Densidad	0.93 – 0.97 kg/l
Dosificación	0.3 % - 0.8 % del total del peso del cemento asfáltico.

Fuente:(QSI Perú S.A., 2019)

Tabla 2.4.Datos técnicos de Quimibond 3000

Determinación	Contenido
Color	Azul
Contenido de Aminas	400 - 600
Propiedades Físicas a 25° C	Líquido
	2000 - 6500
Viscosidad a 25° C	cs
Aminas	563 Aprox 0.95
Gravedad Especifica	promedio
Gasolina	Insoluble
Agua	Soluble
Alcohol Isopropilico	Soluble

Fuente:(QSI Perú S.A., 2019)

Uso de Quimibond 3000

Para el uso de Quimibond 3000 no es necesario agitarlo o calentarlo por lo que lo convierte en un material más sencillo de dosificar, la dosificación del aditivo varía dependiendo del peso del cemento asfáltico el cual se encuentra en los rangos del 0.3 % al 0.8 %, este aditivo se lo puede aplicar directamente desde el tanque de almacenaje o por un procedimiento de inyección en la carga de la mezcla asfáltica.

Manejo y Precauciones

Esta clase de aditivos debe permanecer almacenado en su envase original donde no exista humedad por ende debe de ser un lugar seco y debe contar con exposición al calor.

Se debe mantener lejos del contacto directo con las personas como los ojos, piel y vías respiratorias. En el caso de tener alguna clase de contacto de los ya mencionados lavar directamente con agua o caso contrario acudir a una hoja de seguridad del producto.

2.3.3. Rediset™ WMX

Es una tecnología para las mezclas asfálticas tibias que permite reducir la temperatura de mezcla y compactación en aproximadamente en 30 °C, permite una mejor adherencia, reduce el ahuellamiento, aplaza el proceso de peladura en la carpeta asfáltica y aumenta la Fuerza de Cohesión de la Mezcla.

Como se ha ido mencionando que por la alta demanda de proyectos viales se ha incrementado la emisión de gases de carbono al fabricar el asfalto. Por lo cual se inicia la fabricación con baja energía y la elaboración de la vía con alta durabilidad ya que estos inciden ampliamente con el medio ambiente con el proceso constructivo. La elaboración de mezclas tibias minimiza las altas emisiones de carbono y el consumo de combustible, tal como el aerosol o vapor que se producen en la elaboración del asfalto (Aponte & Beltran, 2013).

Por esta razón se crea un factor relevante como el Rediset™ WMX, este aditivo tiene una mejor trabajabilidad ya que se puede colocar a temperaturas más bajas, la principal característica es la compactación de la mezcla asfáltica. Dicho aditivo nos garantiza una mejor adherencia del asfalto con el agregado, es flexible al tener una gradación más amplia

de agregados, también nos permite tener una larga vida a las vías frente a los efectos del tiempo y la humedad.

Características principales del Rediset™ WMX

- Se obtienen mejores resultados en bajas temperaturas, que son inferiores a los 30 °C, puede ser muy factible para trabajar con dificultosas tecnologías como asfaltos modificados con mezclas con grano de caucho reciclado y polímeros.
- Tiene un mejor desarrollo de estabilidad térmica, por lo que el asfalto puede ser manejado en caliente, este aditivo permite tener dos semanas almacenado al ligante sin ninguna consecuencia negativa.
- En comparación con otras tecnologías esta nos permite tener una mejor trabajabilidad y compactación con la mezcla asfáltica tibia al momento de colocarla.

Rediset™ WMX este aditivo nos permite reducir la temperatura de compactación y mezclado, esta también nos facilita una mejor trabajabilidad en la compactación. Tiene una gran investigación en proyectos de todo el mundo y él ha confirmado que tiene una gran capacidad para optimizar significativamente. Es importante tener en cuenta que una mezcla en campo de la compactación que esté por fuera del intervalo especificado por la densidad de diseño esto puede ocasionar daños por la humedad, deformación temprana del pavimento, y la minimización de su vida útil (Aponte & Beltran, 2013).

Cuando se adhiere el Rediset™ WMX al cemento asfáltico esta cambia las propiedades químicas de la mezcla lo que produce que tenga mayor facilidad para compactar. Este aditivo nos permite tener una mejor manejabilidad de la mezcla al instante de la compactación, en cantidades pequeñas como 1% en peso del ligante o un 0.06% por el peso de la mezcla asfáltica total. Este aditivo ha dado una mayor facilidad de compactación en mezclas difíciles de compactar (Aponte & Beltran, 2013).

Figura 2.8. Variaciones las emisiones al utilizar Rediset.



Fuente: (AkzoNobel, 2019)

Las principales características que el aditivo mejora en la mezcla asfáltica:

- Adhesión: Rediset™ WMX este aditivo ayuda a la relación en la adhesión entre el agregado y el asfalto lo cual evita la separación de estos llegando a aumentar la vida útil del pavimento.
- Adhesión activa: el agente de adherencia activa del aditivo nos permite cambiar la mezcla asfáltica para trasladar el agua de la superficie del agregado, esta también nos permite obtener un enlace químico fuerte entre el ligante y el agregado, lo cual puede ser resistente a la acción del agua.

Rediset™ WMX es sólido en representación de pastillas, este aditivo fue diseñado para no obtener un efecto negativo en el ligante en cuanto a altas y bajas temperaturas en sus propiedades. Este aditivo es muy importante ya que tiene la facilidad de trabajar con cualquier tipo de asfaltos, mezclas y agregados, lo que nos permite usar para cada tipo de mezcla asfáltica (Aponte & Beltran, 2013).

Figura 2.9. Aditivo REDISETTM WMX



Fuente:(AkzoNobel, 2019)

RedisetTM WMX para funcionar como una mezcla tibia de asfalto esta no requiere de agua, a diferencia de las mezclas de espuma, ya que esta nos permite tener las mismas propiedades de mezcla tibia al momento de acumular durante extensos ciclos de tiempo.

2.3.4. Husil

Es un aditivo químico líquido de material inorgánico que no se inflama, ya que este aditivo no es estimado como material contaminante o peligroso según el ‘‘ Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals’’ (Nations, 2011).

Husil nos permite minimizar la viscosidad del cemento asfáltico, este aditivo trabaja como una zeolita sintética.

Características principales del Husil

- Es un aditivo inorgánico.
- Es un aditivo no contaminante.
- Es un aditivo con valores entre 10 y 12 de PH.
- Es un aditivo no cancerígeno.

- Este aditivo se puede trabajar adhiriendo al cemento asfáltico en porcentajes que están entre 0.25% a 10% en relación al peso del cemento asfáltico.

2.3.5. Evotherm

Esta tecnología nos permite reducir de 50 a 75 °C las temperaturas para tener una mejor trabajabilidad en las mezclas asfálticas. Este aditivo es a base de agua que permite formar del asfalto una emulsión inversa, lo que produciría es una dispersión de agua en asfalto. No afectaría al grado PG del asfalto ya que se utilizará el mismo diseño que se usa en la mezcla caliente. Evotherm cambiaría las propiedades mecánicas de la mezcla, para la cual facilita un mejor trabajo constructivo tanto en la adhesión, compactación, trabajabilidad y envuelta de la mezcla elaborada a menores temperaturas (Méndez et al., 2014).

Existen varias clases de paquetes de Evotherm los cuales se encuentran disponibles para algunas variantes de áridos, la principal característica de cambio se encuentra en los agentes de adhesión este aditivo como ya se menciona nos permitirá reducir la temperatura en un rango de 50 a 75 °C tanto en la producción de la mezcla incluso en el extendido del material (Méndez et al., 2014).

Tecnologías de Evotherm:

Evotherm ET

- También conocido como Evotherm Emulsion Technology (ET) producida por Memeadwestvaco.
- Es una emulsión que permite al agua estar presente debido a que se compone como una emulsión asfáltica combinada por distintos productos químicos de esta manera se llega a reducir la fricción que se genera entre el agregado y el aglutinante.
- Mejor trabajabilidad de mezcla.

- Al momento de hacer contacto con la mezcla el agua se evapora y permanece solo el asfalto y los agregados.
- Se presenta de más misma manera que las mezclas asfálticas en caliente tanto en sus propiedades de recubrimiento y de color.
- Reducción de temperatura entre 50 y 75 °C.

Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT)

- De la misma manera es producida por Meadwestvaco.
- No es introducida como una emulsión.
- Este componente que envuelve al producto cuenta con un paquete químico que de igual manera se disuelve en agua.
- Es inyectado directamente en la línea del asfalto, en el momento previo de ser incorporado en la mezcladora.

Evotherm 3G (REVIX)

- Este aditivo es producido por Mathy Technology and Engineering Service y Paragon Technical Services.
- Se considera como una de las versiones libres de agua a diferencia de la tecnología de Evotherm DAT
- Rango de reducción de temperatura: 15 – 30 °C

La aplicación de Evotherm es muy amplia ya que se lo ha trabajado desde carreteras de tráfico bajo incluso a carreteras de tráfico pesado llegando a presentar un alto rendimiento a lo largo de 100 proyectos en distintos países del mundo, por lo que su uso se ha garantiza una durabilidad de 10 años con carga pesada sin presentar ninguna deformación (Méndez et al., 2014).

Capítulo III

3.1. Evaluación de los Resultados Mediante el uso de los Diferentes Aditivos.

3.2. Procedimiento General de Elaboración de Mezclas Asfálticas Tibias

3.2.1. Metodología experimental

Para poder llegar a conocer la metodología de elaboración de las mezclas asfálticas tibias es necesario elaborar ensayos de laboratorio, tanto para los agregados (agregado pétreo), cemento asfáltico y mezcla asfáltica, estos resultados que se obtienen de la elaboración de dichos ensayos deben ser comparadas con normas y especificaciones técnicas que corroboren su confiabilidad y validez.

3.2.2. Ensayos de agregados (agregado pétreo)

El agregado también conocido como agregado pétreo se caracteriza por la combinación de material granular fino y grueso, este material proviene de las zonas más cercanas de las que se pueda adquirir, de igual manera se debe de elaborar ensayos los cuales cumplan con las especificaciones para que sea un material apto para la elaboración de las mezclas

3.2.3. Ensayos del Ligante o Material bituminoso

Este ligante se lo clasifica por viscosidad y penetración las cuales muestran diferentes tipos de ensayo y requerimientos que debe de cumplir el bitumen según la norma de cada país latinoamericano.

3.2.4. Elaboración De Mezclas Asfálticas convencionales Según Método Marshall

La aplicación del método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall para pavimentos en el diseño de mezclas en el departamento vial del estado Misisipi en el cual se desarrolló varias investigaciones y estudios de correlación, con lo que se creó los primeros conceptos con los que se diseñaron mezclas asfálticas en caliente.

El método Marshall examina establecer el contenido óptimo de bitumen con la cual permita satisfacer el rango de valores de flujo y la estabilidad Marshall mínima.

Es utilizado el método Marshall ya que es conocido como uno de los métodos más aplicados en Latinoamérica y específicamente en Ecuador, por ende nos permitiría ejemplificar de mejor manera la comparación de procesos en los diferentes países latinoamericanos (Escobar & Tunala, 2019).

El método Marshall se realiza con especímenes de ensayo estándar con las siguientes dimensiones 102 mm de diámetro y 64mm de alto, estas muestras se realizan mediante un procedimiento para combinar, calentar y compactar mezclas de agregado y asfalto (ASTM D1559). Los principales aspectos del método Marshall con densidad -análisis de vacíos, flujo y la prueba de estabilidad de las muestras compactadas (Escobar & Tunala, 2019).

Al realizar el método Marshall es recomendable tener al menos tres muestras por cada porcentaje de asfalto. A las muestras se las realiza el ensayo de estabilidad y flujo después de haber obtenido su gravedad específica y porcentaje de vacíos. Luego de someter a los ensayos se obtienen los resultados con los cuales podemos graficar tendencia y establecer la interrelación que puede tener entre el porcentaje de asfalto y los parámetros a continuación:

- Densidad
- Vacíos de aire
- Estabilidad

Anterior al ensayo Marshall los especímenes tienen que estar lo suficientemente sumergidos en agua en una temperatura constante de 60°C. Luego se las retira y se extrae el exceso de agua de sus superficies.

Según (Asphalt Institute, 2014) determina que:

La velocidad de deformación constante de una carga de prueba, 51 mm por minuto, hasta que suceda la falla. El punto de falla se considera cuando logramos tener la lectura de la carga máxima. El valor de estabilidad Marshall es registrada por la fuerza total en Newtons (N) solicitada para producir la falla del espécimen. Durante el progreso de la prueba de estabilidad, este debe estar sostenido fijamente en posición sobre la varilla guía y apartar inmediatamente al observar que la carga se vaya disminuyendo, se deberá tomar la lectura y registrar. El valor del flujo de la muestra está dado por esa lectura, se representa en unidades de 0.25 mm (1/100 in.). El proceso en su totalidad desde cuando se aparta la briqueta del agua a 60 °C y el progreso del ensayo de estabilidad no debe sobrepasar los 30 segundos. La estabilidad se modifica para briquetas con espesor distinto a 63.5 mm.

3.2.4.1. Estabilidad y Flujo Marshall

Según (Asphalt Institute, 2014) establece que durante la velocidad constante de deformación se da la carga de resistencia máxima que se la conoce como la estabilidad. Por lo tanto, el flujo es la deformación (elástica) se la puede obtener mientras está en progreso el ensayo de estabilidad. El resultado del ensayo se puede representar con un gráfico de flujo Marshall vs. Estabilidad Marshall. Esta gráfica se la puede modificar restando la porción del flujo mientras se da el asentamiento del espécimen. Para establecer el comienzo preciso de la lectura del flujo, se debe trazar una línea tangente que enlace dos puntos de la curva de flujo-estabilidad, el cual debe representar el 75 por ciento y 25 por ciento de la estabilidad Marshall. No es necesario modificar cuando se utiliza un medidor de flujo y un anillo de

prueba, porque el medidor de flujo se ha “posicionado en cero” en una muestra de metal calibrado o en un disco de 4.00 in.

La mezcla se considera muy plástica o inestable, si el flujo en el contenido óptimo de asfalto se encuentra sobre el límite superior especificado. Por otro lado, si la mezcla se considera muy frágil, si el flujo se encuentra por debajo del límite inferior especificado. El grado del asfalto, la cantidad de aglutinante son los principales factores que dan los resultados del flujo y estabilidad.

Estos ensayos nos ayudan a determinar el porcentaje óptimo de ligante o asfalto el cual nos ayuda a proceder con la elaboración de las mezclas asfálticas tibias modificadas con aditivos químicos.

3.2.5. Elaboración de las mezclas asfálticas tibias

una vez obtenido el porcentaje óptimo de asfalto elaborado en las mezclas asfálticas en caliente que trabajan con una temperatura de compactación de 150 a 180 C, procedemos a la elaboración de las mezclas asfálticas tibias mediante aplicación de aditivos químicos las cuales trabajan con una temperatura de los 110 a 140 C, la aplicación y cantidad de aditivo depende de las especificaciones técnicas de los proveedores y del aditivo con el que nos encontremos trabajando.

3.3. Recopilación de la metodología de Ensayos de laboratorio de las mezclas asfálticas tibias

3.3.1. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Zycotherm en el Ecuador

3.3.1.1. Caracterización de los agregados

En la tabla 3.1. se muestran los valores obtenidos en los ensayos del material granular también conocido como material pétreo, dicho material proviene del sector de Guayllabamba en Ecuador utilizando la mezcla de los materiales gruesos y finos (Escobar & Tunala, 2019).

Tabla 3.1. Resultados de caracterización de los agregados (Ecuador)

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS			
Ensayo	Norma	Resultados	Cumple (SI/NO)
	ASTM		
Equivalente de arena para agregado fino	D2419	%SE=65	--
Gravedad específica del agregado grueso	ASTM C127	GE=2.56	--
Gravedad específica del agregado fino	ASTM C128	GE=2.39	--
Absorción agregado grueso	ASTM C127	SE=3.49	--
Absorción agregado fino	ASTM C128	SE=0.98	--
	ASTM		
Desgaste máquina de los ángeles	C131M	%p=38.62	SI
Desgaste por sulfatos agregado fino	ASTM C88	%Dg=0.9	SI
Desgaste por sulfatos agregado grueso	ASTM C88	%Dg=1.38	SI

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

- Según las especificaciones presentadas en la norma INEN 0860 se ha obtenido que el desgaste máximo para agregado grueso no debe superar el 40%.
- De la misma manera en la Norma INEN 0863 nos especifica que el desgaste por sulfatos en los 5 ciclos de inmersión no puede ser superado del 12%.

3.3.1.2. Ensayos de Asfalto

El material que se va a utilizar es un cemento asfáltico AC-20, este material proviene de la Refinería Estatal. Este material es sometido a varios ensayos el cual nos permitiría calificar como apto. Los resultados de los ensayos del material deben efectuarse con las especificaciones nacionales, de esta manera podremos verificar que sus valores estén dentro del rango admisible.

Los procedimientos se realizan bajo dos normas como son ASTM (American Society for Testing Materials) y INEN (Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización). De acuerdo al Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización atribuye los siguientes requerimientos usando en mezclas asfálticas para el cemento asfáltico.

Tabla 3.2. Requisitos de Cemento Asfáltico AC-20 (Ecuador)

Ensayo	Unidad	GRADO DE VISCOSIDAD		Norma
		AC-20		
		Min	Max	
Viscosidad absoluta 60 °C	Pa.s		200±40	ASTM 2171
Viscosidad cinemática 35 °C		300	----	ASTM 2170
Punto de inflación	°C	232	----	NTE INEN 808
Gravedad Específica 25°C/25°C			Informe	ASTM D70
Índice de penetración			-1.5 a 1.0	ASTM D5/D5M
Viscosidad 60 °C	Pa.s	----	800	ASTM D2171
Cambio de masa	% (w/w)	----	1.0	ASTM 2872
Ductilidad 25°C	cm	50	----	NTE INEN 915

Fuente: (Ministerio de Obras Publicas y Comunicación, 2002)

Una vez elaborado los requerimientos del asfalto con sus respectivos ensayos se procede a verificar el cumplimiento con sus respectivos requerimientos ya mencionados.

Tabla 3.3. Resultados de caracterización del cemento asfáltico AC-20 (Ecuador)

Resultados de Caracterización del asfalto AC 20						
Ensayo	Norma	Límites		Unidades	Resultados	Cumple
		Min	Max			
Viscosidad Absoluta 60°	ASTM D2171/ASTM D2171M-10	160	240	Pa.s	198.13	SI
Viscosidad Absoluta 135°	ASTM D2171/ASTM D2171M-10	300	----	mm ² /s	335	SI
Punto de chispa copa abierta de Cleaveland	ASTM D92	232	----	°C	299	SI
Punto de llama copa abierta de Cleaveland	ASTM D92	----	----	°C	322	SI
Densidad por el método del picnómetro	ASTM D70	----	----	Kg/m ³	999.78	SI
Penetración a 25°C	ASTM D5/ ASTM D5M	-1.5	1	----	0.68	SI
Punto de Ablandamiento	ASTM D36/ ASTM D36M	----	----	°C	49.6	SI
Cambio de masa RTFO	ASTM D2872	----	1	%	0.97	SI
Ductilidad 25°C	ASTM D113	50	----	cm	50	SI

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

3.3.1.3. Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall)

3.3.1.4. Resultados de la mezcla asfáltica (HMA)

Como ya conocemos las mezclas asfálticas en caliente son las más utilizadas y aplicadas al momento de la elaboración de mezclas asfálticas.

Con los datos ya conocidos de la granulometría tanto del agregado fino como del grueso se elaboró una mezcla en comparación de los materiales. Estos valores deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM D3515 de esta manera podremos conocer la demanda que necesita la mezcla asfáltica del asfalto, este porcentaje también se lo conoce como porcentaje del asfalto teórico. (Escobar & Tunala, 2019)

Para dicho caso de estudio se obtuvo un valor de 6.3% como asfalto teórico el cual es un valor que se debe reemplazar por su inmediato superior a 6.5% con el cual se trabaja dos valores mayores a este y dos menores, por cada valor de porcentaje se elaboraron tres briquetas para no generar ciertas incertidumbres.

Tabla 3.4. Resultados de briquetas con su respectivo porcentaje de asfalto (Ecuador)

# Briqueta	Bulk (gr/cm3)	Estabilidad (lb-fuerza)	Flujo (in/100)	V.A	V. AGR	VAM	VAF
1	2,217	2270	14	9.51	79.11	20.89	54.50
2	2,213	2050	12	9.66	78.97	21.03	54.05
3	2,243	2530	14	8.44	80.04	19.96	57.71
4	2,259	2150	14	7.03	80.19	19.81	64.54
5	2,268	3190	16	6.65	80.51	19.49	65.87
6	2,252	2160	13	7.34	79.92	20.08	63.47
7	2,268	2750	15	6.30	80.05	19.95	68.43
8	2,275	3000	15	5.98	80.32	19.68	69.60
9	2,250	2550	14	7.01	79.44	20.56	65.90
10	2,273	2300	13	5.31	79.80	20.20	73.72
11	2,274	2950	15	5.23	79.87	20.13	74.03
12	2,274	2880	15	5.27	79.84	20.16	73.89
13	2,287	3080	14	4.31	79.87	20.13	78.59
14	2,299	3250	15	3.81	80.29	19.71	80.67
15	2,291	3000	16	4.13	80.03	19.97	79.34

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

Tabla 3.5. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Ecuador).

Porcentaje de Asfalto	Bulk (gr/cm3)	Estabilidad	Flujo	V.A	V. AGR	VAM	VAF
5.5	2,224	2283	13	9.20	79.37	20.63	55.42
6.0	2,260	2500	14	7.01	80.20	19.80	64.63
6.5	2,264	2767	15	6.43	79.94	20.06	67.78
7.0	2,274	2710	14	5.27	79.83	20.17	73.88
7.5	2,295	3110	15	4.08	80.06	19.94	79.53

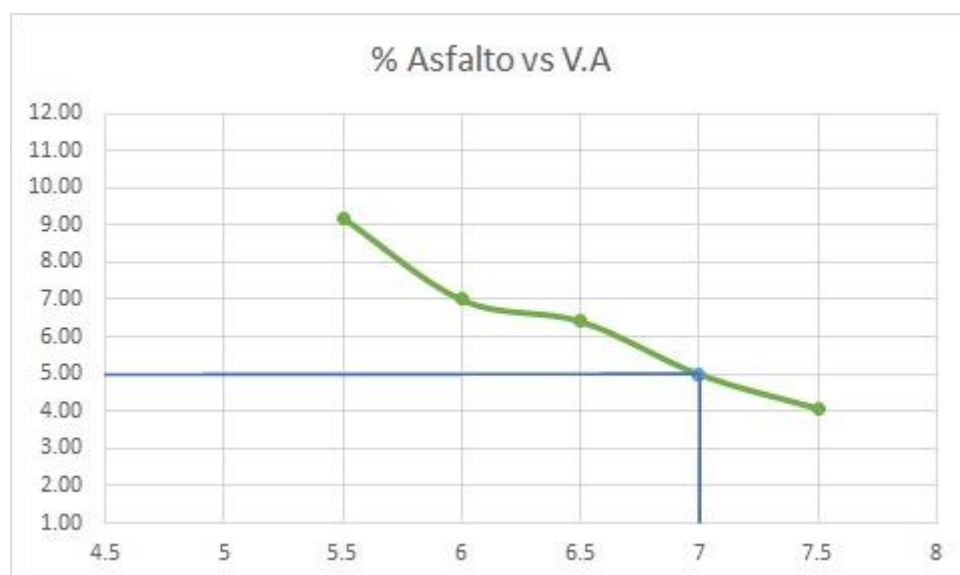
Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

Tabla 3.6. Requisitos para ensayo Marshall (Ecuador)

Tipo de Tráfico	Muy pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Criterio Marshall								
# de golpes (por cara)		75		75		50		50
Estabilidad (lb-f)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (plg/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% vacíos	3	5	3	5	3	5	3	5

Fuente: (Ministerio de Obras Publicas y Comunicación, 2002)

Para poder encontrar el porcentaje óptimo del asfalto es necesario elaborar gráficos de porcentaje del asfalto vs los parámetros obtenidos.

**Gráfico 3.1.** Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de Vacíos (Ecuador)

Como se puede observar en el Gráfico 3.1. se ha señalado el 7% como porcentaje óptimo de asfalto ya que cumple con los requisitos del método de ensayo Marshall, otro punto a recalcar es que las especificaciones recomiendan que el porcentaje de vacíos óptimo debe de oscilar entre 3 y 5, de tal manera se podría seleccionar el valor de 4 pero al momento de verificar los requisitos es descartado por el incumplimiento de ciertos valores.

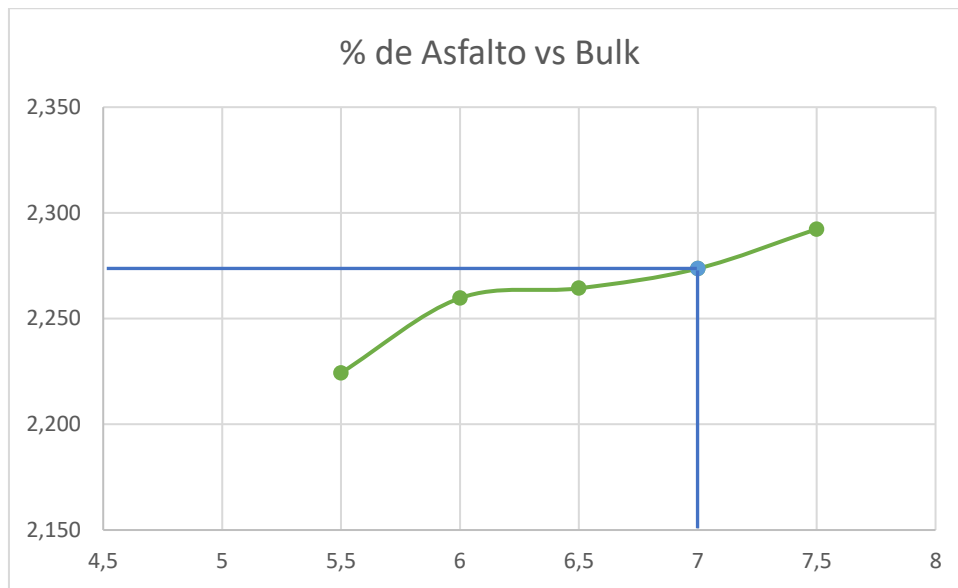


Gráfico 3.2. Porcentaje de asfaltos vs Densidad Bulk (Ecuador)

En la Gráfico 3.2. podemos observar el comportamiento que sufre la densidad Bulk en la variación del porcentaje de asfalto en las distintas briquetas elaboradas, de igual manera se llega a observar que la densidad aumenta mediante el porcentaje de asfalto se incrementa.

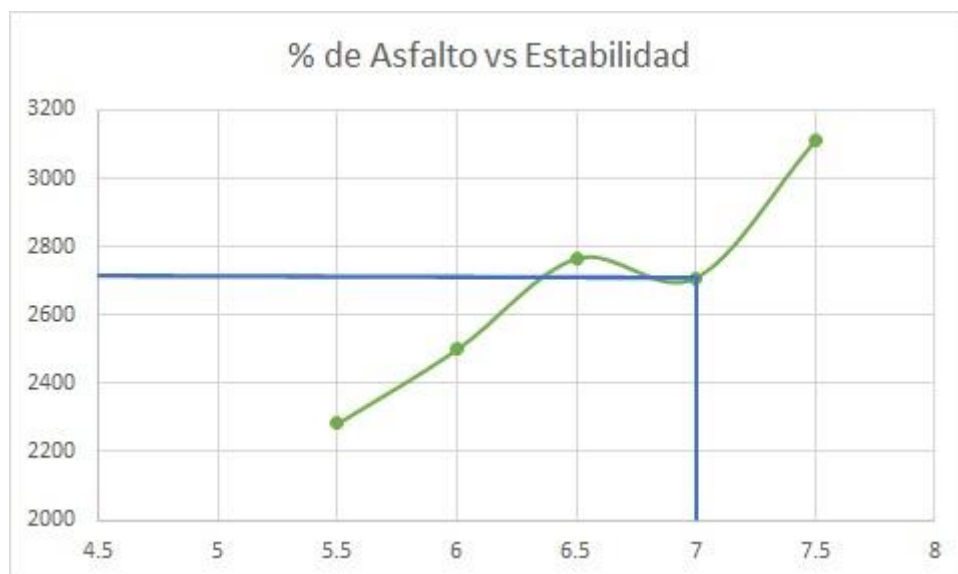


Gráfico 3.3. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ecuador)

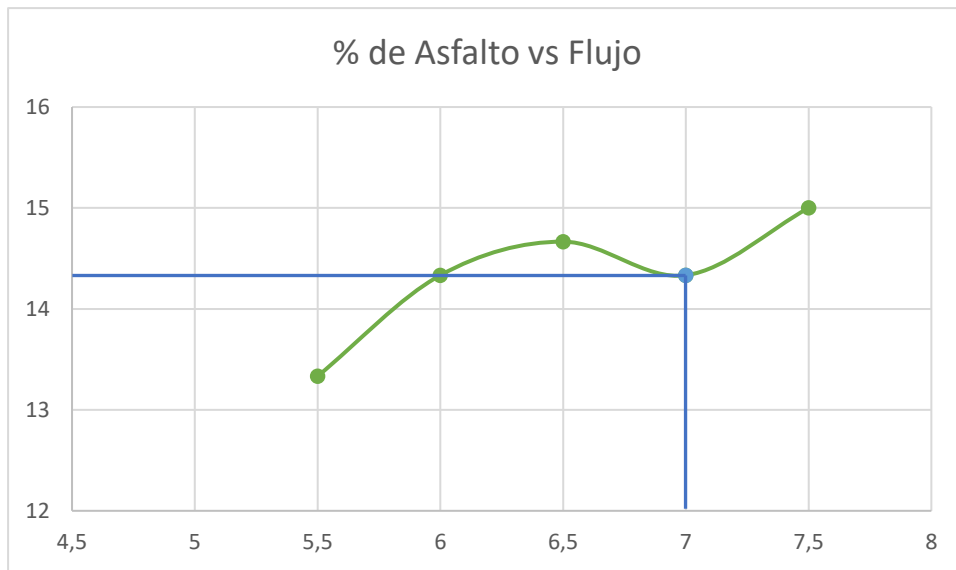


Gráfico 3.4. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ecuador)

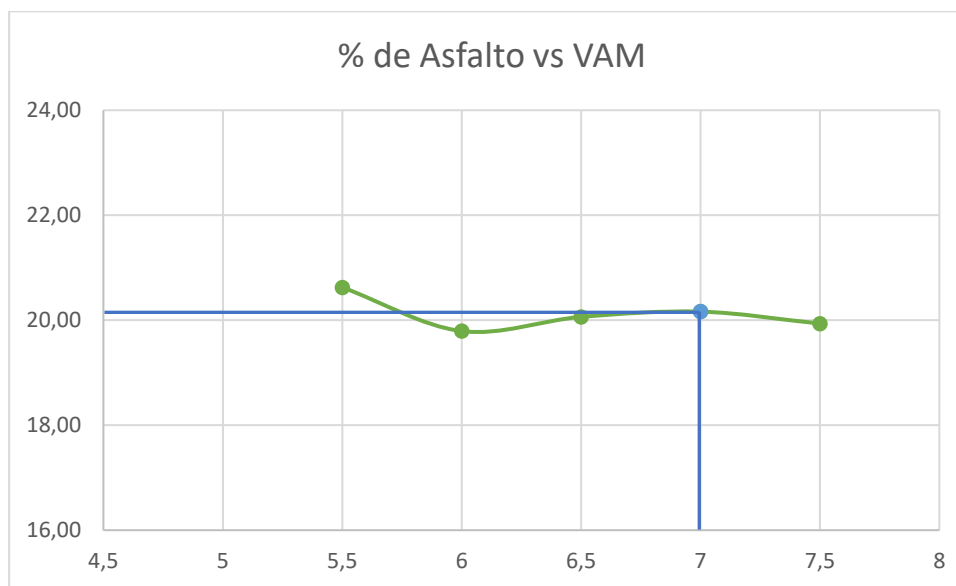


Gráfico 3.5. Porcentaje de asfalto vs VAM (Ecuador)



Gráfico 3.6. Porcentaje de asfalto vs VAF (Ecuador)

A continuación, se presentará una tabla de los resultados obtenidos de la mezcla asfáltica al 7 %.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 7% (Ecuador)

Porcentaje de Asfalto	Bulk (gr/cm ³)	Estabilidad	Flujo	V.A	V. AGR	VAM	VAF
7	2.2737	2710	14	5	79.84	20.16	73.88

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

3.3.1.5. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA)

Se conoce que la temperatura de las mezclas asfálticas tibias oscila entre los 110 y 140 °C, por lo que para la elaboración de este ensayo se ha tomado la decisión de someterla a una temperatura de compactación de 110 °C por lo que la elaboración de todas las briquetas a estudiar se las realizó a dicha temperatura.

Se dividió en dos grupos la elaboración, considerando la temperatura de compactación de 110 °C con aditivo y el otro grupo a la misma temperatura sin la aplicación de aditivo, el porcentaje a utilizarse en la fabricación de las mezclas asfálticas tibias (MAT) en este caso es del 0.15 % del cemento asfáltico este valor es recomendado por los fabricantes de dicho aditivo (Zycotherm).

Una vez que ya hemos conocido el porcentaje óptimo de asfalto procedemos a realizar la mezcla asfáltica tibia sin aditivo, esta comparativa se la realiza para poder divisar el impacto que genera la aplicación de un aditivo químico (Zycotherm) ante las mezclas asfálticas a una menor temperatura de compactación.

Tabla 3.8. Resultados de mezcla asfáltica tibia con y sin aditivo (Ecuador).

	# Briqueta	Estabilidad (lb-fuerza)	Flujo (in/100)	V.A	V. AGR	VA M	VAF	Estabilidad promedio	Flujo Promedio
Aditivo	1	2450	14.1						
	2	2050	14	3.7	80.7	19.3	81.1	2375.3	14
	3	2626	14						
Sin Aditivo	7	2180	14.5						
	8	1980	14.5	4.3	80.6	19.4	78.1	1953.3	15
	9	1700	16						

Fuente: (Escobar & Tunala, 2019)

En esta tabla podemos evidenciar que las mezclas asfálticas tibias sin aditivo no cumplen con los requisitos del método Marshall tanto en si estabilidad como en el flujo, pero una vez que se trabaja con el aditivo la estabilidad aumenta llegando a cumplir con el valor mínimo establecido en la norma.

3.3.2. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Quimibond 3000 en Perú

Para la elaboración de este proyecto se realizaron los análisis a los agregados, cemento asfáltico hasta la mezcla asfáltica rigiéndose en la norma técnica general de construcción EG- 2013, de esta manera se conocerá la fiabilidad y validez de la mezcla asfáltica, continuando a la elaboración de mezclas asfálticas tibias mediante la aplicación de aditivos químicos (QUIMIBOND, ZYCOTHERM) para conocer los beneficios que presentan en comparación a las mezclas asfálticas en caliente (Flores & Rojas, 2019).

3.3.2.1. Caracterización de los Agregados (MAC 2)

Para la investigación se decidió trabajar con agregados de una MAC 2 la cual se especifica los siguientes requerimientos en la siguiente tabla, además ya una vez elaborado los ensayos necesarios se observa el cumplimiento de los requisitos ya establecidos para dicho tipo de agregado.

Tabla 3.9. Gradación para la mezcla asfáltica (Perú).

Tamiz	Porcentaje que pasa			Resultado	Observación
	MAC - 1	MAC - 2	MAC - 3		
25 mm (1")	100				
19 mm (3/4")	80 - 100	100		100	CUMPLE
12.5mm (1/2")	67 - 85	80 - 100		93.5	CUMPLE
9.5mm (3/8")	60 - 77	70 - 88	100	80.2	CUMPLE
4.75mm (N° 4)	43 - 54	51 - 68	65 - 87	60.9	CUMPLE
2.00mm (N°10)	29 - 45	38 - 52	43 - 61	41.7	CUMPLE
425 µm (N° 40)	14 - 25	17 -28	19 - 29	20	CUMPLE
180 µm (N° 80)	8 - 17	8 - 17	9 - 19	11	CUMPLE
75 µm (N° 200)	4 - 8	4 - 8	5 - 10	6.2	CUMPLE

Fuente: (Flores & Rojas, 2019)

Estos agregados se los obtuvo en el sector de Cajamarquilla (Perú), de una cantera conocida como Seosing.

3.3.2.2. Estudios del agregado Grueso

La elección de los agregados se analizó de tal manera que pudieran cumplir con los requisitos de agregados gruesos que se presenta en la Norma EG 2013.

Tabla 3.10. Resultados de ensayos en los agregados gruesos (Perú).

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados	Observación
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	> 3000		
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	3.08%	CUMPLE
Abrasión máquina de los ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	16.00%	CUMPLE
Adherencia	MTC E 517	+95	+95	95.00%	CUMPLE
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.	46.30%	CUMPLE
Partículas chatas y alargadas	MTC E 4791	10% máx.	10% máx.	7.10%	CUMPLE
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70	90.60%	CUMPLE
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.07%	CUMPLE

Fuente: (Flores & Rojas, 2019)

3.3.2.3. Estudios del agregado Fino

De igual manera el agregado fino fue seleccionado de tal manera que cumple con los requisitos en la norma EG 2013.

Tabla 3.11. Resultados de ensayos en los agregados finos (Perú).

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados	Observación
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	> 3000		
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70	65%	CUMPLE
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40	45.40%	CUMPLE
Azul de metileno	ASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.	--	CUMPLE
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP	NP	CUMPLE
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	--	18% máx.	4.81%	CUMPLE
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.	64.00%	CUMPLE
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP	1.50%	CUMPLE
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.12%	CUMPLE
Adhesividad Riedel Weber	MTC E 220	--	--	7.00%	CUMPLE

Fuente: (Flores & Rojas, 2019)

3.3.2.4. Cemento asfáltico 60/70

La determinación del cemento asfáltico de esta investigación se decidió por optar por la sección climática de la región en donde se va a realizar el estudio, para este caso en específico se realizó en Perú – Lima Metropolitana, de esta manera conociendo que las temperaturas oscilan entre 24 – 15 ° se decidió tomar como cemento asfáltico 60/70.

El cemento asfáltico 60/70 al estudiar se obtuvo de la refinería Repsol proveniente de la empresa Seoing.

Tabla 3.12. Clasificación de cemento asfáltico por temperatura (Perú)

TEMPERATURA MEDIA ANUAL			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C- 5°C	Menor a 5°C
40 - 50			Asfalto
60 - 70 o Modificado	60 - 70	85-100 120-150	Modificado

Fuente: (Ministerio de Transporte y Comunicacion, 2013)

Figura 3.1. Extracción de cemento asfáltico para la investigación.

Fuente:(Flores & Rojas, 2019)

3.3.2.5. Requerimientos y Ensayos del cemento asfáltico

Para la investigación desarrollada se consideró el cumplimiento de los requisitos de las tablas mostradas a continuación las cuales se dividen en la clasificación por penetración y viscosidad según lo establecido en EG – 2013, sin embargo, en dicha investigación solo se abordó el tema de la ductilidad y penetración en los ensayos realizados al cemento asfáltico.

Tabla 3.13. Requerimiento del cemento asfáltico por penetración (Perú).

TIPO		GRADO DE PENETRACIÓN									
GRADO	ENSAYO	PEN 40 - 50		PEN 60 - 70		PEN 85 - 100		PEN 120 - 150		PEN 200 - 300	
		MI	MAX	MI	MAX	MI	MAX	MI	MAX	MI	MAX
		N		N		N		N		N	
Pruebas del material Bituminoso											
Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99		99		99		99		99	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica)	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha											
Solvente Nafta - Estándar	AASHTO M 20	NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Prueba de la Película delgada a 163°C, 3.2mm, 5h											
Pérdida de masa, %	ASTMD 1754	0.8		0.8		1		1.3		1.5	
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	50		75		100		100		100	

Fuente:(Ministerio de Transporte y Comunicacion, 2013)

Tabla 3.14. Requerimientos del cemento asfáltico por viscosidad (Perú).

Características	Grado de Viscosidad				
	AC - 2.5	AC - 5	AC - 10	AC - 20	AC - 40
Viscosidad absoluta a 60°C, Poises	250±50	500±100	1000±200	2000±400	4000±800
Viscosidad cinemática 135°C St min	80	110	150	210	300
Penetración 25°C 100 gr, 5 s min	200	120	70	40	20
Punto de Inflamación COC, °C min	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, %masa, mínimo	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina					
Viscosidad Absoluta, 60°C, Poises máximo	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm, mínimo	100	100	50	20	10
Ensayo de la mancha					
Solvente Nafta - Estándar	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO

Fuente:(Ministerio de Transporte y Comunicacion, 2013)

Para el caso de investigación del cemento asfáltico se basó en la norma técnica EG-2013 la cual nos especifica que debe de cumplir con los requerimientos establecidos previamente, pero en este caso solo se abordó el tema de la ductilidad, penetración y

viscosidad a las temperaturas de 140,130 y 120°C, con la aplicación del aditivo QUIMIBOND, ZYCOTHERM y sin aditivo.

Tabla 3.15. Resultado de requisitos del cemento asfáltico por penetración (Perú).

ITEM	Ensayo	Descripción	Resultados	Requerimiento		
				Mínimo	Observación	
1	Penetración (MTC E 304)	PEN 60/70	55	60	NO APTO	
		PEN 60/70 + 0.8 QUIMIBOND	61	60	APTO	
2	Ductilidad (MTC E 306)	PEN 60/70	+100	100	APTO	
		PEN 60/70 + 0.8 QUIMIBOND	94 cm	100	NO APTO	
3	Viscosidad Cinemática (MTC E 310)	TEMPERATURA 120 °C	1059.9 cSt	-	APTO	
		PEN 60/70	TEMPERATURA 130 °C	598.7 cSt	-	APTO
		TEMPERATURA 140 °C	350.2 cSt	-	APTO	
		PEN 60/70 + 0.8 QUIMIBOND	TEMPERATURA 120 °C	982.6 cSt	-	APTO
		TEMPERATURA 130 °C	569.9 cSt	-	APTO	
		TEMPERATURA 140 °C	339.3 cSt	-	APTO	

Fuente:(Flores & Rojas, 2019)

3.3.2.6. Ensayo Marshall en Perú

La elaboración del ensayo Marshall es fundamental para conocer el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica, la siguiente tabla presenta los requisitos que debe de cumplir el ensayo Marshall (MTC E 504).

Tabla 3.16. Requisitos Ensayo Marshall para mezclas asfálticas (Perú).

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8.15 kN	5.44kN	4.53kN
3. Flujo 0.01*(0.25mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire MTC E 505	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver tabla 423-10		
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa min	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia retenida % min	75	75	75
Relación polvo - Asfalto	0.6-1.3	0.6-1.3	0.6-1.3
Relación Estabilidad/Flujo (kg/cm) (3)	1700-4000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 min		

Fuente:(Ministerio de Transporte y Comunicacion, 2013)

De la misma manera para la elaboración del ensayo Marshall se necesita un porcentaje óptimo del cemento asfáltico, estos valores óptimos fueron recomendado por los especialistas de la planta asfáltica SEOING, los cuales nos muestran unos porcentajes de 5 %, 5.5%, 6% y 6.5% partiendo de esta manera se obtuvieron los valores de Estabilidad, flujo, % de vacíos para así poder llegar a obtener un porcentaje óptimo de la mezcla.

Tabla 3.17. Resultados de briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Perú).

Porcenta je de Asfalto	Estabilid ad	Flujo	V.A	VAM	VAF
5	1144	9.60	6.7	17.17	60.8
5	1119	9.80	6.8	17.22	60.6
5	1147	9.60	6.9	17.31	60.3
5.5	1195	11.60	5	16.84	70.5
5.5	1172	11.30	4.8	16.7	71.2
5.5	1175	11.80	5	16.87	70.4
6	1207	12.50	3.7	16.6	77.9
6	1185	12.70	3.6	16.57	78.1
6	1194	13.00	3.6	16.55	78.2
6.5	1174	14.30	2.7	16.95	83.8
6.5	1168	14.50	2.7	16.93	83.9
6.5	1170	14.00	2.6	16.84	84.5

Fuente:(Flores & Rojas, 2019)

De la misma manera para la determinación del porcentaje óptimo es necesario la elaboración de las tablas (% de asfalto vs los parámetros) obtenidos en los ensayos.

Tabla 3.18. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Perú).

Porcenta je de Asfalto	Estabilid ad	Flujo	V.A	VAM	VAF
5	1137	9.7	6.8	17.2	60.6
5.5	1181	11.6	4.9	16.803	70.7
6	1195	12.7	3.6	16.57	78.1
6.5	1171	14.3	2.7	16.9	84.1

Fuente: (Flores & Rojas, 2019)

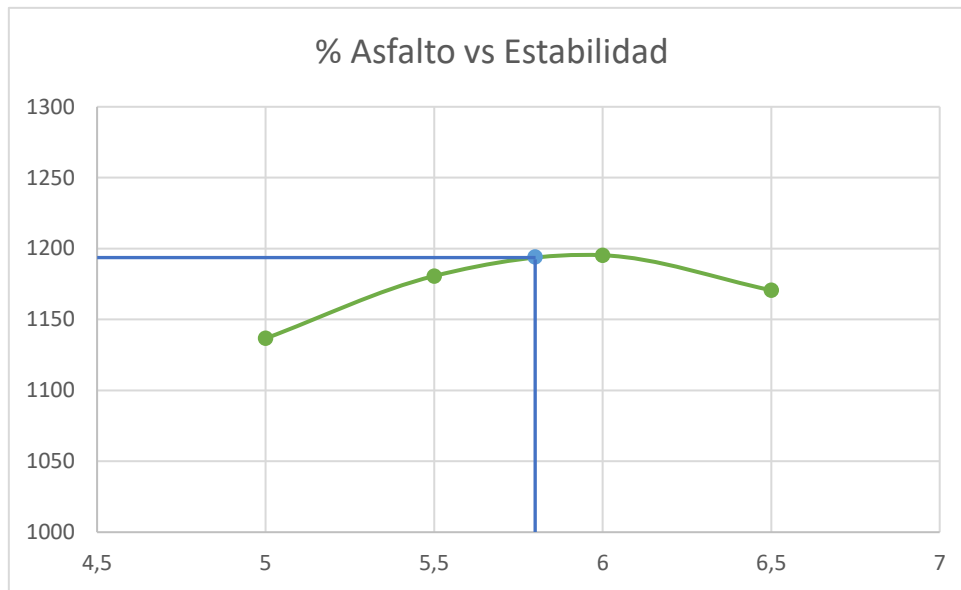


Gráfico 3.7. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Perú).

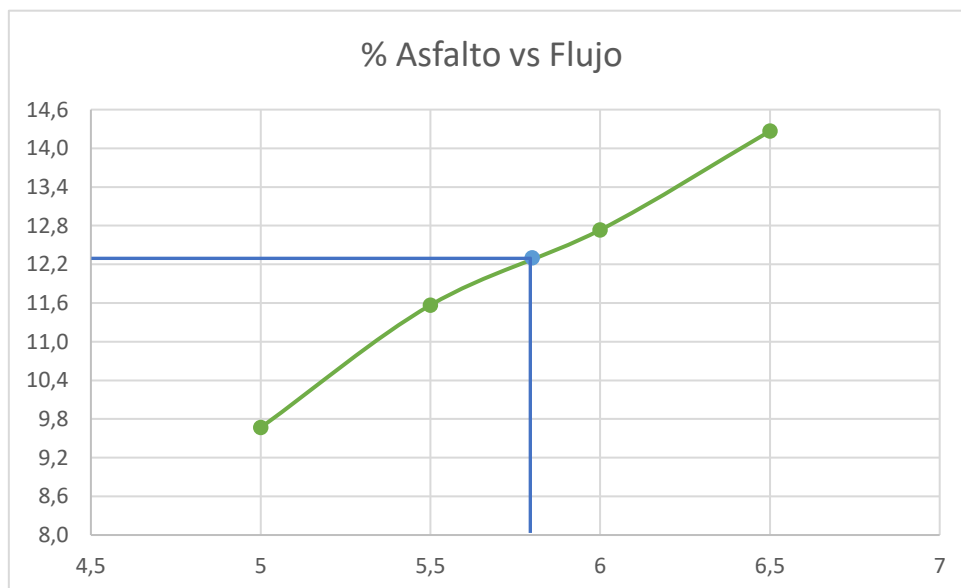


Gráfico 3.8. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Perú).

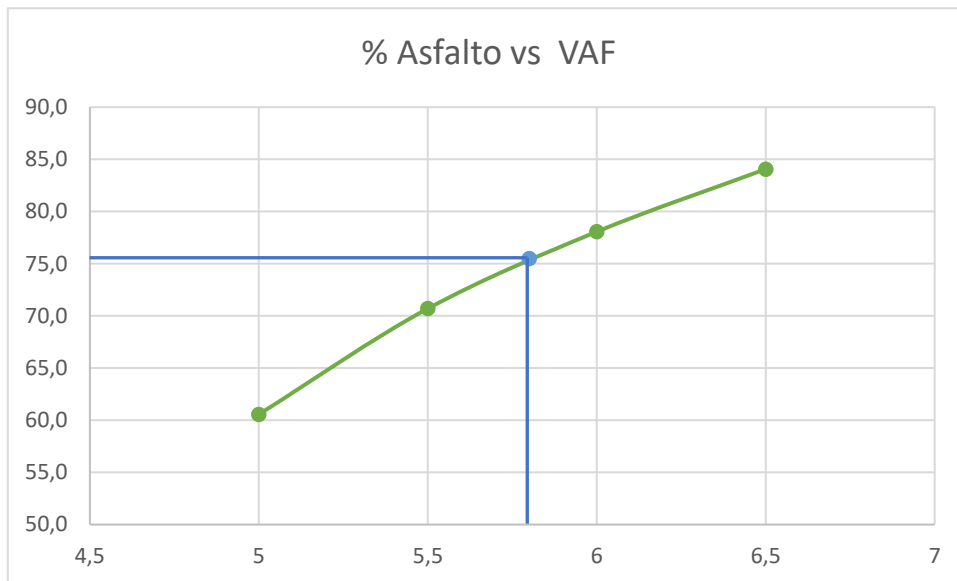


Gráfico 3.9. Porcentaje de asfalto vs VAF (Perú).

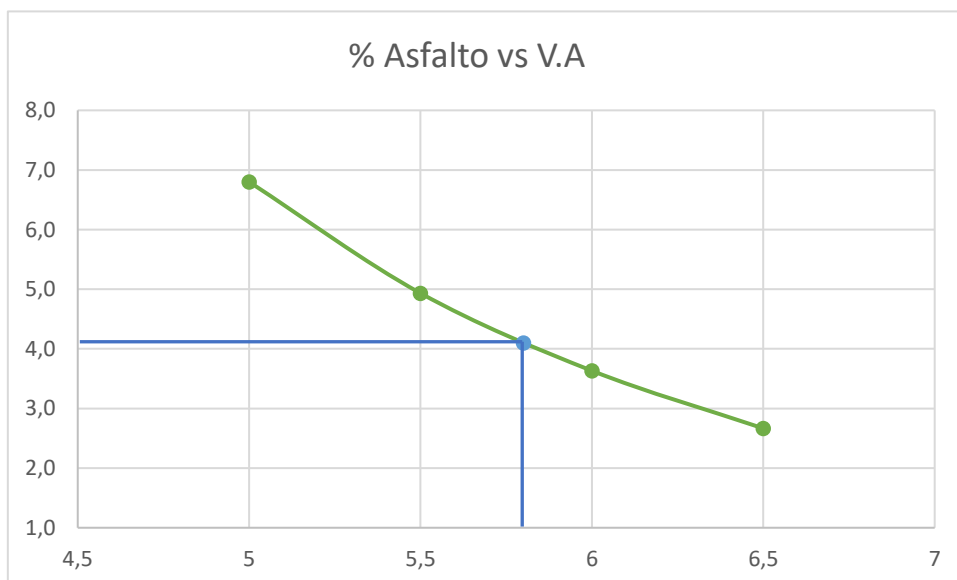


Gráfico 3.10. Porcentaje de asfalto vs VA (Perú).

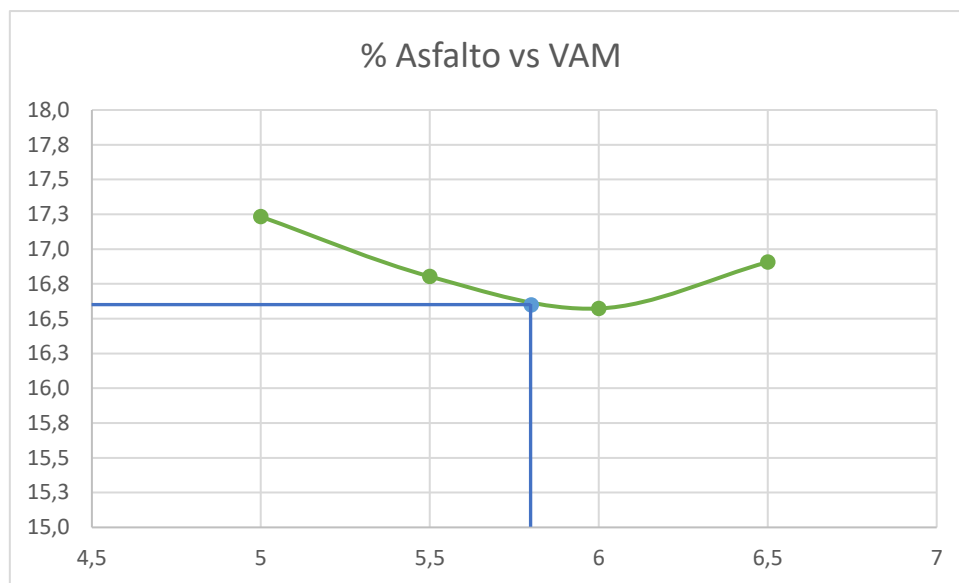


Gráfico 3.11. Porcentaje de asfalto vs VAM (Perú).

Mediante la elaboración de las gráficas de % de asfalto vs los parámetros determinados en la elaboración del ensayo Marshall podemos determinar que un porcentaje óptimo de la mezcla es del 5.8% para este caso de estudio.

A continuación, mostraremos una tabla de resumen que presenta los resultados del porcentaje óptimo.

Tabla 3.19. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Perú).

Porcentaje de Asfalto	Estabilidad	Flujo	V.A	VAM	VAF
5.8	1194	12.3	4.1	16.6	75.5

Fuente:(Flores & Rojas, 2019)

3.3.2.7. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Lima – Perú)

Las temperaturas promedio para la elaboración de las mezclas asfálticas tibias son entre los 140 °C y 110°C como ya se ha especificado previamente por lo que en el caso de investigación del aditivo QUIMIBOND 3000 se elaboraron las respectivas investigaciones a distintas temperaturas de 140, 130 y 120 °C, para poder realizar una comparativa y llegar a conocer el funcionamiento del aditivo, se decidió realizar la mezcla asfáltica tanto con la aplicación del aditivo y sin aplicar dicho químico.

Como ya es conocido el porcentaje óptimo de la mezcla se procede a la elaboración de la mezcla asfáltica tibia con y sin aditivo para de igual manera analizar el impacto que genera dicho cambio de temperatura a las mezclas, de la misma manera se debe de conocer el porcentaje de aditivo que debemos aplicar a la mezcla por lo que para esta clase de aditivo QUIMIBOND 3000 se utilizó el 0.8% y del aditivo ZYCOTHERM – 0.15 % del cemento asfáltico.

Tabla 3.20. Resultados de mezcla asfáltica con aditivo y sin aditivo (Perú).

	Temperatura	Estabilidad	Observacion	Flujo	Observacion	% V.A	Observacion	% VAM	Observacion	Estabilidad/ Flujo	Observacion
Aditivo (QUIMIBOND)	140	1255	CUMPLE	3.24	CUMPLE	4.6	CUMPLE	17.9	CUMPLE	3876	CUMPLE
	130	1123	CUMPLE	3.68	CUMPLE	5	CUMPLE	18.2	CUMPLE	3048	CUMPLE
	120	993	CUMPLE	3.81	CUMPLE	5.4	NO CUMPLE	18.6	CUMPLE	2621	CUMPLE
Sin Aditivo	140	1242	CUMPLE	3.21	CUMPLE	4.3	CUMPLE	17.8	CUMPLE	3865	CUMPLE
	130	1140	CUMPLE	3.56	CUMPLE	5.5	NO CUMPLE	18.8	CUMPLE	3206	CUMPLE
	120	920	CUMPLE	3.94	CUMPLE	6.1	NO CUMPLE	19.3	CUMPLE	2338	CUMPLE

	Temperatura	Estabilidad	Observacion	Flujo	Observacion	% V.A	Observacion	% VAM	Observacion	Estabilidad/ Flujo	Observacion
Aditivo (ZYCOTHERM)	140	1228	CUMPLE	3.11	CUMPLE	4.3	CUMPLE	17.9	CUMPLE	3946	CUMPLE
	130	1113	CUMPLE	3.43	CUMPLE	4.7	CUMPLE	18.2	CUMPLE	3048	CUMPLE
	120	1094	CUMPLE	3.94	CUMPLE	5.5	NO CUMPLE	18.9	CUMPLE	2789	CUMPLE
Sin Aditivo	140	1242	CUMPLE	3.21	CUMPLE	4.3	CUMPLE	17.8	CUMPLE	3865	CUMPLE
	130	1140	CUMPLE	3.56	CUMPLE	5.5	NO CUMPLE	18.8	CUMPLE	3206	CUMPLE
	120	920	CUMPLE	3.94	CUMPLE	6.1	NO CUMPLE	19.3	CUMPLE	2338	CUMPLE

Fuente:(Flores & Rojas, 2019)

Como se puede observar en la tabla al momento de la elaboración de las mezclas asfálticas tibias sin aditivo no cumple ciertos parámetros de los requerimientos del ensayo Marshall ya especificados, en cambio se puede encontrar muy factible la elaboración de mezclas asfálticas a una menor temperatura mediante la aplicación de aditivos químicos como es en este caso QUIMIBOND y ZICOTHERM, llegando a cumplir tanto a la temperatura de 140°C y 130°C sin ningún inconveniente.

3.3.3. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo QUIMIBOND II en Perú (Lima)

3.3.3.1. Caracterización de agregados

De la misma manera que se lleva a cabo en los distintos aditivos químicos, se elabora previamente un análisis de agregados gruesos y finos los cuales fueron elaborados en los laboratorios del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (Contreras & Mamani, 2019).

Los agregados fueron receptados por la empresa T y R Construcciones ya que es conocida como una de las mejores empresas distribuidoras de material para el sector del transporte.

3.3.3.1.1. Requerimiento del agregado grueso

El material granular grueso debe satisfacer las necesidades de la siguiente tabla N° la cual nos muestra cuales son los requerimientos mínimos establecidos por la norma de la construcción EG -2013.

Tabla 3.21. Requisitos del Agregado Grueso (Perú – Lima)

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados	Observacion
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	> 3000		
Durabilidad (al sulfato de Magecio)	MTC E 209	18% máx	15% máx	2.33%	CUMPLE
Abracion maquina de los angeles	MTC E 207	40% máx	35% máx	16.89%	CUMPLE
Particulas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx	10% máx	8.10%	CUMPLE
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70	81.31%	CUMPLE
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx	0.5% máx	0.02%	CUMPLE
Absorción y peso especifico	MTC E 206	1 % máx	1% máx	0.64%	CUMPLE

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

3.3.3.1.2. Requerimientos del agregado fino

Los agregados finos de igual manera deben de cumplir con los requisitos nos que muestra la norma de la construcción EG 2013 la cual nos indica los parámetros mínimos y máximos con los cuales debe cumplir el agregado fino.

Tabla 3.22. Requisitos del Agregado Fino

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados	Observacion
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	> 3000		
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70	71%	CUMPLE
Azul de metileno	ASTHO TP 57	8 máx	8 máx	7.3	CUMPLE
Indice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP	NP	CUMPLE
Durabilidad (al sulfato de Magecio)	MTC E 209	--	18% máx	5.45%	CUMPLE
Indice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx	NP	NP	CUMPLE
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx	0.5% máx	0.01%	CUMPLE
Absorción y peso especifico	MTC E 205	0.5% máx	0.5% máx	0.27%	CUMPLE

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

3.3.3.2. Requerimientos del Cemento Asfáltico o Bitumen

En el desarrollo de la investigación se consideró un asfalto 120-150 ya que en la zona que se llevara a cabo el estudio es una región de baja temperatura climática que oscila entre los 5°C y 15°C, los datos del tipo del cemento asfaltico son obtenidos de la norma de la construcción EG 2013.

Tabla 3.23. Tipo de cemento asfáltico por temperatura

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C- 5°C	Menor a 5°C
40 - 50		85-100	Asfalto
60 - 70 o Modificado	60 - 70	120-150	Modificado

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

El ligante fue concedido por parte de los laboratorios del Ministerio de Transporte, el cual cuanta con un certificado donde nos indica el cumplimiento de las normas establecidas en el manual de construcción EG 2013.

Tabla 3.24. Requerimientos del cemento asfaltico según EG 2013

Tipo	Grado	Ensayo	Grado de Penetración									
			PEN 40 - 50		PEN 60 - 70		PEN 85 - 100		PEN 120 - 150		PEN 200 - 300	
			MIN	MÁX	MIN	MÁX	MIN	MÁX	MIN	MÁX	MIN	MÁX
Pruebas del material Bituminoso												
Penetracion a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm		MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamacion, °C		MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm		MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %		MTC E 302	99		99		99		99		99	
Indice de Penetracion (Suceptibilidad Termica)		MTC E 304	✓ -1	✓ +1	✓ -1	✓ +1	✓ -1	✓ +1	✓ -1	✓ +1	✓ -1	✓ +1
Ensayo de la Mancha												
Solvente Nafta - Estandar			NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno		AASHTO M 20	NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno			NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
Prueba de la Pelicula delgada a 163°C, 3.2mm, 5h												
Perdida de masa, %		ASTMD 1754	0.8		0.8		1		1.3		1.5	
Penetracion retenida despues del ensayo de pelicula fina, %		MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm		MTC E 306	50		75		100		100		100	

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

El certificado de cumplimiento del cemento asfaltico muestra los siguientes valores mostrados en la tabla N° 3.24.

Tabla 3.25. Resultados del cumplimiento del cemento asfáltico

Ensayos	Norma	Resultado	Resultado
Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	MTC E 304	142	CUMPLE
Punto de ablandamiento, Anillo y bola °C	MTC E 307	44	CUMPLE
Viscosidad Cinemática a 135°C	MTC E 310	201.8	CUMPLE
Punto de inflamación, °C	MTC E 303	290	CUMPLE
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100	CUMPLE
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99.87	CUMPLE
Ensayo de la mancha			CUMPLE
Solvente Nafta - Estandar	MTC E 3014	NEGATIVO	CUMPLE
Índice de Penetración (Suceptibilidad Térmica)	Heukelom	0.1	CUMPLE
Perdida de masa, %	MTC E 315	0.09	CUMPLE
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	59	CUMPLE
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100	CUMPLE

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

3.3.3.3. Diseño de la mezcla según el método Marshall Lima – Perú.

La elaboración de la mezcla asfáltica tibia se la elaboro con una temperatura de compactación de 140 °C, implementando un aditivo químico (QUIMIBOND) al 0.7% del peso del cemento asfáltico.

La siguiente tabla nos muestra los parámetros de diseño de la mezcla el cual se encuentra especificada en la norma EG 2013.

Tabla 3.26. Parámetros de diseño según EG 2013

Parametros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactacion, numero de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (minimo)	8.15 kN	5.44kN	4.53kN
3. Flujo 0.01*(0.25mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacios con aire MTC E 505	3-5	3-5	3-5
5. Vacios en el agregado mineral	Ver tabla 423-10		
Inmersion - Compresion (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresion Mpa min	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia retenida % min	75	75	75
Relacion polvo - Asfalto	0.6-1.3	0.6-1.3	0.6-1.3
Relacion Estabilidad/Flujo (kg/cm)(3)	1700-4000		
Resistencia conservada en la prueba de traccion indirecta AASHTO T 283	80 Min		

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

Se ha considerado una clase de mezcla A debido a la condición de tráfico a la que se va a someter (muy pesado) por lo que debe ser considerados como una condición más crítica.

La presente tabla nos muestra los valores de estabilidad flujo y vacíos los cuales deben de cumplir con los parámetros de diseño de la norma de la construcción, se tomaron los valores de 4, 4.5, 5, 5.5 y 6 % de asfalto para así poder llegar a determinar cuál es el porcentaje óptimo de la mezcla a la temperatura estipulada.

Tabla 3.27. Resultados de las briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Perú - Lima)

Porcentaje de Asfalto	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	V.A	VAM	VAF
4	1042	2297.1932	2.58	10.32	5.9	12.74	54.6
4.5	1222	2694.0212	2.86	11.44	5	13.02	61.8
5	1303	2872.5938	3.02	12.08	4.1	13.25	71.4
5.5	1294	2852.7524	3.12	12.48	2.8	13.5	78.6
6	1186	2614.6556	3.15	12.6	1.2	13.72	88.2

Fuente:(Contreras & Mamani, 2019)

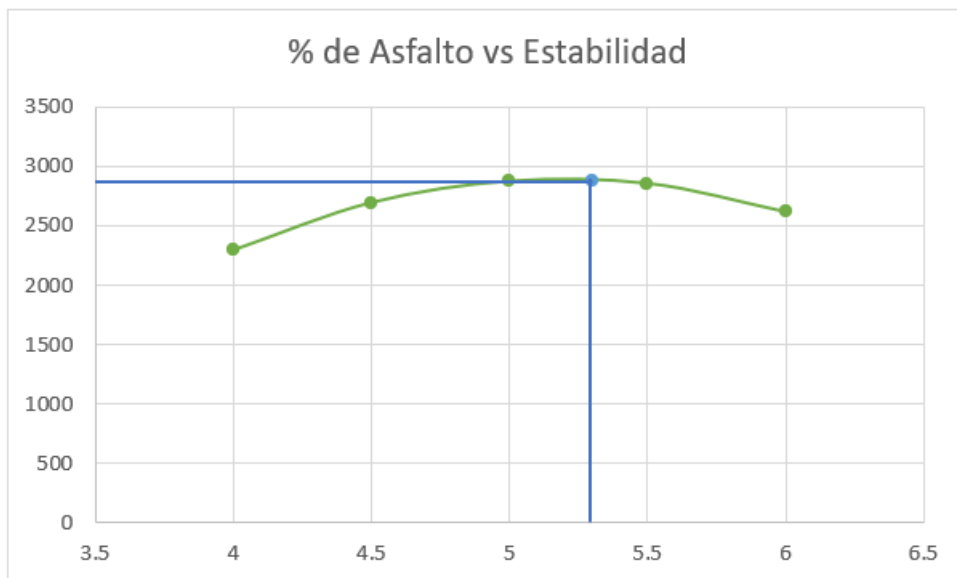


Gráfico 3.12. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Perú - Lima).

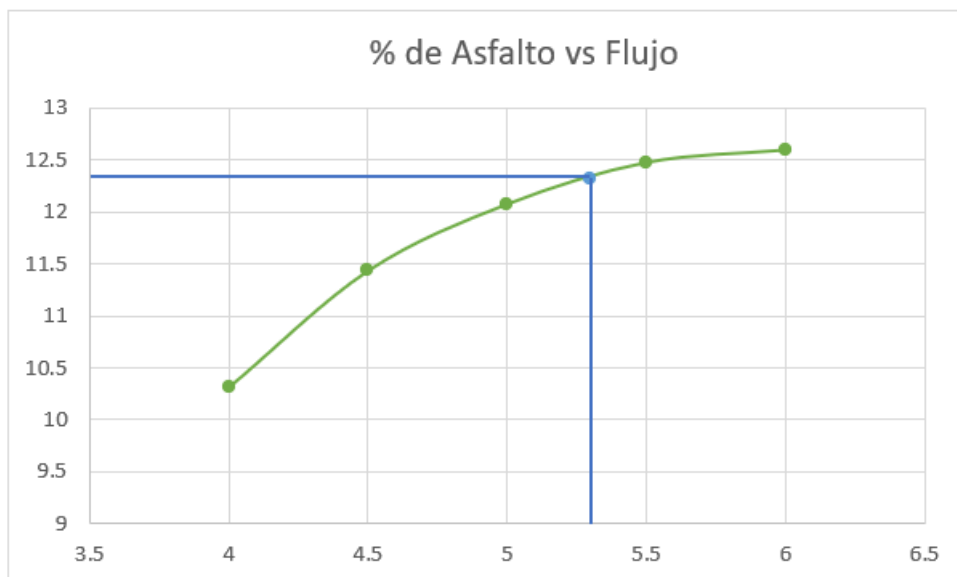


Gráfico 3.13. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Perú - Lima).

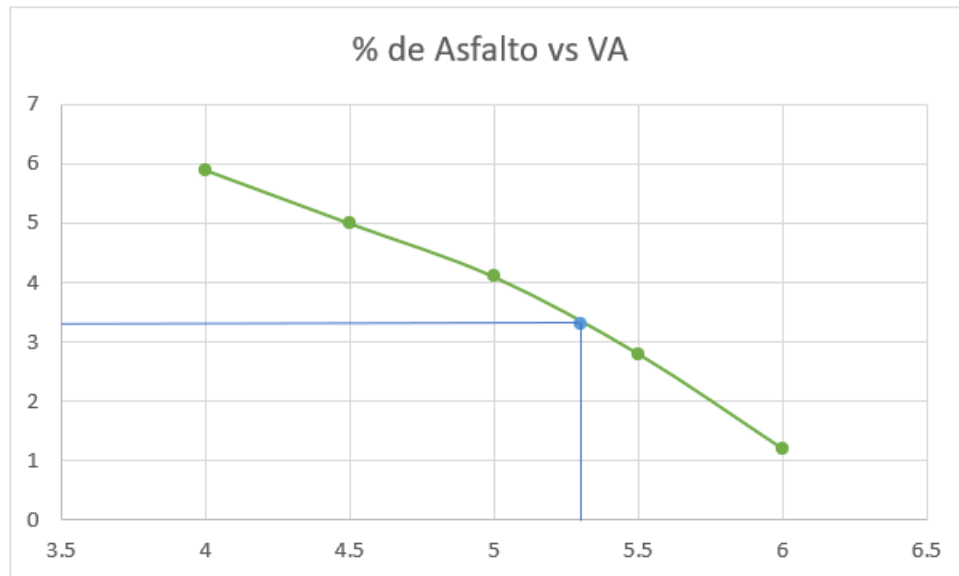


Gráfico 3.14. Porcentaje de asfalto vs VA (Perú - Lima).

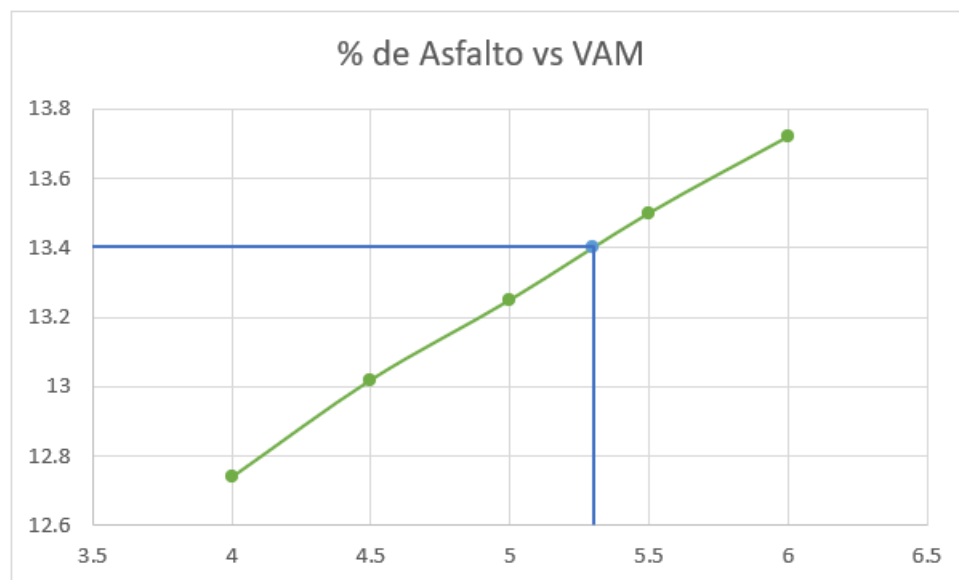


Gráfico 3.15. Porcentaje de asfalto vs VAM (Perú - Lima).

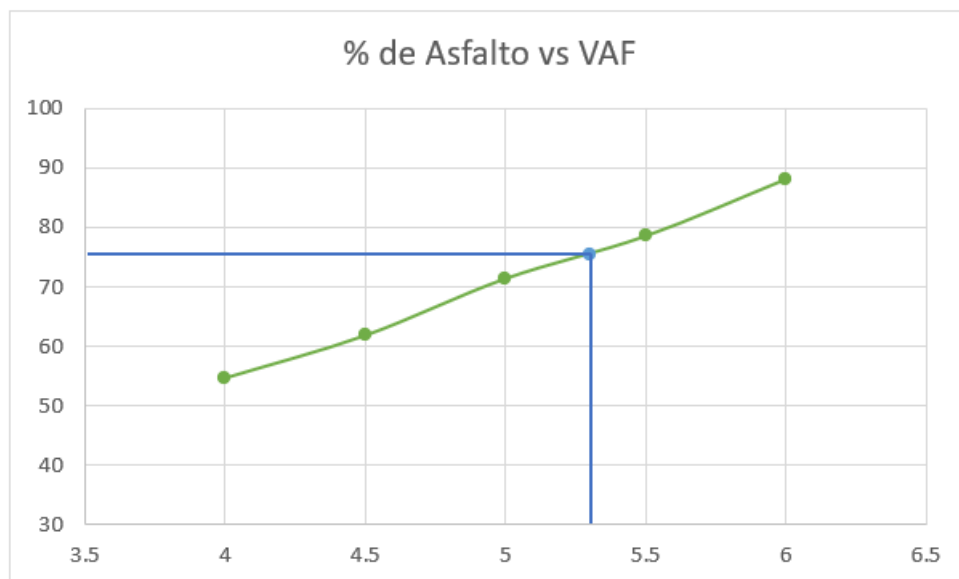


Gráfico 3.16. Porcentaje de asfalto vs VAF (Perú - Lima).

Una vez ya elaboradas las gráficas de Estabilidad, flujo y vacíos se pudo determinar el porcentaje óptimo en el asfalto de 5.3% el cual cumple con todos los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica según las normas de la EG 2013 de Perú.

Tabla 3.28. Asfalto óptimo de MAT con aditivo QUIMIBOND a 140 °C.

Porcentaje de Asfalto	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Flujo	V.A	VAM	VAF
5.3	1303	2872.5938	3.08	12.32	3.3	13.40	75.5

Fuente: (Contreras & Mamani, 2019)

3.3.4. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Rediset™ WMX en Ecuador

3.3.4.1. Metodología

En la tabla se muestra los valores obtenidos de los ensayos del material granular los cuales son conocidos como material pétreo, estos materiales se utilizarán durante toda la investigación los cuales son provenientes de la cantera de la compañía Concreto y Prefabricados, con lo cual los diseños de mezcla se encuentran detallados previamente.

Primero se secaron los agregados en horno para impedir que la humedad pueda manipular los resultados y cantidades de dichas muestras. El ligante AC 20 utilizado es proveniente de la refinería de Esmeraldas, antes se modifica el asfalto con los aditivos de mezcla asfáltica.

Tabla 3.29. Tipo de material (Ecuador)

Agregados 1/2"	18%
Agregados 3/8"	24%
Arena # 1	30%
Arena Natural	28%

Fuente: (García, 2010)

Tabla 3.30. Combinada de Mezcla (Ecuador)

Tamices	% Pasante	Faja de Control	
3/4"	99,9	100	
1/2"	90,2	82,2	98,2
3/8"	82,5	75,5	89,5
4	59,7	52,7	66,7
8	45,9	39,9	51,9
16	34,6	28,6	40,6
30	28,8	23,8	33,8
50	17,7	12,7	22,7
100	8,2	4,2	12,2
200	5,7	2,7	8,7

Fuente:(García, 2010)

Tabla 3.31. Control de diseño (Ecuador)

Propiedad	Valor Obtenido	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Vacios (%)	4	3	5
V.M.A. (%)	15,4	15	----
Estabilidad (Lbs.)	2,46	1,8	----
Flujo	11,7	8	14

Fuente: (García, 2010)

Contenido Óptimo Asfalto: 7,20%

3.3.4.2. Ensayos de Asfalto

El material que se va a utilizar es un cemento asfáltico AC 20, este aditivo se procesa en Ecuador él se obtiene al realizar un proceso de destilación del crudo que se realiza en la refinería de Esmeraldas, esta refinería es la principal del Ecuador la cual es la única productora de asfalto y diluidos asfálticos. En la actualidad solo se produce un solo tipo de asfalto el cual consta con las características de un AC 20.

Tabla 3.32. Requerimientos de calidad del ligante por su viscosidad a 60°C

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60~C; Pa-s (P [1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s) = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25C, 100 g, 5s; 10-1 mm. Mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad, %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Perdida por calentamiento, %, máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60C; pa-s(P[1]), máximo	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)
Ductilidad a 25C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 C, %, mínimo	46	50	54	58

Fuente: (Ministerio de Obras Publicas y Comunicación, 2002)

Una vez obtenido los requerimientos del asfalto con sus respectivos ensayos se procede a verificar el cumplimiento con sus respectivos requerimientos ya mencionados.

Tabla 3.33. Variación de Viscosidad debido al Efecto del TFOT (Ecuador)

Propiedades Después de TFOT		AC 20 Esmeraldas	
Ensayo	Unidad	Rediset	Original
Pérdida de Masa	%	0	0,07
Ductilidad	cm	64	54
Penetración	décimas de mm	39	41
Viscosidad 60 C	cP	542000	889000
Rel. Viscosidad 60 C	-	1,63	3,37

Fuente: (García, 2010)

3.3.4.3. Ensayo Marshall (Ecuador)

Como ya conocemos las mezclas asfálticas en caliente son las más utilizadas y aplicadas al momento de la elaboración de mezclas asfálticas.

Con los datos ya conocidos de la granulometría tanto del agregado fino como del grueso se elaboró una mezcla en comparación de los materiales. Estos valores deben registrarse con las especificaciones de la norma ASTM D3515 de esta manera podremos conocer la demanda que necesita la mezcla asfáltica del asfalto, este porcentaje también se lo conoce como porcentaje del asfalto teórico.

Tabla 3.34. Requisitos del Ensayo Marshall (Ecuador)

Tipo de Tráfico	Muy pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Criterio Marshall								
# de golpes (por cara)	75		75		50		50	
Estabilidad (lb-f)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (plg/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% vacíos	3	5	3	5	3	5	3	5

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas y Comunicación, 2002)

Tabla 3.35. Diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall (Ecuador)

Porcentaje de Asfalto	Bulk (gr/cm3)	Estabilidad (lb-fuerza)	Flujo (in/100)	V.A	VAM	VAF
6	2.045	2083	8			
6	2.042	2047	8	7.8	16.58	53
6	2.016	2070	8			
6.5	2.071	2314	9			
6.5	2.063	2325	9	5.75	15.72	63
6.5	2.063	2278	11			
7	2.086	2456	11			
7	2.087	2446	12	4.22	15.32	72
7	2.089	2492	11			
7.5	2.087	2409	13			
7.5	2.077	2363	13	3.79	15.94	76
7.5	2.084	2499	12			
8	2.077	2225	14			
8	2.073	2141	14	3.53	16.67	79
8	2.078	2204	15			

Fuente: (García, 2010)

Tabla 3.36. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Ecuador)

Porcentaje de Asfalto	Bulk (gr/cm3)	Estabilidad (lb-fuerza)	Flujo (in/100)	V.A	VAM	VAF
6.00	2.034	2066.7	8.0	7.80	16.58	53.00
6.50	2.066	2305.7	9.7	5.75	15.72	63.00
7.00	2.087	2464.7	11.3	4.22	15.32	72.00
7.50	2.083	2423.7	12.7	3.79	15.94	76.00
8.00	2.076	2190.0	14.3	3.53	16.67	79.00

Fuente: (García, 2010)

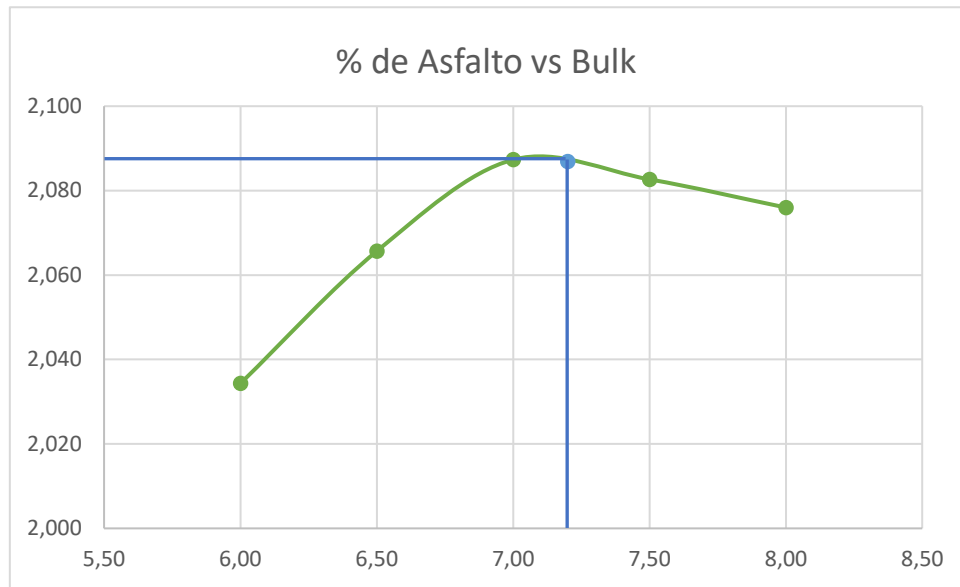


Gráfico 3.17. Porcentaje de asfalto vs Densidad de Bulk (Ecuador)

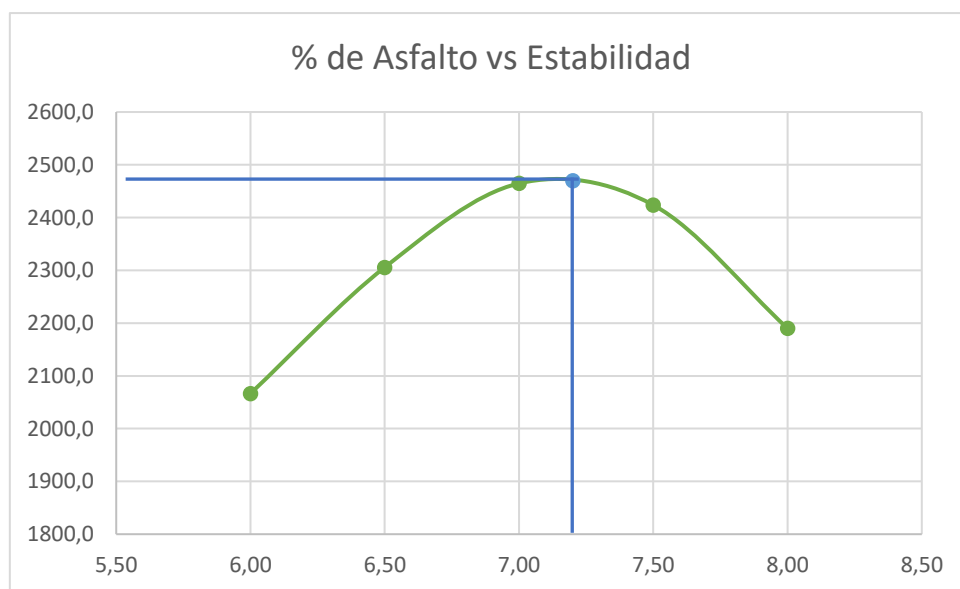


Gráfico 3.18. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ecuador)

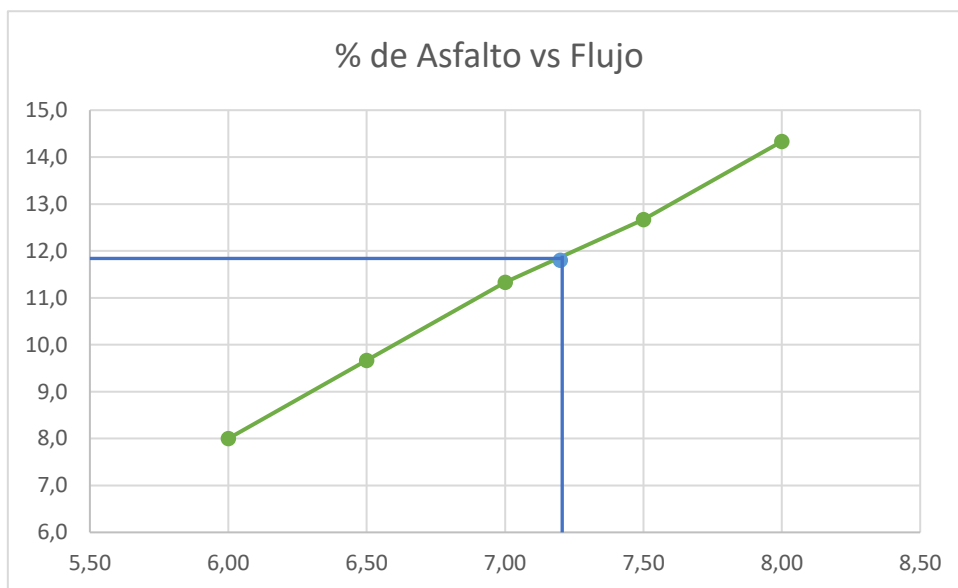


Gráfico 3.19. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ecuador)

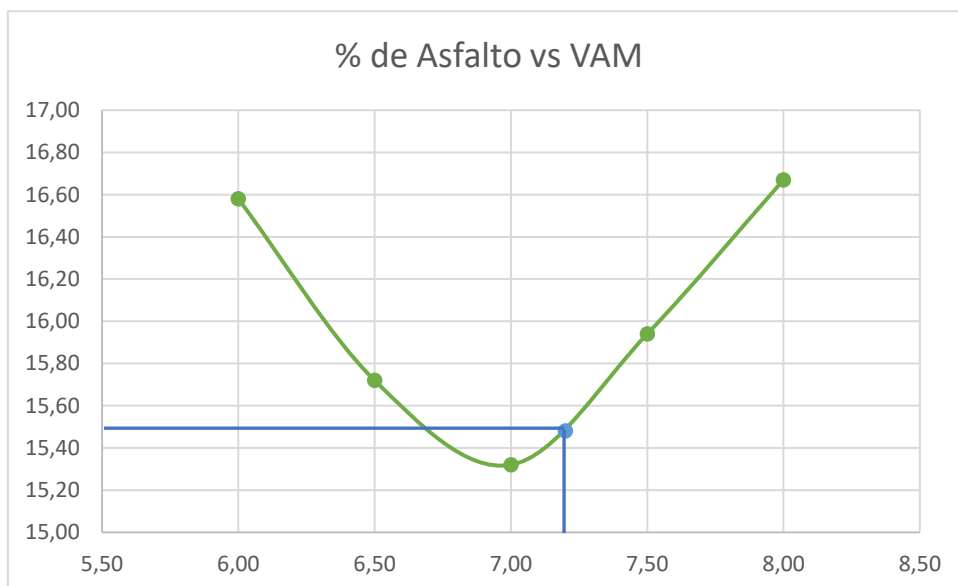


Gráfico 3.20. Porcentaje de asfalto vs VAM. (Ecuador)

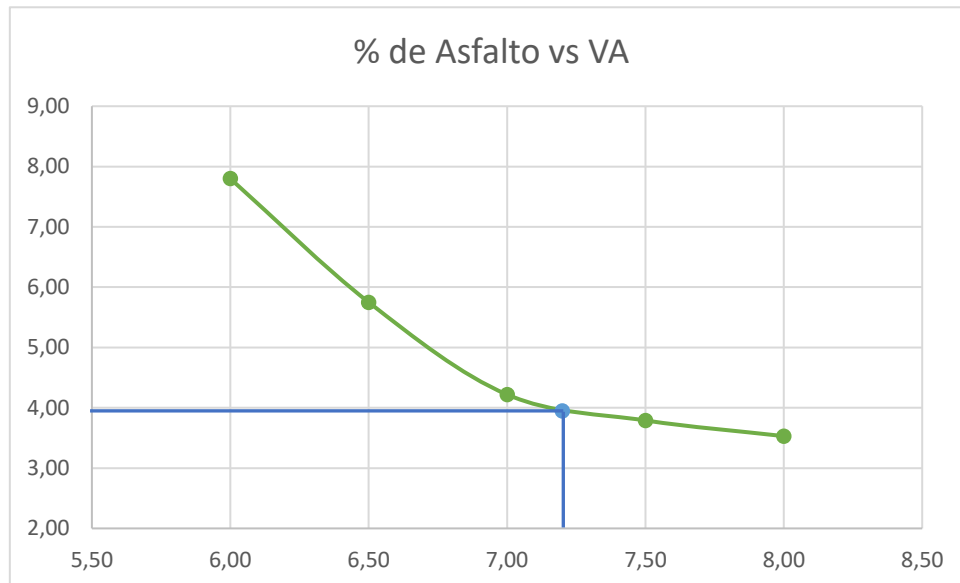


Gráfico 3.21. Porcentaje de asfalto vs VA. (Ecuador)

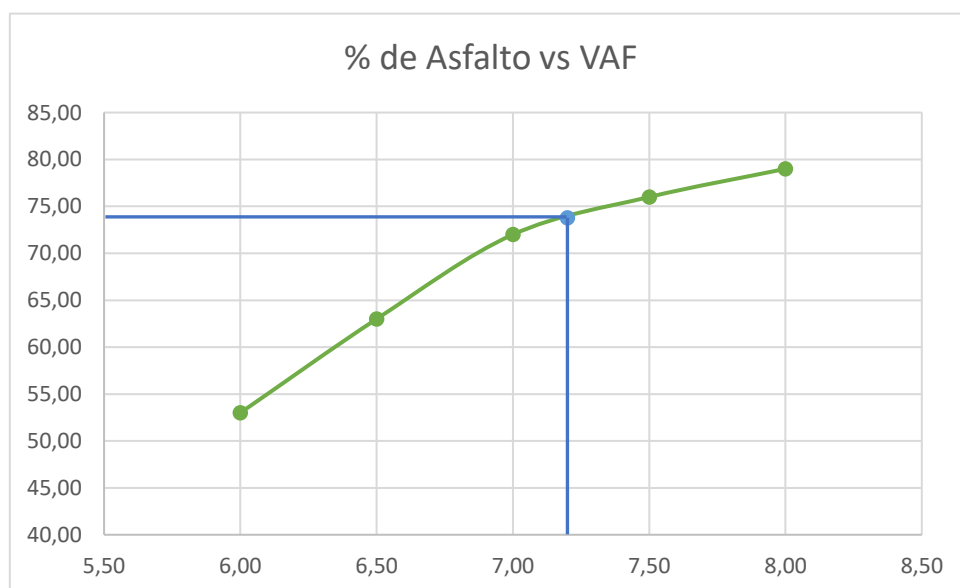


Gráfico 3.22. Porcentaje de asfalto vs VAF. (Ecuador)

Mediante la elaboración de las gráficas de Porcentaje de asfalto vs los parámetros determinados en los ensayos de Marshall se observa que se pudo determinar que un porcentaje óptimo de la mezcla es del 7.20% para este caso de estudio.

Tabla 3.37. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ecuador)

Porcentaje de Asfalto	Bulk (gr/cm ³)	Estabilidad (lb-fuerza)	Flujo (in/100)	V.A	VAM	VAF
7.20	2.0869	2470	11.8	4.0	15.48	73.8

Fuente: (García, 2010)

3.3.4.4. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Ecuador)

Al obtener los datos se observa que ninguna mezcla tiene vacíos menores al 4% lo que se obtuvo en las pruebas de la primera fase. En la segunda fase se consideró mantener en el horno por 3 horas a la temperatura de compactación, esto permitió que sea absorbido por el agregado y también endurecerse, por otra parte, si fuera menos asfalto y siendo este más viscoso lo cual sería más trabajoso de compactar (García, 2010).

La mezcla asfáltica convencional resultó entre 4 y 6% de vacíos, estos datos fueron aceptables ya que fueron compactadas a 50 golpes por cara. Por otro lado, las mezclas con Rediset compactadas a 80 grados tuvieron vacíos muy altos.

De acuerdo a estos datos obtenidos se optó compactar las briquetas con 2% de Rediset a 100 °C, los cuales se obtuvo similares densidades a las del asfalto convencional que fueron compactadas a 130 °C.

Tabla 3.38. Resultado de porcentaje de Vacíos en diferentes temperaturas (Ecuador)

Temp.	Comp.	Vacíos	
		Asfalto Original	Rediset
70			3,57
90		6,61	3,19
110		5,67	0,2
130		2,32	4,09
150		3,7	3,25

Fuente:(García, 2010)

Tabla 3.39. Estabilidad Marshall (Ecuador)

Briqueta	Aditivo	Temp. Comp.	Flujo	Estabilidad [Kg]	estabilidad [Lb]	Vacíos [%]
4	Rediset	80	16	1722,54	3799,92	7,7
7	Rediset	80	16	1474,44	3252,61	7,1
18	Rediset	80	14	1372,8	3028,40	7,2
20	Rediset	80	16	909,72	2006,84	7,9
24	Rediset	80	13	1111,46	2451,88	8,2
			Promedio	1318,19	2907,93	7,62
34	Original	130	15	1462	3225,17	6,1
35	Original	130	16	1931,16	4260,14	4,4
36	Original	130	20	2451,28	5407,52	3,8
39	Original	130	14	2513,28	5544,3	4,6
40	Original	130	13	1537,99	3392,81	5
			Promedio	1979,14	4365,99	4,78
70	Rediset	100	12	1715,7	3784,83	4,6
72	Rediset	100	12	1711,22	3774,95	4,5
74	Rediset	100	14	1654,62	3650,09	4,9
76	Rediset	100	14	1420,86	3134,42	5
78	Rediset	100	13	1403,52	3096,17	5,2
			Promedio	1581,18	3488,09	4,84

Fuente: (García, 2010)

Se observa en la tabla que los dos especímenes que presentan una estabilidad favorable con Rediset a una temperatura de compactación 100°C y también las mezclas convencionales compactadas a 130°C, estas muestras cumplen con las especificaciones de diseño.

3.3.5. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Rediset en Colombia

3.3.5.1. Metodología

En la tabla se muestra los valores obtenidos de los ensayos del material granular los cuales son conocidos como material pétreo, estos materiales se han utilizado durante toda la investigación (H. Rondón et al., 2016).

Se realizaron ensayos en laboratorio donde se pudieron caracterizar los agregados pétreos y el cemento asfáltico, esto nos permite tener un análisis con el cual se puede observar si los materiales son aceptables. El ligante AC 60-70 utilizado en el asfalto modificado en el cual se agregó 2.0% del Rediset por el peso del cemento asfáltico.

Tabla 3.40. Caracterización de los agregados (Rediset Colombia)

Ensayo	Método	Resultados
Porcentaje de partículas fracturas en agregados gruesos	AASHTO T 335	97%
Forma - índices planos	NLT 354-91	0,80%
Solvencia de los agregados mediante el uso de sulfatos de magnesio	AASHTO T 104	0%
Abrasión en el aparato Micro-Deval	AASHTO TP 58	12,40%
Abrasión en la máquina de los ángeles	AASHTO T 96	27,30%
10% de finos (condición seca) - Valor de trituración del agregado	BS 812 Part 110-1990	163,3 kN
Fracción fina		
Equivalente de arena	AASHTO T 176	81%
Solvencia del agregado mediante el uso de sulfato de sodio o sulfatos de magnesio	AASHTO T 104	1%
Límite líquido y plástico	AASHTO T 90	0%

Fuente:(H. Rondón et al., 2016)

3.3.5.2. Caracterización del cemento asfáltico

Este ensayo se realizó para conocer el contenido óptimo del cemento asfáltico (asfalto CA 60-70 modificado y agregado pétreo), se trabajó con el CA 60-70 debido a que es el más utilizado en la red vial de Colombia, para este ensayo de contenido óptimo de cemento asfáltico se elaboró 5 briquetas, con las cuales se analizaron para los porcentajes 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%. Considerando las especificaciones del ensayo Marshall AASHTO T 245-97

Tabla 3.41. Requerimientos de calidad del ligante

Propiedad	MÉTODO	UNIDAD	AC 60-70	Rediset WMX
Penetración	AASHTO T 49	0,1mm	68,5	60,5
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-0,1	-
Ductilidad	AASHTO T 51	cm	100	94
Gravedad Especifica	AASHTO T 228	g/cm ³	1,01	1,01
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53	°C	51,3	62,8
Viscosidad 60°C	AASHTO T 316	Pa-s	189	-
Viscosidad 135°C	AASHTO T 316	Pa-s	0,34	0,76
Ensayos sobre residuos RTFOT				
% de pérdida de masa (RTFOT)	AASHTO T 240	%	0,21	-
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, en% de la penetración original	AASHTO T 49	%	71,5	69,4
Aumento del punto de ablandamiento para muestras RTFO envejecidas	AASHTO T 53	°C	4	16,6

Fuente:(H. Rondón et al., 2016)

3.3.5.3. Ensayo Marshall

El método Marshall se realizó en el ensayo ya que es el más utilizado en América Latina para la elaboración de mezclas asfálticas calientes.

Este método se ejecutó para obtener el contenido óptimo de asfalto con una temperatura de 120 °C Y 130°C, luego se implementó a las mezclas asfálticas modificadas con diferentes temperaturas y como referencia para un análisis de comparación.

Para este ensayo se elaboró 5 briquetas las cuales fueron compactadas con 75 golpes en las que se utilizó para cada porcentaje de asfalto que va entre 6.5%, 6.0%, 5.5% y 5.0%, siguiendo las especificaciones de la norma AASHTO T 245-97 que debe cumplir un mínimo de tres muestras para cada porcentaje de cemento asfáltico.

Tabla 3.42. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Rediset Colombia)

% óptimo de asfalto	Estabilidad		Flujo		Porcentaje de Vacíos [%]
	[kg]	[lbf]	[mm]	[in/100]	
5,4	1840	4056,51	3,3	12,9921	5,6

Fuente:(H. Rondón et al., 2016)

3.3.6. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Husil en Colombia

3.3.6.1. Metodología

Esta investigación realizada tiene como objetivo un enfoque cuantitativo y de tipo práctico, por otro lado, se realizó ensayos a los materiales (cemento asfáltico y agregados pétreos) y las mezclas asfálticas, lo cual nos brindan información numérica, ya que, al ser interpretada y analizada, podemos identificar cual mezcla tiene un mejor comportamiento mecánico. Siguiendo las especificaciones establecidas en la norma INVIAS (2013) para la fabricación de mezclas calientes.

3.3.6.2. Ensayos a la mezcla de control o referencia

El ensayo lo realizaron con la finalidad de llegar a conocer el porcentaje óptimo del ligante (agregado pétreo natural y asfalto CA 60-70 sin modificar), se elaboraron cinco briquetas que fueron compactadas a 75 golpes por cara, con el que se analizaron para los porcentajes de 6.0%, 5.5%, 5.0% y 4.5%. Considerando las especificaciones del ensayo Marshall (INV. E-748).

3.3.6.3. Caracterización de los agregados

En la Tabla 3.32 se muestran valores obtenidos en los ensayos del material granular también conocido como material pétreo natural.

Tabla 3.43. Resultados de caracterización de agregados (Colombia)

Ensayo	Método	Requisitos	Resultados
Equivalente de arena	INV. E-133-13	50% min.	70%
Gravedad específica del agregado grueso	AASHTO T 84-00	-	2,64
Gravedad específica del agregado fino	AASHTO T 84-00	-	2,52
Absorción agregado grueso	AASHTO T 85-91	-	2,01%
Absorción agregado fino	AASHTO T 85-91	-	1,76%
Resistencia en Máquina de los Ángeles	INV. E-218, 219	35% máx.	22,90%

Fuente: (Romero & Valencia, 2019)

- Según las especificaciones (INVIAS, 2013) el agregado pétreo natural tiene características que se encuentra dentro del rango cumpliendo los requisitos de calidad con las cuales se podría elaborar mezclas de concreto asfáltico.
- Por otro lado, el desgaste por abrasión e impacto, el agregado grueso presenta una excelente resistencia, como su respuesta al fracturamiento de partículas.
- Las partículas tienen una forma óptima con la cual se puede elaborar las mezclas asfálticas.

- En cuanto a las partículas finas se pudo notar que no tenían contaminación por materiales indeseables como materia orgánica, polvo y arcilla.

3.3.6.4. Ensayo de cemento asfáltico

El material que se va a utilizar es un cemento asfáltico CA 60-70, los cuales se realizarán ensayos básicos que se consideran en los lineamientos (INVIAS, 2013), como podemos observar en la tabla 2. Donde se observa que tanto como el agregado pétreo, el asfalto cumple con los requerimientos de calidad que se considera en las especificaciones (INVIAS, 2013) para elaborar mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 3.44. Resultado de los Requisitos del cemento asfáltico AC 60-70

ENSAYO	MÉTODO	UNIDAD	CA 60-70	RESULTADO
Ductilidad (25°C, 50 mm/min)	INV E-702	Cm	100 min	>118,5
Penetración (25°C, 100g, 5s)	INV E-706	0,1 mm	60 min	60
Punto de ignición y punto de llama mediante la copa abierta de Cleveland.	INV E-709	°C	230 min	Punto de ignición: 298°C Punto de llama: 310°C
Punto de ablandamiento	INV E-712	°C	-	44°C

Fuente: (Romero & Valencia, 2019)

3.3.6.5. Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall) (Colombia)

Como sabemos este método de Marshall es el más utilizado en América latina para la elaboración de mezclas asfálticas calientes.

Al conocer los resultados de la granulometría tanto del agregado grueso como del fino se pudo desarrollar una mezcla de comparación de los materiales. Estos resultados deben cumplir con las especificaciones de la norma INVIAS (2013) de esta manera se podrá

observar los valores óptimos que se necesita para la mezcla asfáltica, el cual también se lo conoce como porcentaje del asfalto teórico (Romero & Valencia, 2019).

Se realiza el ensayo Marshall de la mezcla MDC-19 convencional de referencia. Las temperaturas con las que se realizaron las mezclas fueron de 150 C y 140 C con las que se fabricaron y compactaron, respectivamente. Se optó por dichas temperaturas, al ser escogidas de acuerdo al ensayo de viscosidad que se desarrolló al CA 60-70, efectuando con el rango de la especificación para mezclas del tipo denso. El contenido de vacíos y la densidad de bulk se desarrollaron mediante las especificaciones de ensayo ASTM D2726.

Tabla 3.45. Resultado de cada porcentaje de asfalto (Colombia)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad Bulk [gr/cm ³]	Vacíos en la mezcla [%]	Vacíos en agregados [%]	VAF
	[kN]	[lb-fuerza]	[mm]	[in/100]				
4,5	11,26	2531	3,99	16	2,242	6,77	16,74	59,56
5,0	12,12	2725	3,81	15	2,266	5,12	16,31	68,61
5,5	12,41	2790	3,73	15	2,287	3,53	15,96	77,88
6,0 0	11,31	2543	4,24	17	2,299	2,35	15,98	85,29

Fuentes: (Romero & Valencia, 2019)

Tabla 3.46. Requisitos para ensayo Marshall (Colombia)

Características	Normas de ensayo INVIAS	MDC, MSC, MGC			MAM	
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (# golpes)	E-748	50	75	75	75	
Estabilidad mínima [N]	E-748	5000	7500	9000	15000	
Flujo [mm]	E-748	2-4	2-4	2-3,5	2-3	
Estabilidad/Flujo [knN/mm]	E-748	2-4	3-5	3-6	-	
Vacíos con aire (Va) [%]	Rodadura		3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia	E-736, 799	4-8	4-8	4-7	4-6
	Base		-	5-8	5-8	4-6
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Mezclas 0		≥ 13	≥ 13	≥ 13	-
	Mezclas 1		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 2	E-799	≥ 15	≥ 15	≥ 15	-
	Mezclas 3		≥ 16	≥ 16	≥ 16	-
Vacíos llenos de asfalto (VAF) [%] para rodadura e intermedia	E-799	65-80	65-78	65-75	63-75	
Relación llenante/asfalto efectivo en peso	E-799		0,8-1,2		1,2-1,4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745		Valor crítico			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm	E-741	7,5	7,5	7,5	7,5	

Fuente: (INVIAS, 2013)

Para hallar el porcentaje óptimo del asfalto se debe desarrollar gráficos de porcentaje de asfalto vs los parámetros obtenidos en la **Tabla 3.34**

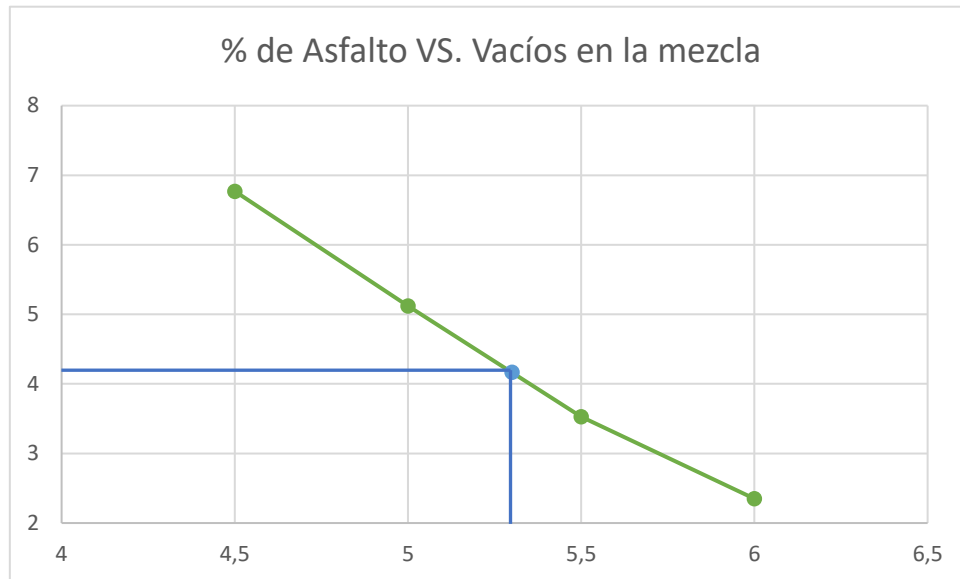


Gráfico 3.23. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Colombia)

Como podemos observar en la **Gráfico 3.18** se ha escogido el 5,3% como porcentaje óptimo de asfalto ya que cumple con los requisitos del método de ensayo Marshall, otro punto que se puede tomar en cuenta es que las especificaciones consideran que el porcentaje de vacíos óptimo debe de oscilar entre 4 y 6, por lo que se ha seleccionado el valor 4,1.

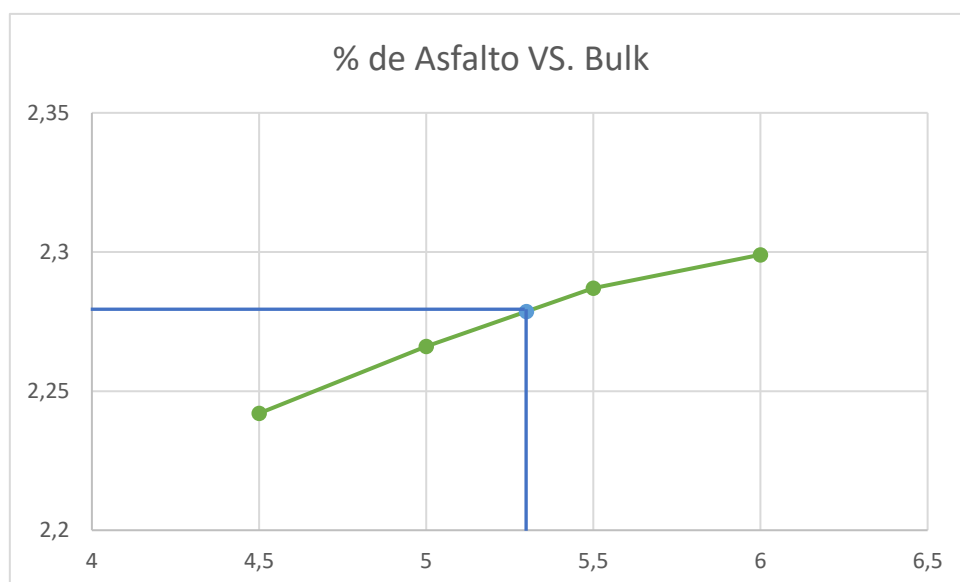


Gráfico 3.24. porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Colombia)

En la **Gráfico 3.19** podemos observar la variación a la que se encuentra sometida la densidad Bulk vs variación del porcentaje de asfalto en las distintas briquetas fabricadas, también se puede observar que la densidad aumenta mediante el porcentaje de asfalto se incrementa.

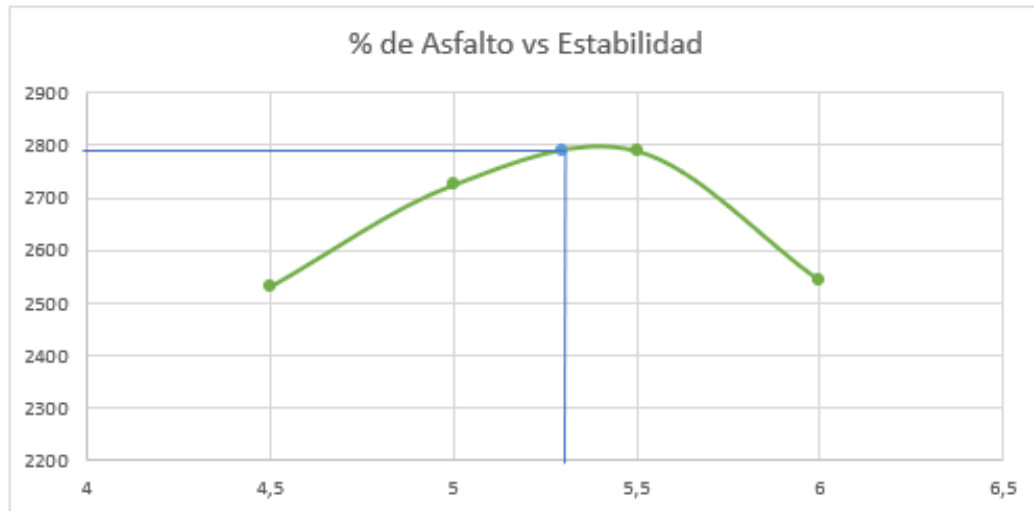


Gráfico 3.25. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Colombia)

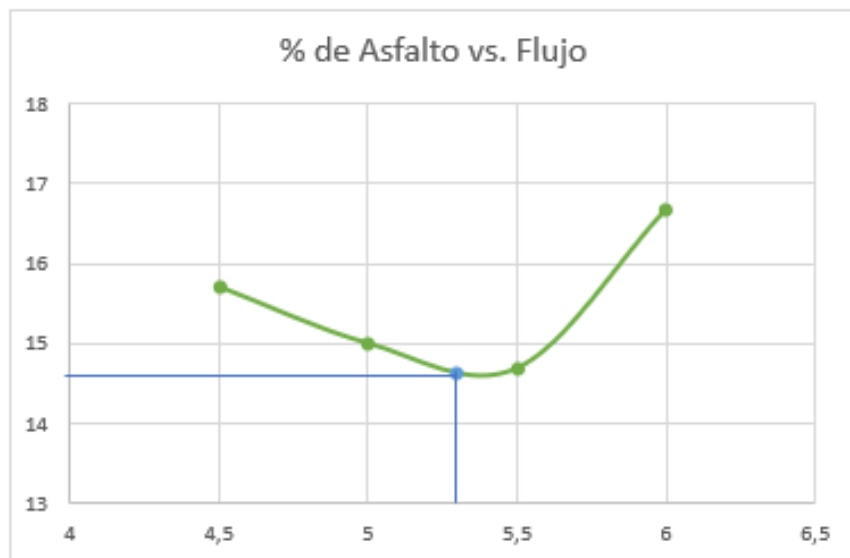


Gráfico 3.26 porcentaje de asfalto vs Flujo (Colombia).

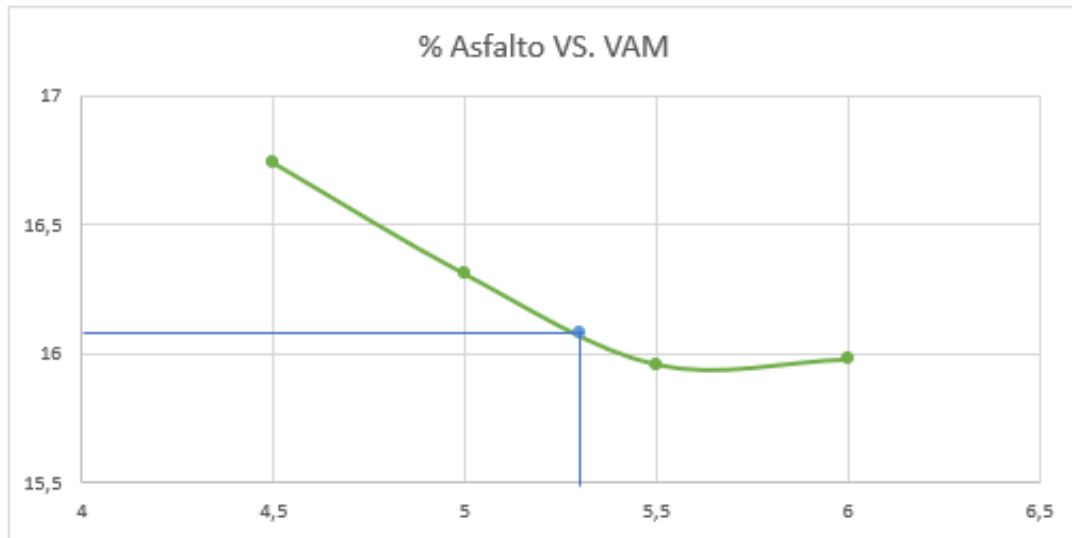


Gráfico 3.27. Porcentaje de asfalto vs VAM. (Colombia)

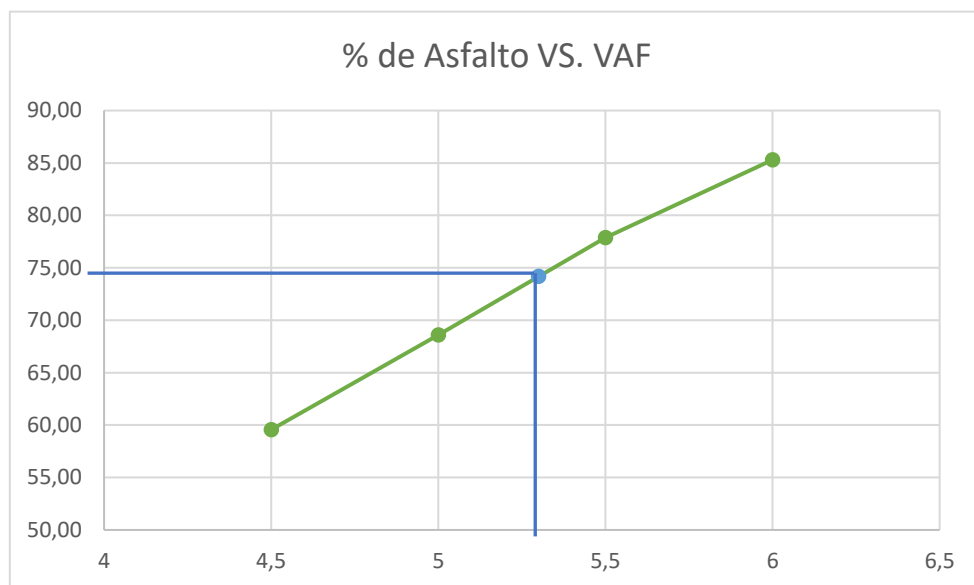


Gráfico 3.28. Porcentaje de asfalto vs VAF (Colombia)

A continuación, se presentará una tabla de los resultados obtenidos de la mezcla.

Tabla 3.47. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 5.3% (Colombia)

Porcentaje de asfalto	Estabilidad	flujo	Densidad Bulk [gr/cm ³]	vacíos en la mezcla [%]	vacíos en agregados [%]	VAF
5,3	2790	14,6	2,2786	4,17	16,08	74,17

Fuente: (Romero & Valencia, 2019)

3.3.6.6. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Colombia)

En el desarrollo de la investigación se decidió optar por reducir la temperatura inicial en 30 °C comenzando con una temperatura de fabricación de 150 °C, 140°C, 130°C y 120°C con la finalidad de conocer el impacto que genera la disminución de temperatura en las mezclas asfálticas, de la misma manera la aplicación del aditivo químico Husil toma como referencia aplicar el 1% del aditivo con respecto de la masa del asfalto (Romero & Valencia, 2019).

Una vez ya determinado el porcentaje óptimo de las mezclas de 5.3% se procede a la elaboración de las briquetas elaboradas con las temperaturas ya mencionadas de la misma manera que los distintos aditivos se dividen en dos grupos una analizando la mezcla con aditivo y el otro sin aditivo HUSIL.

Tabla 3.48. Resultados del método Marshall aplicadas en mezclas asfálticas tibias. Sin Husil
(Colombia)

Tipo	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos en la Mezcla [%]	VMA [%]	VFA [%]
	[kN]	[lb-f]	[mm]	[in/100]				
Convencional - 150°C	12,70	2855,07	3,70	14,57	2,28	3,98	15,94	75,01
Convencional - 140°C	12,06	2711,20	3,88	15,28	2,26	5,11	16,92	69,84
Convencional - 130°C	10,95	2461,66	3,97	15,63	2,23	6,33	17,99	64,84
Convencional - 120°C	10,41	2340,26	4,23	16,65	2,19	7,7	19,2	59,87

Fuente: (Romero & Valencia, 2019)

Tabla 3.49. Resultados del método Marshall aplicada en mezclas tibias. Con Husil
(Colombia)

Tipo	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos en la Mezcla [%]	VMA [%]	VFA [%]
	[kN]	[lb-f]	[mm]	[in/100]				
Convencional - 150°C	12,70	2855,07	3,70	14,57	2,28	3,98	15,94	75,01
Convencional - 140°C	13,63	3064,15	3,65	14,37	2,27	4,57	16,45	72,23
Convencional - 130°C	12,93	2906,78	3,70	14,57	2,25	5,45	17,22	68,36
Convencional - 120°C	12,38	2783,13	3,76	14,8	2,22	6,53	18,17	64,07

Fuente: (Romero & Valencia, 2019)

3.3.7. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Husil (Colombia – Bogotá)

3.3.7.1. Caracterización de agregados

Los agregados con los que se van a realizar los laboratorios deben de cumplir con los requisitos de las normas establecidas en el manual de las INVIAS, a continuación, se presentara la tabla de los requisitos de los agregados con los resultados obtenidos con los materiales que se realizó la investigación.

Tabla 3.50. Requisitos de agregados pétreos (Bogotá - Colombia)

Ensayo	Método	Requisitos	Resultados
Gravedad específica agregado de 1"		--	2.51
Gravedad específica aparente agregado de 1"		--	2.61
Absorción agregada de 1"		--	1.75%
Gravedad específica agregado de 3/4"		--	2.62
Gravedad específica aparente agregado de 3/4"		--	2.65
Absorción agregada de 3/4"	AASHTO T 84-00	--	1.85%
Gravedad específica agregado de 1/2"	AASHTO T 85-91	--	2.48
Gravedad específica aparente agregado de 1/2"		--	2.65
Absorción agregada de 1/2"		--	2.20%
Gravedad específica arena de río		--	2.51
Gravedad específica aparente arena de río		--	2.64
Absorción agregada de arena de río		--	1.68
Equivalente de arena	AASHTO T 176 - 02	50% mínimo	76.00%
Caras fracturadas a una cara	ASTM D 5821 - 01	75% mínimo	87.00%
Límites líquido y plástico	ASTM D 4318-00	0%	0.00%
Índice de alargamiento	NLT 354-91	10% máximo	9.50%
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	10% máximo	9.50%
Ataque en sulfato de magnesio	ASTM C 88 - 99a	18% máximo	12.90%
Microdeval	AASHTO T327 - 05	25% máximo	22.30%
10% de finos (resistencia en seco)		90kN mínimo	115 kN
10% de finos (relación húmeda/seco)	DNER-ME 096-98	75% mínimo	83.00%
Resistencia en Máquina de los Ángeles	AASHTO T 96 - 02	35% máximo	24.60%

Fuente: (Camargo, 2016)

3.3.7.2. Requisitos de cemento asfáltico

Se ha considerado un cemento asfáltico CA 60-70 ya que es utilizado en el sector de Barrancabermeja por una empresa Colombiana ECOPETROL, se ha considerado este cemento asfáltico ya que es el más común utilizado en Colombia, se realizaron los respectivos ensayos que solicitan las INVIAS – 2013 satisfaciendo los valores solicitados en la siguiente tabla.

Tabla 3.51. Requisitos de cementos asfáltico

Ensayo	Método	Unidad	Requisitos		Resultados
			Minimo	Maximo	
Penetracion (25° C, 100g, 5s)	ASTM D-5	0.1 mm	60	60	62.5
Indice de penetracion	NLT 181/88	--	-1.2	+0.6	-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D 36-95	°C	48	54	52.5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1500	--	1750
Gravedad Especifica	ASTHO T 228-02	--	--	--	1.012
Viscosidad a 135°C	AASTO T-316	Pa-s	--	--	0.36
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	100	--	>105

Fuente: INVIAS (2013)

3.3.7.3. Ensayo Marshall en Mezcla asfáltica caliente (Bogotá – Colombia)

En base a la norma INV E 748 se llegó a determinar los valores de la Estabilidad, Flujo los cuales nos ayudaran a determinar el porcentaje óptimo de la mezcla, estos valores deben de ser verificados en la tabla de parámetros de diseño de las mezclas asfálticas convencionales de la normativa INVIAS – 2013.

Tabla 3.52. Parámetros de diseño de las mezclas asfálticas convencionales (Bogotá – Colombia)

Características	Normas de ensayo INVIAS	MDC, MSC, MGC			MAM	
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (# golpes)	E-748	50	75	75	75	
Estabilidad minima [N]	E-748	5000	7500	9000	15000	
Flujo [mm]	E-748	2-4	2-4	2-3,5	2-3	
Estabilidad/Flujo [kN/mm]	E-748	2-4	3-5	3-6	-	
Vacíos con aire (Va) [%]	Rodadura	3-5	3-5	4-6	-	
	Intermedia	E-736, 799	4-8	4-8	4-7	4-6
	Base	-	5-8	5-8	4-6	
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Mezclas 0	≥ 13	≥ 13	≥ 13	-	
	Mezclas 1	E-799	≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 2	≥ 15	≥ 15	≥ 15	-	
	Mezclas 3	≥ 16	≥ 16	≥ 16	-	
Vacíos llenos de asfalto (VAF) [%] para rodadura e intermedia	E-799	65-80	65-78	65-75	63-75	
Relación llenante/asfalto efectivo en peso	E-799		0,8-1,2		1,2-1,4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745		Valor crítico			
Espesor promedio de pelícu de asfalto, mínimo μm	E-741	7.5	7.5	7.5	7.5	

Fuente: (Camargo, 2016)

Se presentan los valores de estabilidad, flujo y vacíos con los porcentajes de 4.5, 5, 5.5 y 6 % de asfalto el cual nos ayudara a determinar el porcentaje óptimo de la mezcla para proceder a la elaboración de las mezclas asfálticas tibias.

Tabla 3.53. Resultados obtenidos de las mezclas asfálticas con su porcentaje de CA

4.5			13.00		
4.5			11.50		
4.5	852.79	1880.060834	13.00	7.66	17.77
4.5			12.50		
4.5			12.50		
5			14.00		
5			15.00		
5	989.92	2182.377632	14.00	5.67	17.06
5			15.00		
5			14.00		
5.5			16.00		
5.5			17.00		
5.5	1042.67	2298.670282	15.00	4.87	17.41
5.5			15.00		
5.5			15.00		
6			15.00		
6			14.50		
6	1198.72	2642.698112	16.00	3.78	17.51
6			17.00		
6			16.00		

Porcentaje de Asfalto	Estabilidad (Kg)	Estabilidad (lb)	Flujo	V.A	VAM
4.5	852.79	1880.060834	12.5	7.66	17.77
5	989.92	2182.377632	14.4	5.67	17.06
5.5	1042.67	2298.670282	15.6	4.87	17.41
6	1198.72	2642.698112	15.7	3.78	17.51

Fuente: (Camargo, 2016)

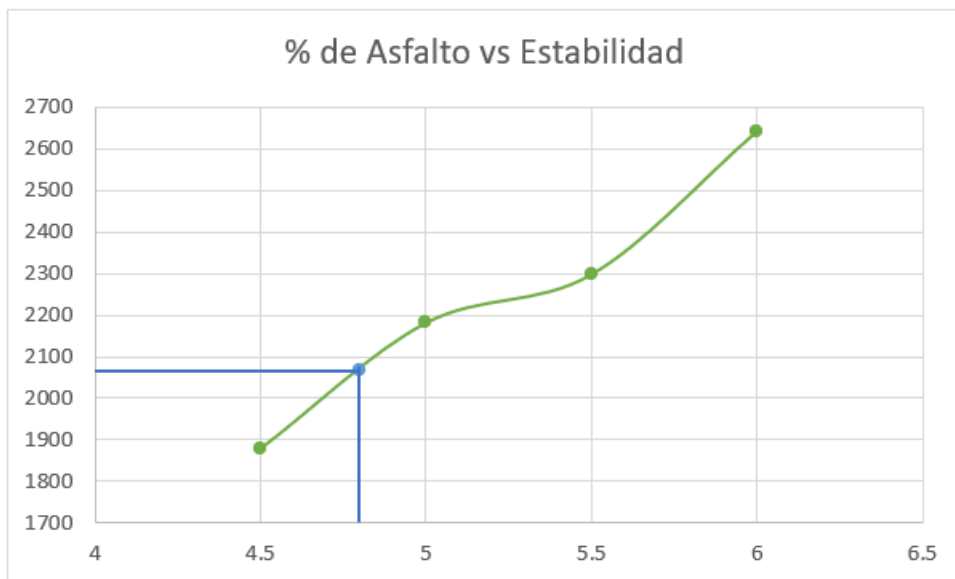


Gráfico 3.29. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Bogotá - Colombia).

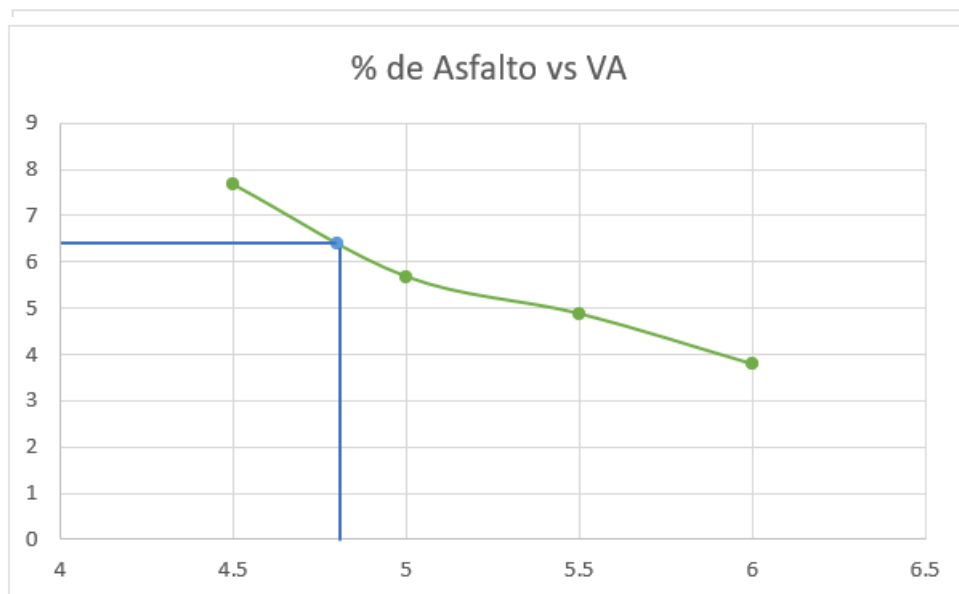


Gráfico 3.31. Porcentaje de asfalto vs VA (Bogotá - Colombia).

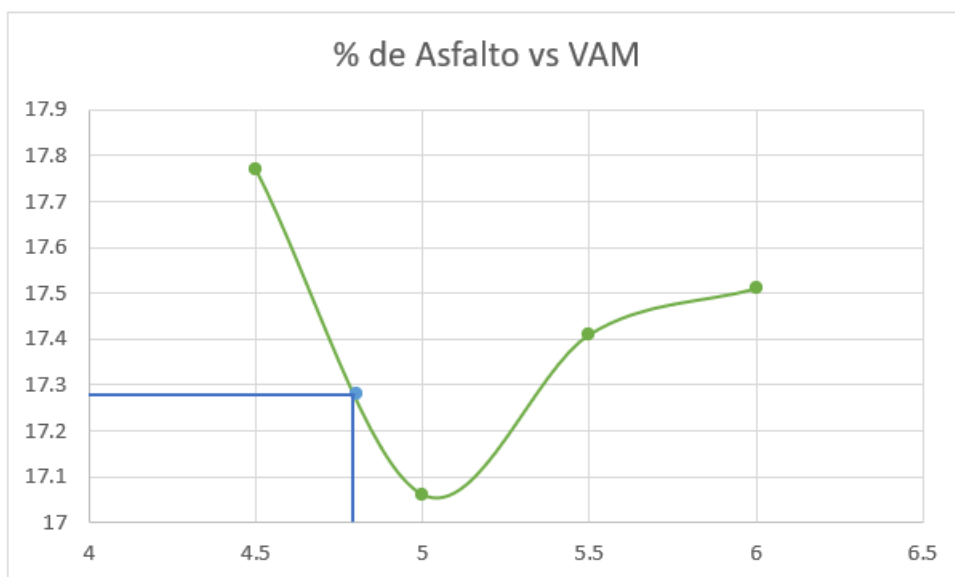


Gráfico 3.32. Porcentaje de asfalto vs VAM (Bogotá - Colombia).

Tabla 3.54. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ecuador)

Porcentaje de Asfalto	Estabilidad (Kg)	Estabilidad (lb)	Flujo	V.A	VAM
4.8	937.9	2067.69	13.65	6	17.28

3.3.7.4. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA) (Bogotá - Colombia)

Para el caso de investigación se consideraron las temperaturas entre 150 y 110 °C de esta manera se realizará una comparativa entre la variación de temperatura llegando a conocer cuál será el valor más óptimo de temperatura de compactación, de la misma manera se llevará a cabo una comparativa entre la mezcla asfáltica tibia con aditivo y sin la aplicación del aditivo

El aditivo a implementarse es conocido como HUSIL siendo aplicado a un porcentaje del 1% del peso del cemento asfáltico.

Tabla 3.55. Resultados de MAT con aditivo (HUSIL) y sin aditivo (Bogotá - Colombia).

	Temperatura	Estabilidad	Estabilidad	Observacion	Flujo	Flujo	Observacion	% V.A	Observacion	% VAM	Observacion	Estabilidad/ Flujo	Observacion
Aditivo (HUSIL 1%)	150	1422.87	3136.86	CUMPLE	3.35	13.4	CUMPLE	4.24	CUMPLE	15.05	CUMPLE	424.74	CUMPLE
	140	1480.28	3263.43	CUMPLE	3.35	13.4	CUMPLE	3.54	CUMPLE	14.45	CUMPLE	441.87	CUMPLE
	130	1152.24	2540.23	CUMPLE	2.92	11.68	CUMPLE	5.08	CUMPLE	15.8	CUMPLE	394.60	CUMPLE
	120	1144.04	2522.15	CUMPLE	3.02	12.08	CUMPLE	5.11	CUMPLE	15.82	CUMPLE	378.82	CUMPLE
	110	1070.23	2359.43	CUMPLE	3.02	12.08	CUMPLE	5.54	CUMPLE	16.21	CUMPLE	354.38	CUMPLE
Sin Aditivo	150	1041.52	2296.13	CUMPLE	3.86	15.44	CUMPLE	5.16	NO CUMPLE	16.04	CUMPLE	269.82	CUMPLE
	140	1053.83	2323.27	CUMPLE	3.61	14.44	CUMPLE	4.87	NO CUMPLE	15.76	CUMPLE	291.92	CUMPLE
	130	992.32	2187.67	CUMPLE	3.56	14.24	NO CUMPLE	7.07	NO CUMPLE	17.73	CUMPLE	278.74	NO CUMPLE
	120	967.72	2133.44	CUMPLE	3.28	13.12	NO CUMPLE	6.9	CUMPLE	17.57	CUMPLE	295.04	NO CUMPLE
	110	930.81	2052.06	CUMPLE	3.2	12.8	NO CUMPLE	6.56	CUMPLE	17.27	CUMPLE	290.88	NO CUMPLE

Fuente: (Camargo, 2016)

3.3.8. Recopilación de la Fase Experimental del tercer Aditivo Husil (Colombia – Bogotá)

3.3.8.1. Metodología (Colombia – Bogotá)

Este trabajo se lo realizo con un enfoque de producción de mezclas amigables con el medio económico y ambiental. También se realizaron ensayos de laboratorio donde se puede caracterizar el agregado pétreo y el cemento asfáltico, el cual nos brinda información con la cual se analiza si los materiales son los adecuados, por otro lado, se realizó el ensayo Marshal con el cual se pudo determinar el porcentaje optimo del cemento asfáltico para poder evidenciar cual mezcla tiene un mejor comportamiento mecánico. Siguiendo las normas establecidas en la norma INVIAS (2013) para la elaboración de mezclas calientes.

3.3.8.2. Caracterización de los agregados (Colombia – Bogotá)

En la Tabla se puede evidenciar los valores obtenidos en los ensayos del agregado pétreo originarios de la planta asfáltica CONGRESOL S.A.

Tabla 3.56. Caracterización del agregado pétreo

ENSAYO	VALOR
Peso Específico (g/cm ³)	2,65
Absorción	1,01
Máquina de los Ángeles [%]	28,6
Maquina Microdeval [%]	23,7
Azul de metileno [%]	3,5
Caras fracturadas [%]	87,5
Índice de alargamiento [%]	6
Índice de Aplanamiento [%]	9
Equivalente de arena [%]	87
Gravedad Especifica	2,57

Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016)

De acuerdo a las especificaciones los ensayos realizados para la caracterización de los agregados cumplen con los requisitos de calidad requeridos por INVIAS (2013) para la elaboración de mezclas asfálticas.

3.3.8.3. Caracterización del cemento asfáltico (Colombia – Bogotá)

Este ensayo se realizó para conocer el contenido óptimo del cemento asfáltico (asfalto CA 60-70 sin modificar y agregado pétreo), se trabajó con el CA 60-70 debido a que es el más utilizado en la red vial de Colombia, para este ensayo de contenido óptimo de cemento asfáltico se elaboró 5 briquetas, con las cuales se analizaron para los porcentajes 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%. Considerando las especificaciones del ensayo Marshall (INV E-748).

Tabla 3.57. Caracterización del cemento asfáltico

ENSAYO	MÉTODO	UNIDAD	VALOR
Penetración	ASTM D-5	0,1 mm	60
Punto de ablandamiento	INV E-712	° C	441,5
Ductilidad	ASTM D-113	cm	98
Punto de ignición	INV E-709	° C	308,5

Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016)

Estos resultados de la Tabla, se puede evidenciar que el asfalto cumple con las especificaciones de calidad que requiere las INVIAS (2013) para la elaboración de las mezclas asfálticas.

3.3.8.4. Diseño de mezclas asfálticas (Método Marshall) (Colombia – Bogotá)

El método Marshall se realizó en el ensayo ya que es el más utilizado en América Latina para la elaboración de mezclas asfálticas calientes.

Este método se ejecutó para obtener el contenido óptimo de asfalto con una temperatura de 150 °C, luego se implementó a las mezclas asfálticas modificadas con diferentes temperaturas y como referencia para un análisis de comparación.

Para este ensayo se elaboró veinte muestras las cuales se dividieron en 5 probetas en las que se utilizó para cada porcentaje de asfalto que va entre 6.0%, 5.5%, 5.0% y 4.5%, siguiendo las especificaciones de la norma E-748 que debe cumplir un mínimo de tres muestras para cada porcentaje de cemento asfáltico.

Tabla 3.58. Resultados de cada porcentaje de asfalto (Colombia-Bogotá)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	VMA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in			
4,5	1190,5	2624,6	3,78	14,882	2,293	4,33	14,55
5	1256,79	2770,75	3,66	14,409	2,303	3,2	14,62
5,5	1324,83	2920,75	3,76	14,803	2,296	2,82	15,33
6	1112,41	2452,44	4,09	16,102	2,288	2,47	16,08

Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016)

Mediante la Tabla ... se puede obtener el porcentaje optimo del asfalto mediante gráficos de porcentaje de asfalto vs los parámetros.

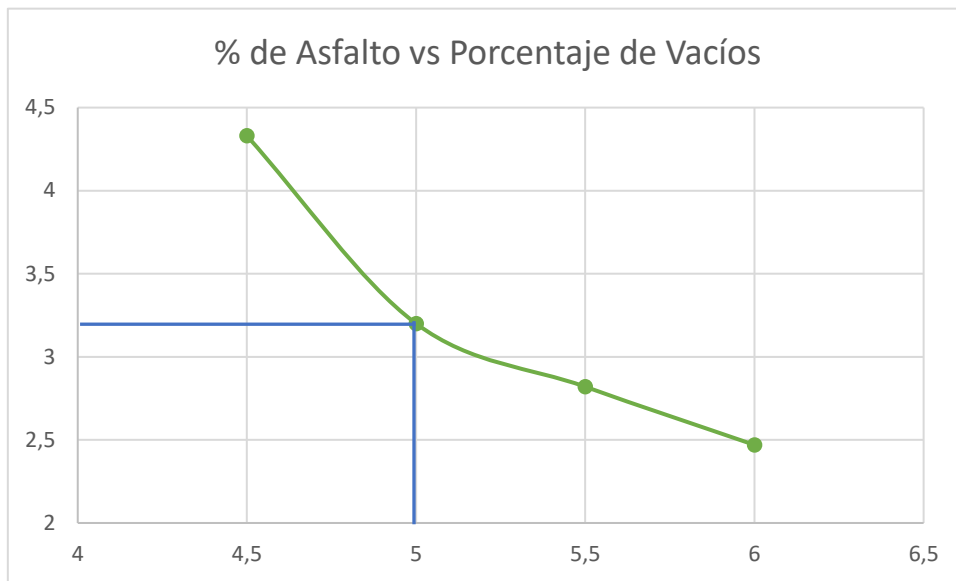


Gráfico 3.33. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Colombia - Bogotá)

Como se puede observar en el gráfico se ha escogido el 5% del contenido de asfalto ya que cumple con las especificaciones del método Marshall, por otro lado, se considera los requerimientos del porcentaje de vacíos que se encuentra entre 4 y 6 por lo que se ha seleccionado el valor de 3,2.

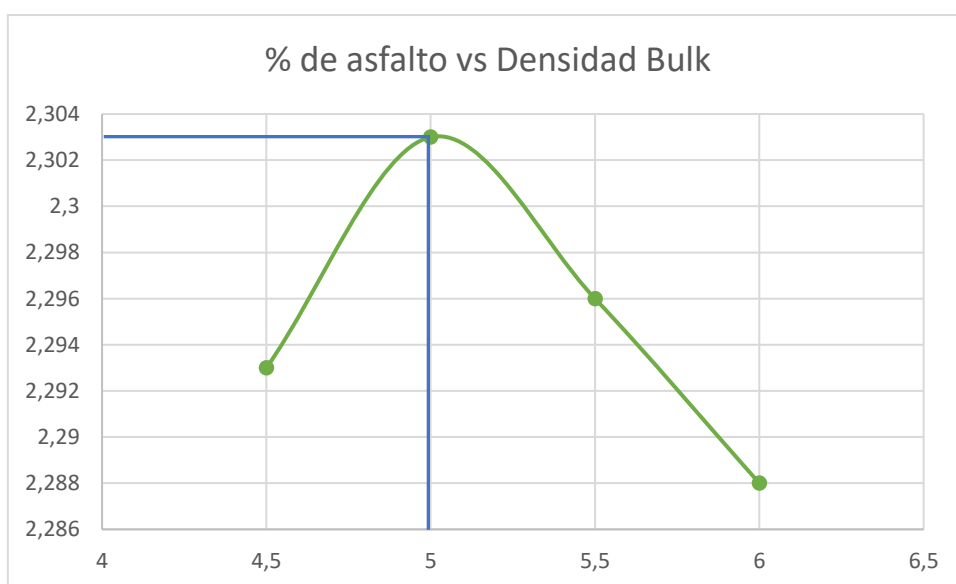


Gráfico 3.34. Porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Colombia - Bogotá)

En el Grafico podemos observar la variación que se encuentra la densidad Bulk vs variación del porcentaje de asfalto en las distintas briquetas fabricadas.

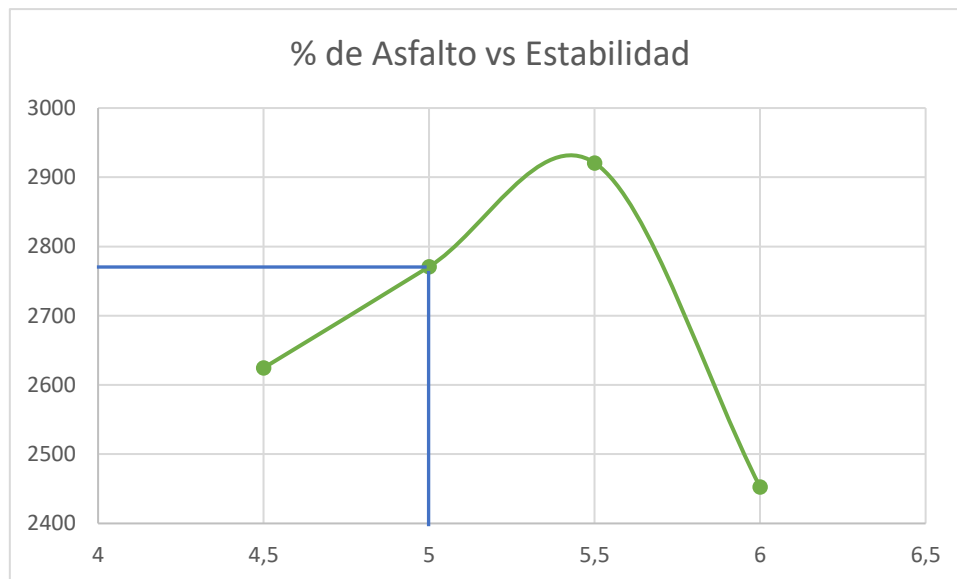


Gráfico 3.35. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Colombia - Bogotá)

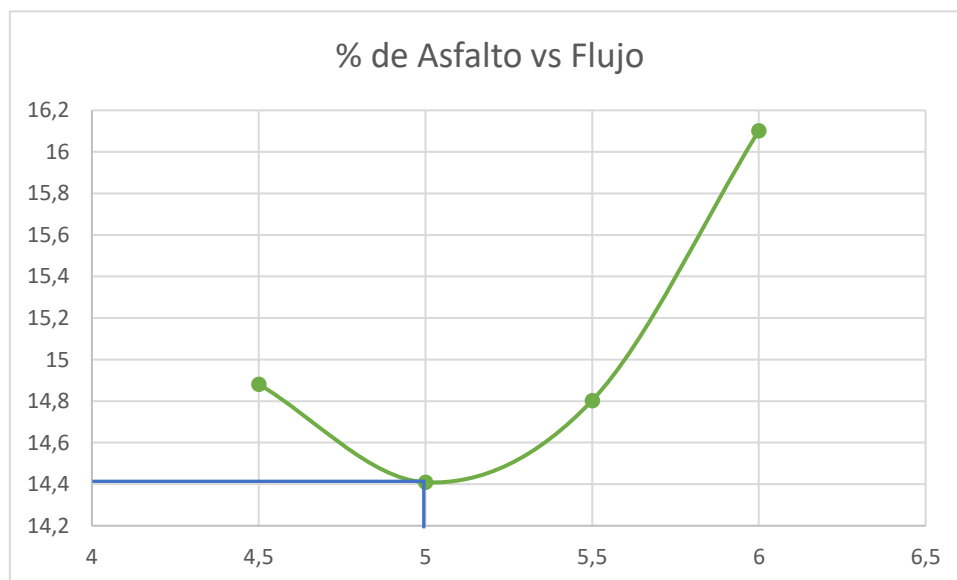


Gráfico 3.36. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Colombia - Bogotá)

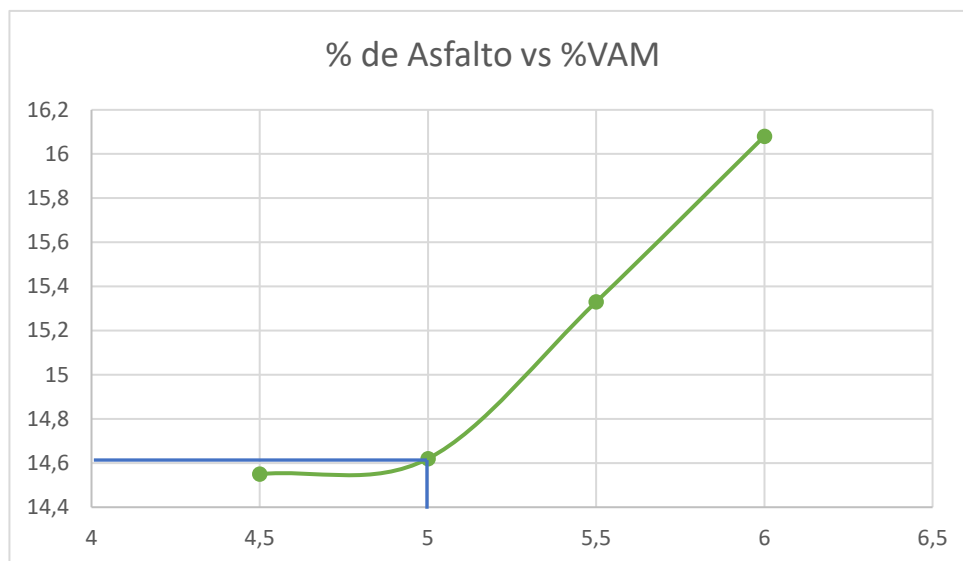


Gráfico 3.37. Porcentaje de asfalto vs % VAM

A continuación, se presentará una tabla de los resultados obtenidos de la mezcla.

Tabla 3.59. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Colombia - Bogotá)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	VMA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in			
5	1256,79	2770,75	3,66	14,409	2,303	3,2	14,62

3.3.8.5. Resultados de elaboración de mezclas asfálticas tibias (WMA) (Colombia- Bogotá)

En este ensayo se elaboraron especímenes las cuales fueron modificadas y diseñadas a diferentes temperaturas que están ente 110°C, 120°C y 130°C, también fueron desarrolladas con diferentes parámetros como Flujo, Estabilidad y la relación de vacíos y de acuerdo a los parámetros se desarrollaron los valores óptimos del aditivo HUSIL que toman como referencia aplicar 1% del aditivo con respecto a la masa del asfalto.

Tabla 3.60. Resultados del método Marshall aplicada en mezclas tibias (Colombia – Bogotá)

T - °C	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	VMA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in			
110	1272,74	2805,91	3,76	14,803	2,299777	3,34	14,73
120	1295,32	2855,69	3,84	15,118	2,303766	3,17	14,59
130	1374,5	3030,25	3,66	14,409	2,308639	2,96	14,4

Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016)

3.3.9. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Evotherm en el Salvador

3.3.9.1. Metodología

Esta investigación realizada tiene como objetivo un enfoque cuantitativo y de tipo práctico, por otro lado, se realizó ensayos a los materiales (cemento asfáltico y agregados pétreos) y las mezclas asfálticas, lo cual nos brindan información numérica, ya que, al ser interpretada y analizada, podemos identificar cual mezcla tiene un mejor comportamiento mecánico. Siguiendo las especificaciones establecidas en la norma AASHTO para la fabricación de mezclas calientes (Campos et al., 2014).

3.3.9.2. Ensayos a la mezcla de control o referencia

El ensayo lo realizaron con la finalidad de conocer con qué porcentaje de asfalto sería el más óptimo para trabajar (agregado pétreo natural y asfalto AC-30 sin modificar), se elaboraron cinco briquetas que fueron compactadas a 75 golpes por cara, con el que se analizaron por cada porcentaje de asfalto de 4.8% Y 5.8% Considerando las especificaciones del ensayo Marshall (INV. E-748) (Campos et al., 2014).

3.3.9.3. Caracterización de los agregados

En las siguientes tablas se muestran valores obtenidos en los ensayos del material granular también conocido como material pétreo natural.

Tabla 3.61. Ensayos a agregados grueso, grava 3/4"

ENSAYO	RESULTADO	PARÁMETRO
Gravedad Específica seca. ASTM C127	2,549	N/A
Absorción de agua. ASTM C-127	1,80%	N/A
Ensayo de resistencia a la abrasión en Máquina de Los Ángeles, ASTM C-131	16,0%	40% máx.
Caras Fracturada ASTM D5821	100%	90% min.
Partículas Planas y Alargadas ASTM D4791	1,35%	10% máx.
ENSAYO DE SANIDAD (SULFATO DE SODIO) ASTM C 88	0,30%	12% máx.
ÍNDICE DE DURABILIDAD ASTM D 3744	93,0%	35,0 min.

Fuente: (Campos et al., 2014)

Tabla 3.62. Ensayos a grava 1/2"

ENSAYO	RESULTADO	PARÁMETRO
Gravedad Específica seca. ASTM C127	2,542	N/A
Absorción de agua. ASTM C-127	1,90%	N/A
Ensayo de resistencia a la abrasión en Máquina de Los Ángeles, ASTM C-131	22,0%	40% máx.
Caras Fracturada ASTM D5821	100%	90% min.
Partículas Planas y Alargadas ASTM D4791	0,34%	10% máx.
ENSAYO DE SANIDAD (SULFATO DE SODIO) ASTM C 88	0,39%	12% máx.
ÍNDICE DE DURABILIDAD ASTM D 3744	93,0%	35% min.

Fuente: (Campos et al., 2014)

Tabla 3.63. Ensayos a la arena triturada

ENSAYO	RESULTADO	PARÁMETRO
Gravedad Específica seca. ASTM C127	2,520	N/A
Absorción de agua. ASTM C-127	2,37%	N/A
Equivalente de Arena, ASTM D 2419	82,5%	40% máx.
índice de plasticidad	N/P	90% min.
Ensayo de Sanidad (Sulfatos de Sodio) ASTM C 88	2,56%	10% máx.
% GRUMOS DE ARCILLA Y PARTÍCULAS FRIABLES EN LA MEZCLA DE AGREGADOS ASTM C 142	0,91%	12% máx.

Fuente: (Campos et al., 2014)

3.3.9.4. Ensayo de cemento asfáltico

El material que se va a utilizar es un cemento asfáltico AC-30, los cuales se realizarán ensayos básicos que se consideran en los lineamientos AASHTO M 226, como podemos observar en la tabla 2. Donde se observa que tanto como el agregado pétreo, el asfalto cumple con los requerimientos de calidad que se considera en las especificaciones AASHTO M 226 para elaborar mezclas de concreto asfáltico (Campos et al., 2014).

Tabla 3.64. Requisitos de cemento asfáltico CA-30 (El Salvador)

Ensayos	Grado de viscosidad					
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C (140°F), Pa-s (Poises)	25 ± 5 (250 ± 50)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)	400 ± 8 (4000 ± 800)
Viscosidad, 135°C (275°F), mm ² /s -- mínimo	125	175	250	300	350	400
Penetración 25°C(77°F), 100g, 5s --- mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto de inflación, COC, °C (F) --- mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad in tricloroetileno, en porcentaje --- mínimo	99	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película delgada en horno						
Pérdida por calentamiento, en porcentaje máximo (opcional) ²		1	0,5	0,5	0,5	0,5
Viscosidad, 60°C (140°F), Pa-s(Poises) --- máximo	100 (1000)	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)	1600 (16000)
Ductilidad 25°C (77°F), 5 cm/mm, cm--- mínimo	100	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique)² con:						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, en porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, en porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					

Fuente: (Salazar, 2011)

3.3.9.5. Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall)

Como sabemos este método de Marshall es el más utilizado en América latina para la elaboración de mezclas asfálticas calientes.

Al conocer los resultados de la granulometría tanto del agregado grueso como del fino se pudo desarrollar una mezcla de comparación de los materiales. Estos resultados deben cumplir con las especificaciones de la norma INVIAS (2013) de esta manera se podrá observar los valores óptimos que se necesita para la mezcla asfáltica, el cual también se lo conoce como porcentaje del asfalto teórico.

Se realiza el ensayo Marshall de la mezcla MDC-19 convencional de referencia. Las temperaturas con las que se realizaron las mezclas fueron de 150 C y 140 C con las que se fabricaron y compactaron, respectivamente. Se optó por dichas temperaturas, al ser escogidas

de acuerdo al ensayo de viscosidad que se desarrolló al AC-30, efectuando con el rango de la especificación para mezclas del tipo denso. El contenido de vacíos y la densidad de bulk se desarrollaron mediante las especificaciones de ensayo ASTM D2726 (Campos et al., 2014).

Tabla 3.65. Resultados de los ensayos determinados con cada porcentaje de asfalto (El Salvador)

	Porcentaje de Asfalto	Bulk [gr/cm ³]	Estabilidad [lb-fuerza]	Flujo [cm]	V.A	VAM	VAF
	5,19	2,314	3256	29,6	4,4	13,7	67,9
	5,22	2,31	3206	24,6	3,9	13,5	70,8
	5,23	2,308	3049	23,7	4,5	13,6	67,3
Promedio	5,2	2,31	3170,33	25,97	4,27	13,60	68,67
	5,3	2,304	3042	28,8	4,3	13,8	68,8
	5,33	2,308	3318	28,8	3,9	13,7	71,5
	5,36	2,305	3558	26,6	4,3	13,8	69,3
Promedio	5,3	2,3	3306,0	28,1	4,2	13,8	69,9
	5,36	2,3	3072	24,6	4,6	14	67
	5,48	2,303	3185	30,5	4,3	14	69,3
	5,49	2,294	3189	32	4,7	14,4	67,4
Promedio	5,44	2,30	3148,67	29,03	4,53	14,13	67,90
	5,52	2,3	3382	28,8	4	14,2	71,6
	5,57	2,302	2995	29,6	4,4	14,1	69,2
	5,77	2,31	3556	30,5	4,5	14	67,9
Promedio	5,62	2,30	3311,00	29,63	4,30	14,10	69,57

Fuente: (Campos et al., 2014)

Tabla 3.66. Requisitos para ensayo Marshall (El Salvador)

CRITERIOS DE DISEÑO	TRÁNSITO PESADO, CARPETA Y BASE	
	MIN	MAX
Compactación, número de golpes en cada cara	75	
Estabilidad (lb)	(1,800 A 4,500 Lb)	
Flujo* 2.0 a 4.0 mm	2	4
0.01 pulgadas	8	16
Porcentaje de Vacios	3	5
Porcentaje de vacios en el agregado mineral (VMA), (para agregado 3/4" al 4% de vacios)	Mín 13%	
Porcentajes de vacios llenos de Asfalto (VFA)	65	75

Fuente: (Asfaltos de Centroamérica S.A. de C.V., 2012)

Para hallar el porcentaje óptimo del asfalto se debe desarrollar gráficos de porcentaje de asfalto vs los parámetros obtenidos en la **Tabla 3.43**.

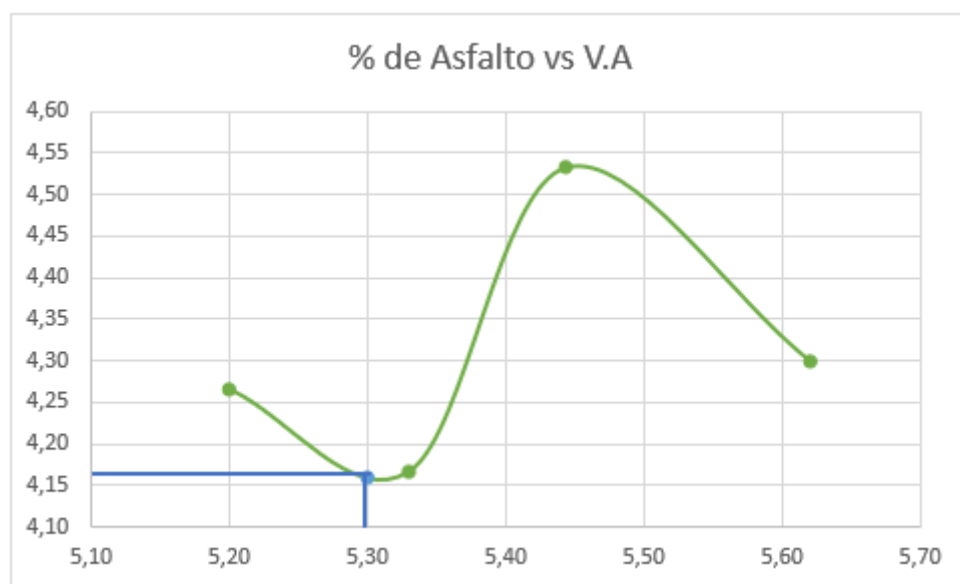


Gráfico 3.38. Porcentaje de asfalto vs V.A

Como podemos observar en la imagen 1 se ha escogido el 5,3% como porcentaje óptimo de asfalto ya que cumple con los requisitos del método de ensayo Marshall, otro punto que se puede tomar en cuenta es que las especificaciones consideran que el porcentaje de vacíos óptimo debe de oscilar entre 4,8 y 5,8 por lo que se ha seleccionado el valor 4,1.

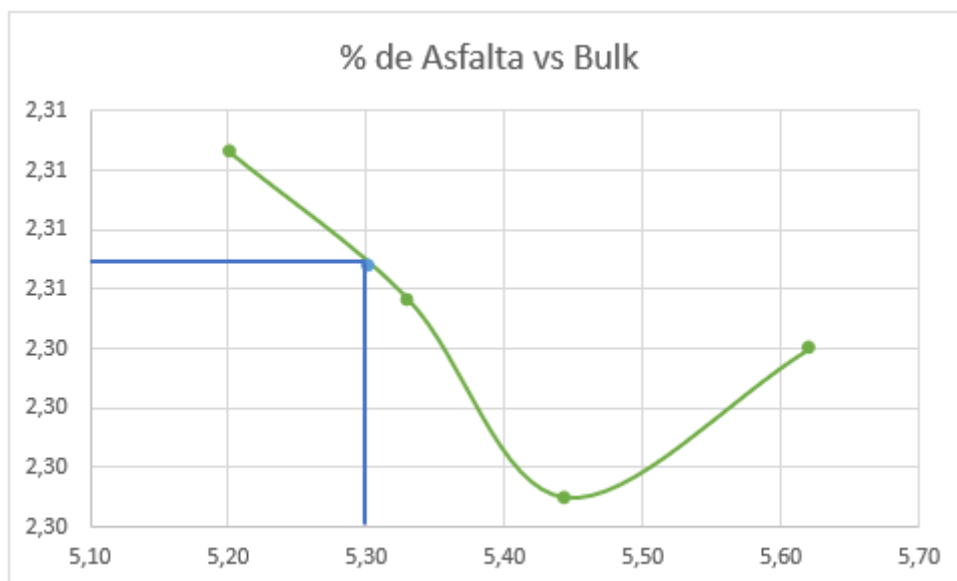


Gráfico 3.39. Porcentaje de Asfalto vs Densidad Bulk (El Salvador)

En la **Gráfica 3.39** podemos observar el comportamiento que sufre la densidad Bulk en la variación del porcentaje de asfalto en las distintas briquetas fabricadas, también se puede observar que la densidad aumenta mediante el porcentaje de asfalto se incrementa.

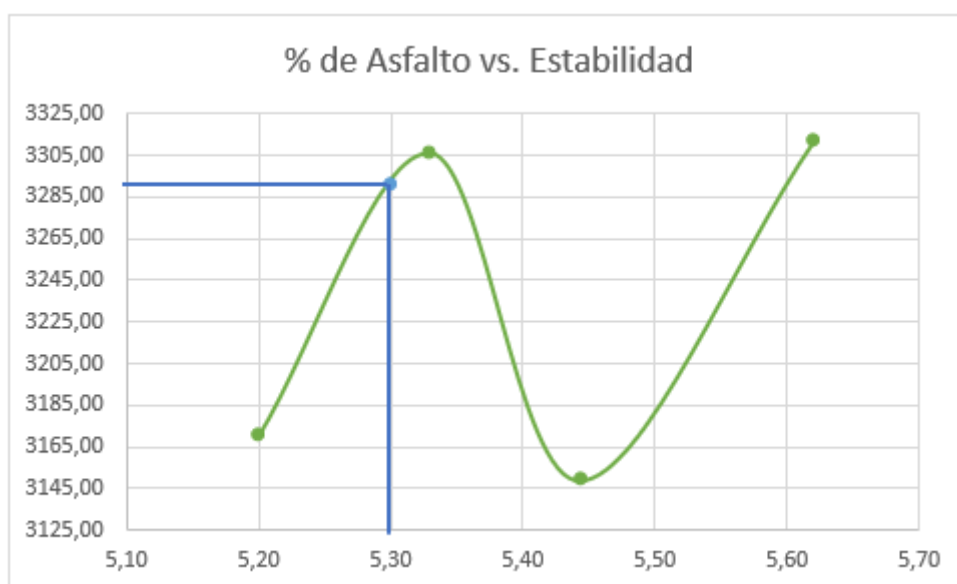


Gráfico 3.40. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (El Salvador)

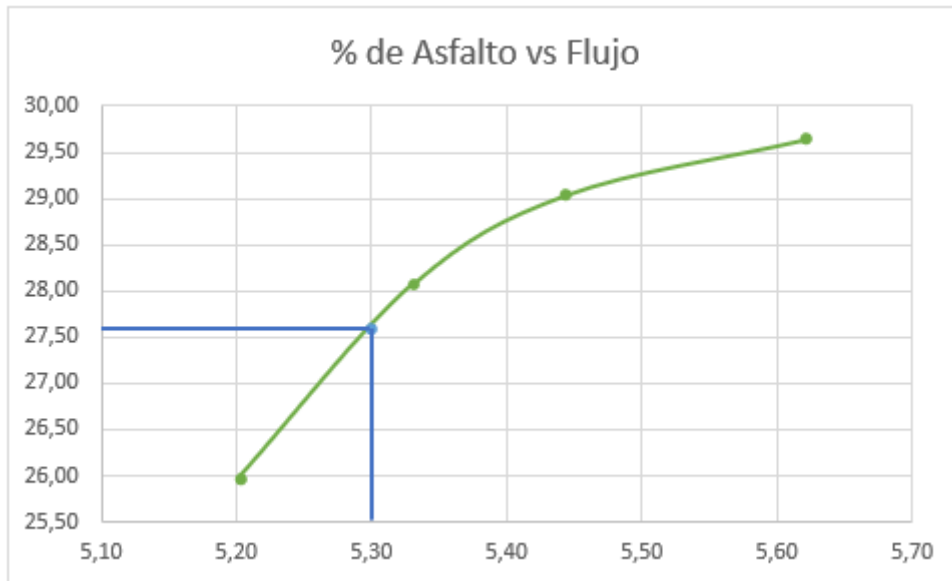


Gráfico 3.41. Porcentaje de asfalto vs Flujo (El Salvador)

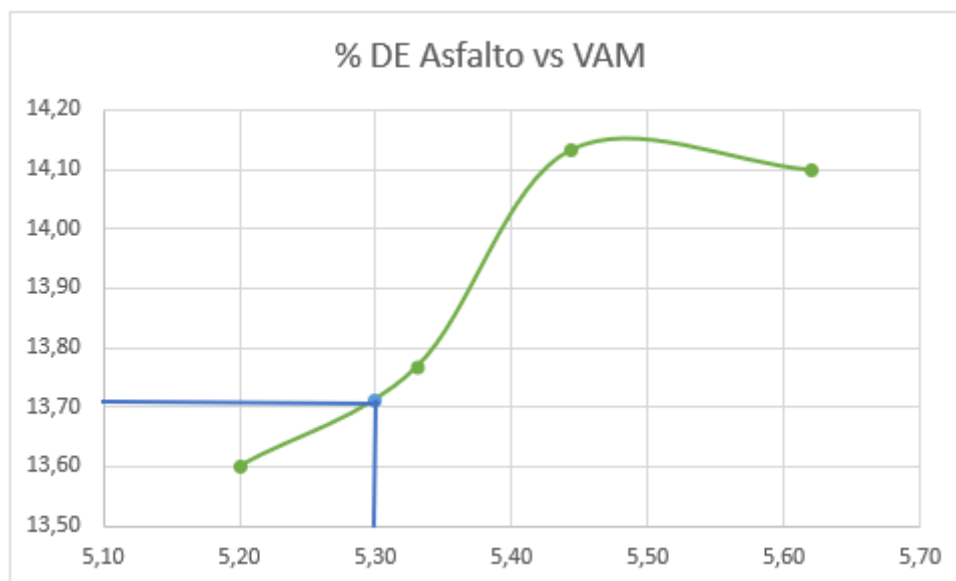


Gráfico 3.42. Porcentaje de asfalto vs VAM.

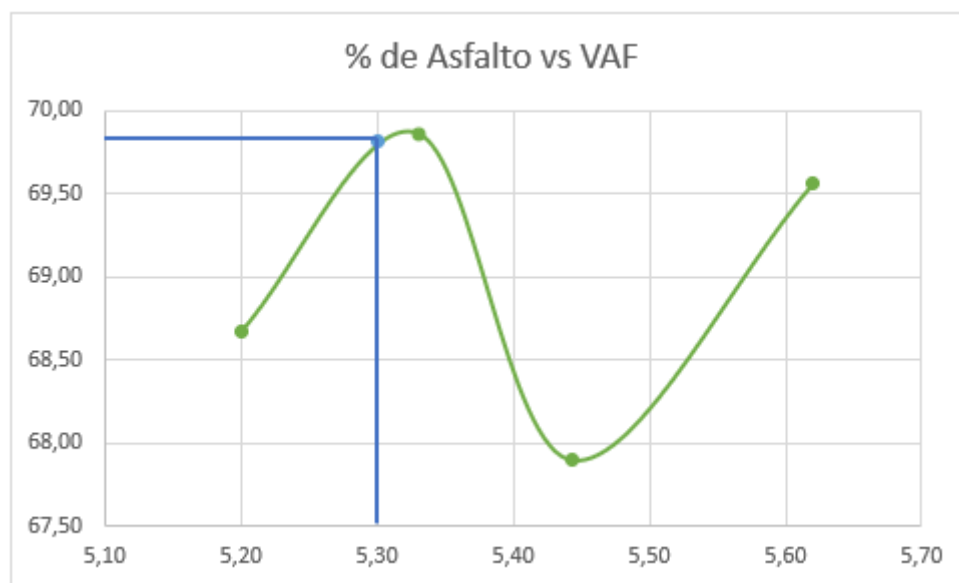


Gráfico 3.43. Porcentaje de asfalto vs VAF (El Salvador)

A continuación, se presentará una tabla de los resultados obtenidos de la mezcla.

Tabla 3.67. Resultados obtenidos del porcentaje óptimo del 5.3%.

Porcentaje de asfalto	Estabilidad	flujo	Densidad Bulk [gr/cm ³]	vacios en la mezcla [%]	vacios en agregados [%]	VAF
5,3	3290	27,58	2,31	4,16	13,71	69,81

Fuente: (Campos et al., 2014)

3.3.9.6. Resultados de elaboración de Mezcla asfáltica tibia (WMA)

En el desarrollo de la investigación se decidió optar por reducir la temperatura inicial en 80 °C comenzando con una temperatura de fabricación de 140°C, 130°C, 120°C, 100°C, 90°C y 80°C con el objetivo de llegar a determinar el impacto que genera la disminución de temperatura en las mezclas asfálticas, de la misma manera la aplicación del aditivo químico EVOTHERM toma como referencia aplicar el 1% del aditivo con respecto de la masa del asfalto.

Una vez ya determinado el porcentaje óptimo de las mezclas de 5.3% se procede a la elaboración de las briquetas elaboradas con las temperaturas ya mencionadas de la misma manera que los otros aditivos se dividen en dos grupos una analizando la mezcla con aditivo y el otro sin aditivo EVOTHERM.

Tabla 3.68. Resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas con varias temperaturas de elaboración y CA 5.3%. Sin Evotherm (El Salvador)

No.	V.	BRIQUETAS			DENSIDAD BULK	VACIOS CON AIRE [%]	LECTURA DEL ANILLO	ESTABILIDAD MARSHALL [LB]			FLUJO [mm]	FLUJO [pulg]	
		PESO AIRE	PESO AGUA	PESO S.S				VMA	MEDIDA	FACTOR			CORREGIDA
1	496	1145,2	650,8	1146,9	13,7	2,308	3,5	326	3121	1,04	3121,7	3,3	13
2	528	1216,7	688,9	1217	13,8	2,304	3,7	320	3064	0,96	3065,3	3,6	14
3	504	1159,1	658,3	1162,5	14	2,299	3,9	360	3440	1,04	3441	3,6	14
PROMEDIOS					13,8	2,304	3,7	335			3209	3,5	13,67
PARAMETROS		MINIMO			13		3	5			MIN 1800	2,0 A 4,0	8 A 16
VOLUMEN DE HUECOS LLENOS DE ASFALTO					65 A 75	73,50%			ESTABILIDAD kg.			1456	
RELACION ESTABILIDAD FLUJO 400 A 600 Kg/mm						419,5			ECUACION DEL ANILLO			9,3886 (x) + 60,024	
RELACION FILLER ASFALTO 1.30					0.60 A	1,31							
% DE ABSORCION DE AGUA EN LA MEZCLA						0,36							

Fuente: (Campos et al., 2014)

Tabla 3.69. Resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas con varias temperaturas de elaboración y CA 5.3%. Con Evotherm (El Salvador)

DETERMINACION DE TEMPERATURA DE COMPACTACION DE ASFALTO MODIFICADO CON EVOTHERM 3G								
Punto de asfalto analizado		5,30%		Observaciones: Las estabilidades observadas en las temperaturas de 110 °C a 130 °C son satisfactorias				
Que corresponde al óptimo de diseño				tempertura de mezclado 120 °C 130 °C				
Formula de trabajo 3/4" 23,0%; 1/2" 25,0%; ArenaT 52.0%								
Temperatura de compactación	Densidad Bulk	Prom. De densidad Bulk	Teoría Máxima	% de vacíos	Estabilidad [lbsf]	Estabilidad Promedio	Flujo [mm]	Promedios de Flujo
	2,227				1872		3,81	
80	2,229	2,228	2,405	7,9	1740,6	1806,3	3,56	3,685
	2,264				2651,3		3,05	
90	2,263	2,2635	2,405	6,3	2426	2538,65	3,30	3,175
	2,277				2435		3,05	
100	2,277	2,277	2,405	5,6	2801,5	2618,25	3,30	3,175
	2,307				2979,9		3,05	
110	2,307	2,307	2,405	4,2	3346	3162,95	3,30	3,175
	2,309				3590,1		3,30	
120	2,31	2,3095	2,405	4,1	3411,8	3500,95	3,05	3,175
	2,322				3252,1		3,30	
130	2,32	2,321	2,405	3,6	3721,6	3486,85	3,30	3,30
	2,301				3975,1		3,56	
140	2,301	2,301	2,405	4,5	3524,4	3749,75	3,81	3,685

Fuente: (Campos et al., 2014)

3.3.10. Recopilación de la Fase Experimental del Aditivo Evotherm en el Salvador (Ciudad Universitaria)

Esta investigación se lo realizo con un enfoque de producción de mezclas amigables con el medio económico y ambiental. También se realizaron ensayos de laboratorio donde se puede caracterizar el agregado pétreo y el cemento asfáltico, el cual nos brinda información con la cual se analiza si los materiales son los adecuados, por otro lado, se realizó el ensayo Marshall con el cual se pudo determinar el porcentaje optimo del cemento asfáltico para poder evidenciar cual mezcla tiene un mejor comportamiento mecánico. Siguiendo las normas establecidas en la norma AASHTO para la elaboración de mezclas calientes.

3.3.10.1. Caracterización de los agregados

En la Tabla se puede evidenciar un resumen de los valores obtenidos en los ensayos del agregado pétreo.

Tabla 3.70. Resultados de caracterización de agregados (Ciudad Universitaria - El Salvador)

Ensayo	Norma	Resultado
Equivalente de Arena	AASHTO T-176	68%
Ensayo de Sanidad	AASHTO T-104	6.82 % Desgaste total.
Ensayo de partículas planas, partículas alargadas y partículas planas y alargadas en agregado grueso.	ASTM D-4791	Índice de alargamiento: 7,6% Índice de aplanamiento: 17,4% Porcentaje Caras Fracturadas: 96.0%
Gravedad específica y absorción de agregado fino.	AASHTO T84-91	Gravedad específica promedio: 2,474 Promedio de absorción: 3,4%
Gravedad específica y absorción de agregado fino.	AASHTO T85-91	Gravedad específica promedio: 2,556 Promedio de absorción: 1,94%
Porcentaje de desgaste para agregado grueso.	AASHTO T96-02	Desgaste: 22.9%

3.3.10.2. Ensayo de cemento asfáltico

El material que se va a utilizar es un cemento asfáltico CSS-1h, los cuales se realizarán ensayos básicos que se consideran en los lineamientos, como podemos observar en la tabla 2. Donde se observa que tanto como el agregado pétreo, el asfalto cumple con los

requerimientos de calidad que se considera en las especificaciones para elaborar mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 3.71. Especificaciones del cemento asfáltico (Ciudad Universitaria - El Salvador)

CARACTERISTICAS	NORMA S.C.T. 601.03.011	EMULSIÓN RAPIDA		EMULSIÓN MEDIA		EMULSIÓN LENTA	
		RR-C1	RR-C2	RM-CQ	RM-C2	RL-C1	RL-C2
Viscosidad Saybolt Furol A 25°C en seg. A 50°C en seg	011-G.11	>20	>80 >20	>20	>20	>20	>20
Viscosidad Brookfield A 25°C en CP A 50°C en CP	ASTM D-4402	>40	>160 >40	>40	>40	>40	>40
Determinación del Residuo asfáltico: Destilación %	011-G.09	60	63	60	63	63	60
Mínimo Evaporación % Min.	011-G.10	60	63	60	63	63	60
Sedimentación en Almacén en 24 hrs. % Máximo a 25°C NOTA 1	ASTM D-244	2.0	1.0	3.0	3.0	3.0	2.0
Retenido en malla 0,85 mm. % máximo	011-G.13	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Carga eléctrica de la Partícula	011-G.03	POSITIVA					
Tiempo que tarda en Descargar la partícula en Minutos a 50°C	AMFE	<2	<2	>12	>12	>25	NOTA 2
Carga activa de la Partícula NOTA 3	AMFE	Obscura	Obscura	Café	Café	beish	Sin color
Miscibilidad en agua	ASTM D-244	Negativa	Negativa	POSITIVA			
Determinación del Potencial de hidrógeno (Ph) máximo	011-F.04	<4	<4	<4	<4	<4	<4

Fuente: Norma S.C.T. (secretaria de Comunicación y Transporte)

3.3.10.3. Diseño de mezcla asfáltica (Método Marshall)

El método Marshall se realizó en el ensayo ya que es el más utilizado en América Latina para la elaboración de mezclas asfálticas calientes.

Para este ensayo se elaboró treinta muestras las cuales se dividieron en 5 probetas en las que se utilizó para cada porcentaje de asfalto que va entre 6.5%, 6.0%, 5.5%, 5.0% y 4.5%, siguiendo las especificaciones de la norma AASHTO que debe cumplir un mínimo de tres muestras para cada porcentaje de cemento asfáltico.

Tabla 3.72. Resultados de briquetas con respecto al porcentaje de asfalto (Ciudad Universitaria - E l Salvador)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]	VFA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in				
4,5	2444,80	5389,81	2,921	11,5	2,196	8,17	18,09	54,83
	2240,63	4939,7	2,794	11	2,191			
	1845,63	4068,87	2,667	10,5	2,171			
		4799,46		11	2,186			
5,0	1813,62	3998,3	2,667	10,5	2,176	6,61	17,84	62,95
	1753,74	3866,29	3,048	12	2,186			
	1896,97	4182,07	3,302	13	2,177			
		4015,55		11,83	2,18			
5,5	1813,62	3998,3	2,794	11	2,201	5,28	17,82	70,36
	1980,24	4365,64	3,175	12,5	2,198			
	2210,95	4874,25	3,81	15	2,228			
		4412,73		12,83	2,209			
6,00	1765,96	3893,24	3,175	12,5	2,199	4,41	18,22	75,79
	1813,62	3998,3	3,81	15	2,195			
	2113,27	4658,92	3,81	15	2,23			
		4183,49		14,17	2,208			
6,5	1479,25	3261,16	3,937	15,5	2,241	1,67	17,05	90,18
	1980,17	4365,49	3,302	13	2,241			
	1840,91	4058,46	3,81	15	2,244			
		3895,04		14,5	2,24			

Fuente: (Castaneda et al., 2011)

Tabla 3.73. Requisitos del ensayo Marshal (Ciudad Universitaria - El Salvador)

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL METODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0,25mm (0,01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
%VMA	-					
%VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: (Castaneda et al., 2011)

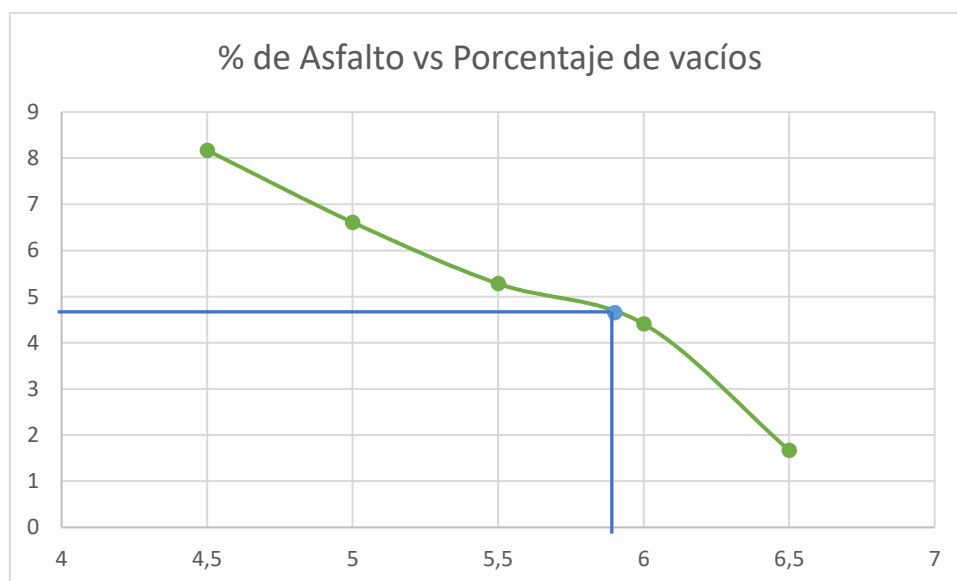


Gráfico 3.44. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Ciudad universitaria - El Salvador)

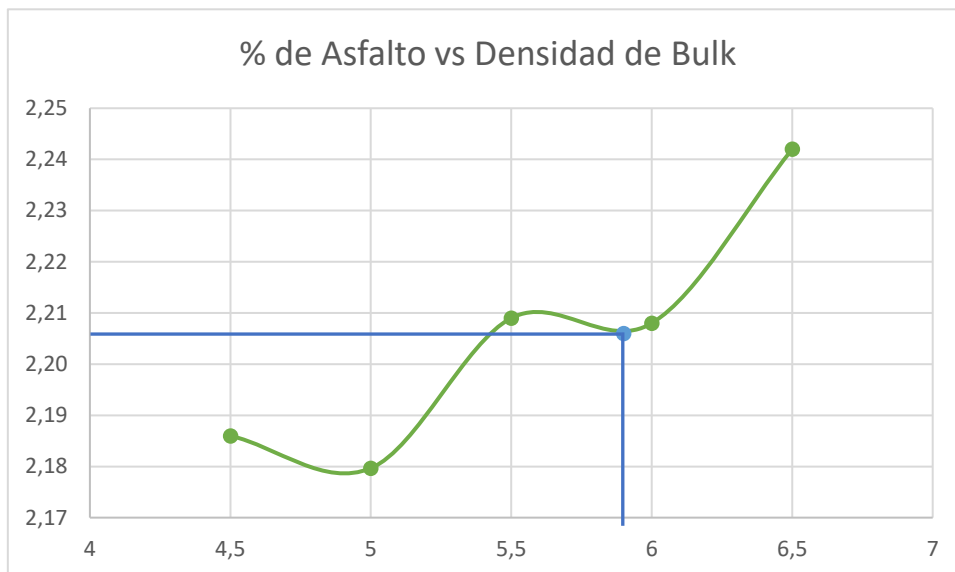


Gráfico 3.45. Porcentaje de asfalto vs Densidad Bulk (Ciudad universitaria - El Salvador)

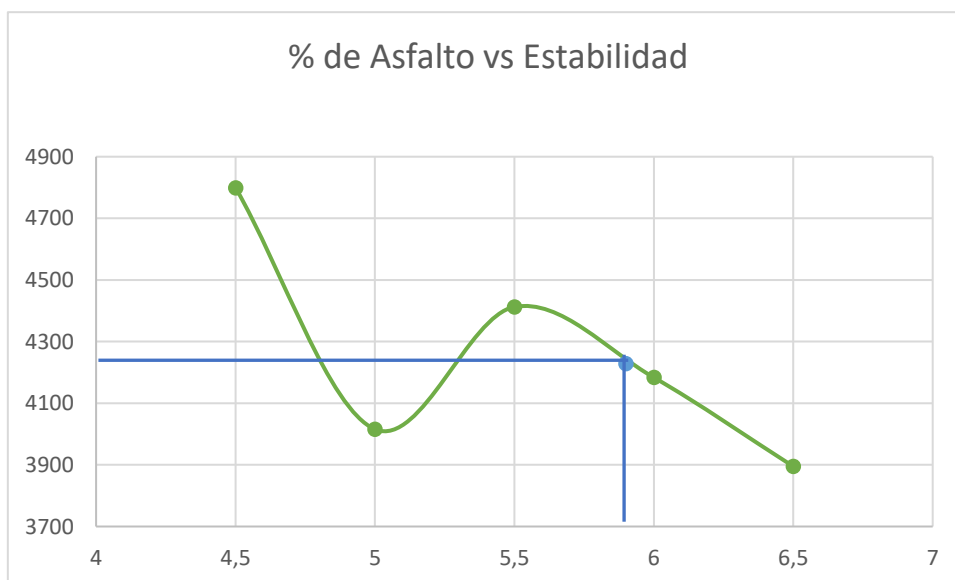


Gráfico 3.46. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (Ciudad universitaria - El Salvador)

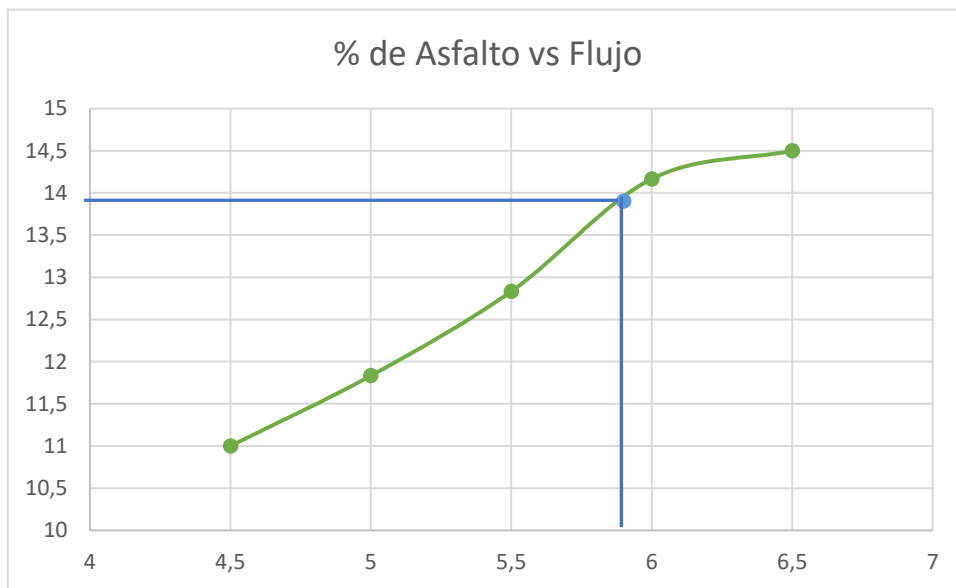


Gráfico 3.47. Porcentaje de asfalto vs Flujo (Ciudad universitaria - El Salvador)

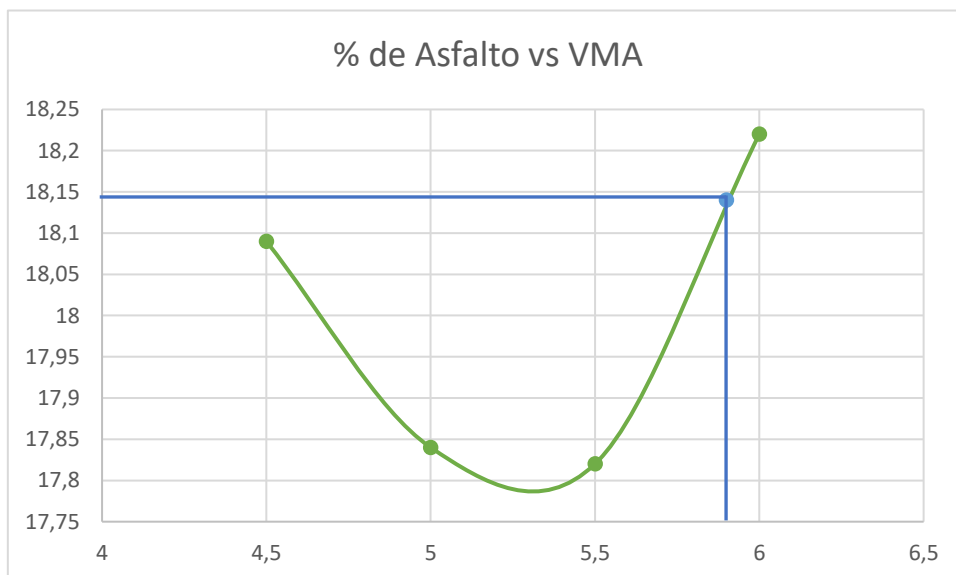


Gráfico 3.48. Porcentaje de asfalto vs VMA (Ciudad universitaria - El Salvador)

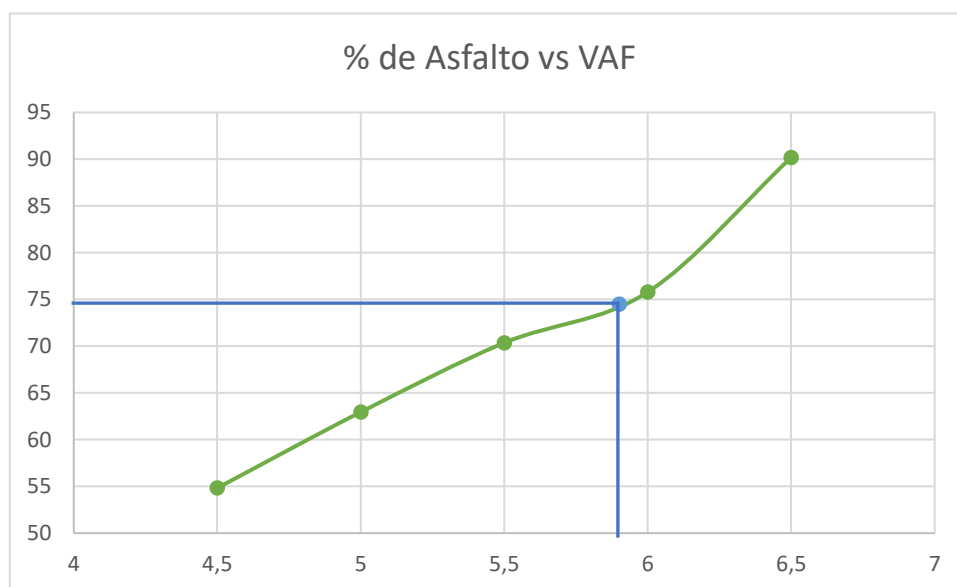


Gráfico 3.49. Gráfico 3.48. Porcentaje de asfalto vs VAF (Ciudad universitaria - El Salvador)

Tabla 3.74. Resultados de mezclas asfálticas en su porcentaje óptimo (Ciudad Universitaria - El Salvador)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]	VFA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in				
5,9		4229		13,902	2,206	4,65	18,14	74,5

Tabla 3.75. Resultados del Ensayo Marshal (Ciudad Universitaria - El Salvador)

CA [%]	Estabilidad		Flujo		Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]	VFA [%]
	[kg]	Lbf	[mm]	in				
4,5	2177,02	4799,46	2,79	11	2,19	8,17	18,09	54,83
5	1821,44	4015,55	3,01	11,83	2,18	6,61	17,84	62,95
5,5	2001,60	4412,73	3,26	12,83	2,21	5,28	17,82	70,36
6	1897,62	4183,49	3,60	14,17	2,21	4,41	18,22	75,79
6,5	1766,78	3895,04	3,68	14,5	2,24	1,67	17,05	90,18

3.4. Análisis de resultados de la Investigación

3.4.1. Aditivo Zycotherm

3.4.1.1. Estabilidad Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico

Zycotherm

En la siguiente tabla se puede observar la variación que existe de la estabilidad entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) y las mezclas asfálticas tibias (MAT) mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm a un 0.07% en Ecuador y un 0.15% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.76. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (lb-fuerza)						
MEZCLADO	MAC (Ecuador)	MAC (Perú)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)
150	2710	1194	0%	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	1228	2,85%
130	-	-	-	-	-	1113	-6,78%
120	-	-	-	-	-	1094	-8,38%
110	-	-	-	2375	-12,36%	-	-

En la **Grafico 3.50.** se puede observar la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Zycotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

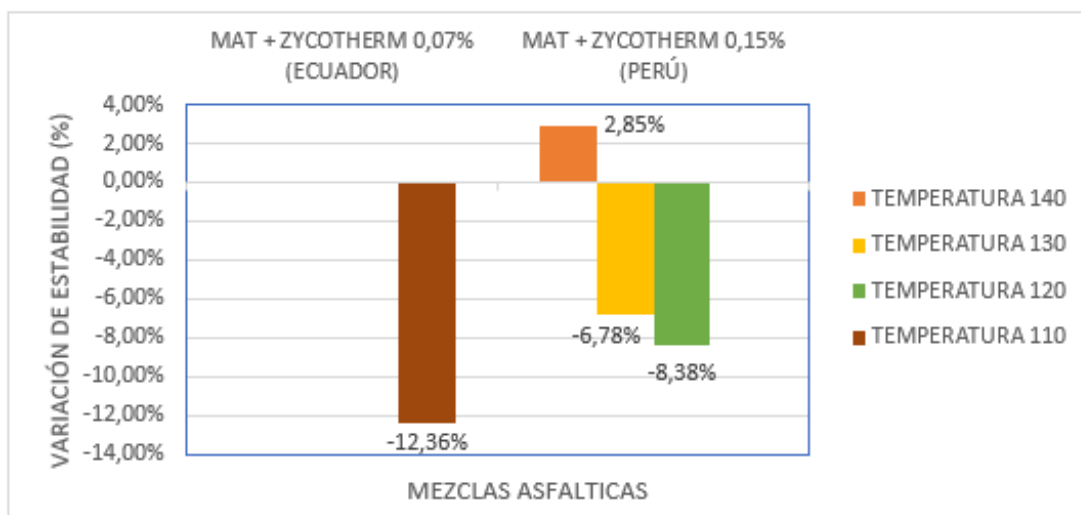


Gráfico 3.50. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en el **Gráfico 3.50**, se llegó a determinar que a una temperatura de 140°C presenta una estabilidad con un ligero incremento del 2.85% debido a la aplicación del aditivo químico Zycotherm, pero también se observa que mientras disminuye la temperatura de mezclado la estabilidad tiende a ser menor, otro factor que influye en la disminución de la estabilidad es el porcentaje de aditivo con el que se elaboró la mezcla, como es el caso de Zycotherm al 0.07% presentando una variación de -12.36%, a diferencia de Zycotherm al 0.15% presentando una variación máxima de -8.38%.

3.4.1.2. Flujo en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Zycotherm

En la siguiente Tabla se observa la variación del Flujo de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Zycotherm a 0.07% en Ecuador y 0.15% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.77. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.

TEMPERATURA	FLUJO MARSHALL (pgl/100)						
	MAC (Ecuador)	MAC (Perú)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)
150	14	12,3	0%	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	12,44	1,14%
130	-	-	-	-	-	13,72	11,54%
120	-	-	-	-	-	15,76	28,13%
110	-	-	-	14,03	0,21%	-	-

En el **Gráfico 3.51** se puede observar la variación de flujo que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Zycotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

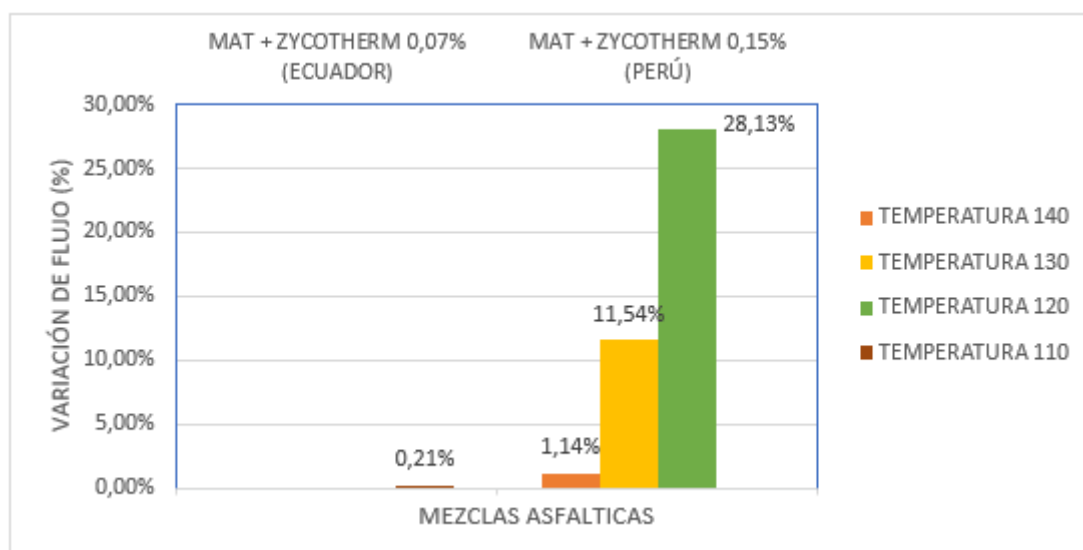


Gráfico 3.51. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 0.07% el flujo sufre una ligera variación de 0.21% a una temperatura

de 110°C, mientras que al aumentar el porcentaje a 0.15% de aditivo Zycotherm el flujo a sufrido un incremento de 28.13% a una temperatura de 120°C, con respecto a la mezcla asfáltica caliente, el incremento de porcentaje de aditivo no podría ser favorable al momento de trabajar con temperaturas bajas como 120 °C, ya que no cumple con los requerimientos establecidos en las normas de cada país como es el caso el flujo debe de mantenerse en un rango de 8-14.

3.4.1.3. Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico

Zycotherm

En la siguiente Tabla se observa la variación del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Zycotherm a 0.07% en Ecuador y 0.15% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.78. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Zycotherm.

TEMPERATURA	VACÍOS MARSHALL (%)							
	MEZCLADO	MAC (Ecuador)	MAC (Perú)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)	MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)
150		5	4,1	0%	-	-	-	-
140		-	-	-	-	-	4,3	4,88%
130		-	-	-	-	-	4,7	14,63%
120		-	-	-	-	-	5,5	34,15%
110		-	-	-	3,70	-26,00%	-	-

En el **Grafico 3.52** puede observar la variación de vacíos que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Zycotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

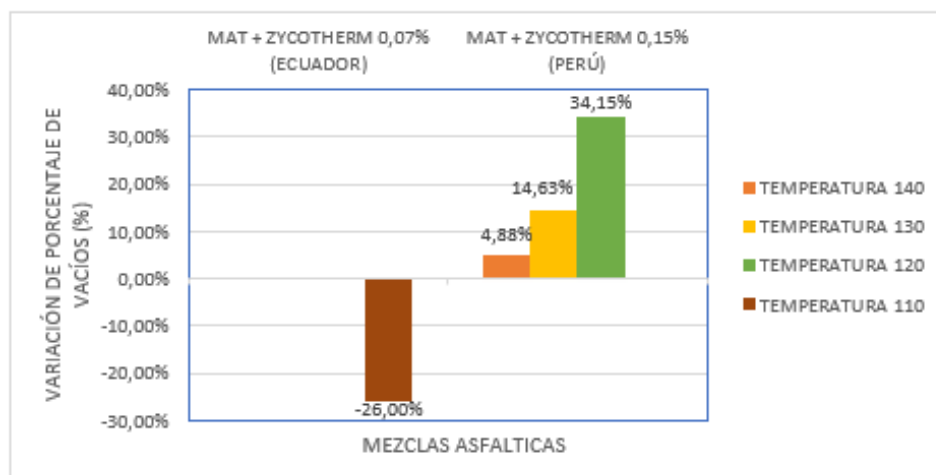


Gráfico 3.52. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en la gráfica, se puede determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 0.07% los vacíos se reducen en -26.00% con una temperatura de mezclado de 110°C, mientras que al aumentar el porcentaje de aditivo químico Zycotherm a 0.15%, los vacíos sufren un incremento de 34.15% con una temperatura de mezclado de 120°C, con respecto a la mezcla asfáltica caliente, el incremento de porcentaje de aditivo no podría ser favorable al momento de trabajar con temperaturas bajas como 120 °C, ya que no cumple con los requerimientos establecidos en las normas de cada país como es el caso el porcentaje de vacíos debe de mantenerse en un rango de 3-5%.

3.4.2. Aditivo Husil

3.4.2.1. Estabilidad Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Husil

De la misma forma se determinó la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) vs las mezclas asfálticas tibias (MAT) aplicando el aditivo químico HUSIL al 1 % a diferentes temperaturas de mezclado aplicados en distintos sectores de Colombia.

Tabla 3.79. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (lb-fuerza)									
	MAC (COLOMBIA I)	MAC (COLOMBIA II)	MAC (COLOMBIA III)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)
150	2790	2296.13	2771	0%	2855	2.33%	-	-	-	-
140	-	-	-	-	3064	9.82%	3263	42.11%	-	-
130	-	-	-	-	2907	4.19%	2540	10.63%	3030	9.37%
120	-	-	-	-	2783	-0.25%	2522	9.84%	2856	3.07%
110	-	-	-	-	-	-	2359	2.74%	2806	1.27%

En la **Grafica 3.53** se determinó la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Husil a diferentes temperaturas de mezclado, utilizados en diferentes sectores de Colombia.

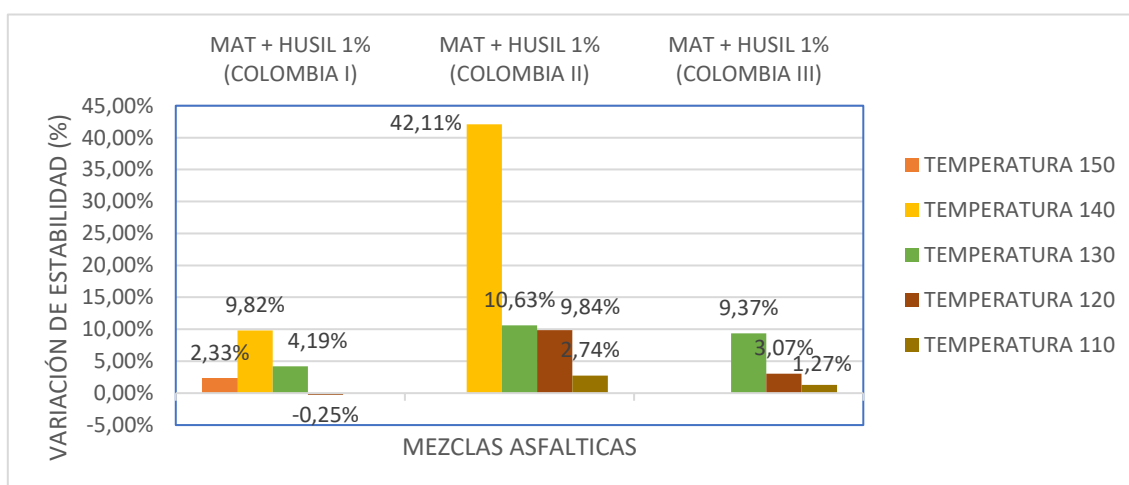


Gráfico 3.53. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil al 1% a diferentes temperaturas de mezclado en distintos sectores de Colombia.

Como se muestra en la figura 2 se ha llegado a determinar que a las distintas temperaturas de compactación, la estabilidad tiende a ser mayor en las mezclas asfálticas tibias debido a la aplicación del aditivo Husil incluso a temperaturas inferiores de hasta 110°C con una mejora del 1.27 % con respecto a las mezclas asfálticas en caliente (MAC),

debido al alto porcentaje de aditivo que se utiliza en la mezcla asfáltica favorece significativamente a la estabilidad de las mezclas asfálticas tibias (MAT).

3.4.2.2. Flujo Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Husil

En la siguiente Tabla se determinó la variación del flujo que existe entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) vs las mezclas asfálticas tibias (MAT) aplicando el aditivo químico HUSIL al 1 % a diferentes temperaturas de mezclado aplicados en distintos sectores de Colombia.

Tabla 3.80. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.

TEMPERATURA	FLUJO MARSHALL (plg/100)									
	MAC (COLOMBIA I)	MAC (COLOMBIA II)	MAC (COLOMBIA III)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)
150	15	14	14	0%	15	-0.21%	-	-	-	-
140	-	-	-	-	14	-1.58%	13	-1.83%	-	-
130	-	-	-	-	15	-0.21%	12	-14.43%	14	0.00%
120	-	-	-	-	15	1.37%	12	-11.50%	15	4.92%
110	-	-	-	-	-	-	12	-11.50%	15	2.73%

En el siguiente **Grafico 3.54** se puede observar la variación de flujo que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Husil a diferentes temperaturas de mezclado.

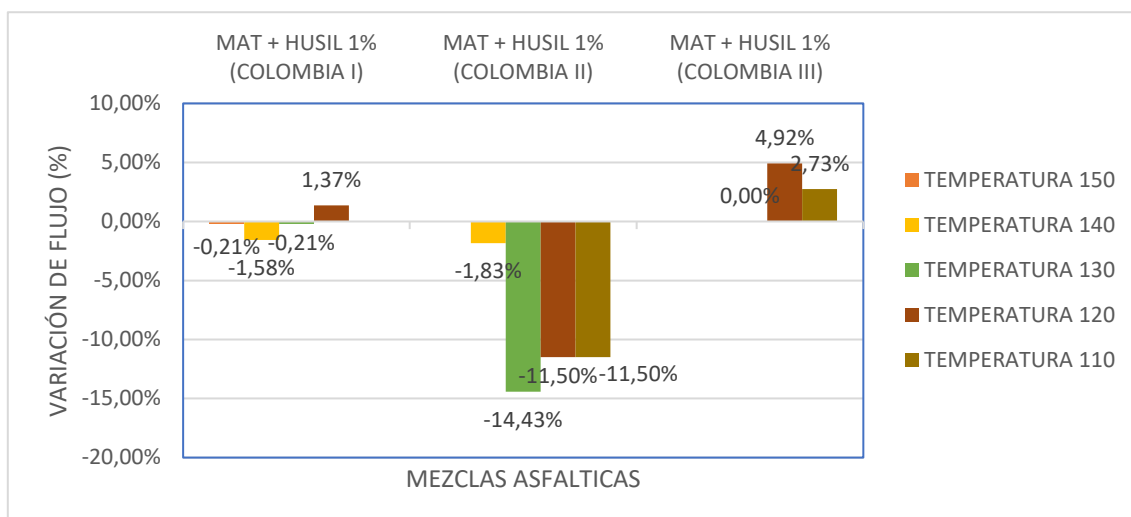


Gráfico 3.54. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 1% de Husil el flujo sufre una ligera variación para en caso de Colombia I y Colombia III presentan un incremento máximo del 4.92% y una disminución máxima del -1.58% lo cual es beneficioso ya que con estos valores el flujo se mantendría estable con respecto de las mezclas asfálticas en caliente, pero a diferencia de Colombia II llega a presentar una disminución del -14.43% para una temperatura de 130°C lo cual nos ayuda a estabilizar el flujo ya que en las mezclas asfálticas calientes presenta un valor de 14 el cual se encuentra en el límite de lo establecido.

3.4.2.3. Vacíos en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Husil

En la siguiente Tabla se observa la variación del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Husil al 1% en distintos sectores de Colombia con diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.81. Cuadro de variación de porcentaje vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Husil.

TEMPERATURA	VACÍOS MARSHALL (%)									
	MAC (COLOMBIA I)	MAC (COLOMBIA II)	MAC (COLOMBIA III)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)	MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)	VARIACION DE MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)
150	4	6	3	0%	4	-4.56%	-	-	-	-
140	-	-	-	-	5	9.59%	4	-41.00%	-	-
130	-	-	-	-	5	30.70%	5	-15.33%	3	-7.50%
120	-	-	-	-	7	56.59%	5	-14.83%	3	-0.94%
110	-	-	-	-	-	-	6	-7.67%	3	4.38%

En la Grafica 3.55 puede observar la variación de vacíos que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Husil a diferentes temperaturas de mezclado.

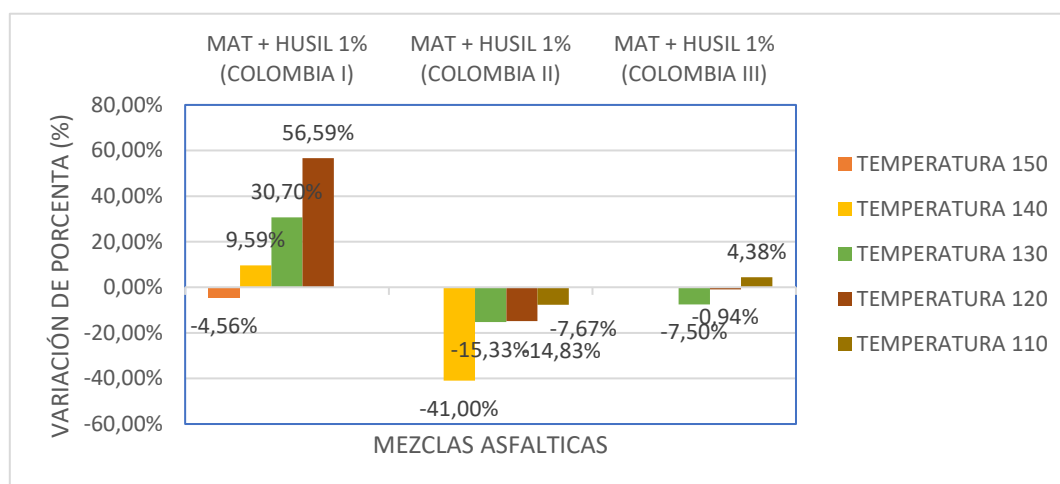


Gráfico 3.55. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Husil de 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 1% de Husil el porcentaje de varios sufre una significativa variación para en caso de Colombia I y Colombia III presentan un incremento máximo del 56.59% y una disminución máxima del -41% lo cual únicamente es favorable la disminución para el caso de Colombia II ya que en las mezclas asfálticas en caliente presenta un valor de 6 el cual se encuentra en el límite establecido en los requerimientos de la norma de dicho país, en cambio para el caso de Colombia I se observa de igual manera que no es favorable ya que

presenta un valor de 4% llegando a incrementar a 6% siendo el límite de lo permitido en dicho país, para el caso de Colombia III presenta valores estables ya que no se manifiestan incrementos y disminuciones significativas a pesar de la disminución de temperatura.

3.4.3. Aditivo Quimibond

3.4.3.1. Estabilidad Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico

Quimibond

En la siguiente tabla se puede observar la variación que existe de la estabilidad entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) y las mezclas asfálticas tibias (MAT) mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond a un 0.7% en Perú II y un 0.8% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.82. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (lb-fuerza)					
MEZCLADO	MAC (Peru)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)
150	1194	0%	-	-	-	-
140	-	-	1303	9,13%	1123	-5,95%
130	-	-	-	-	1255	5,11%

En el **Grafico 3.56** se puede observar la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Quimibond a diferentes temperaturas de mezclado.

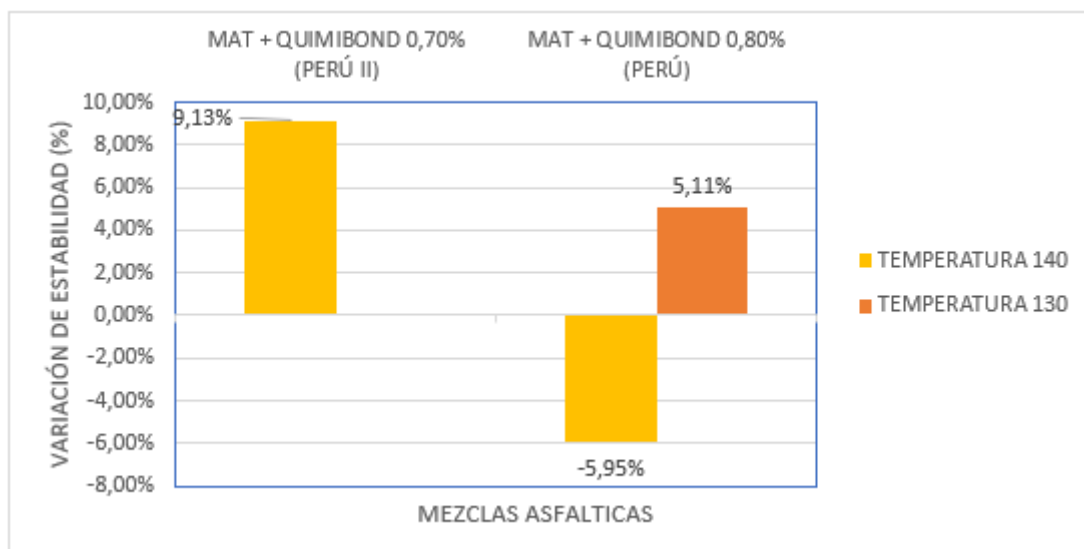


Gráfico 3.56. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Quimibond de 0.7% y 0.8%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en el gráfico, se ha llegado a determinar que, a una temperatura de 140°C, utilizando 0.8% de aditivo químico Quimibond, presenta una estabilidad que sufre una ligera variación negativa del -5.95%, mientras que, a una temperatura de 130°C, incrementa la estabilidad 5.11%, pero también se observa que a un porcentaje de aditivo Quimibond de 0.7% aumenta la estabilidad a un 9.13% de la estabilidad de una mezcla asfáltica convencional.

3.4.3.2. Flujo en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Quimibond

En la siguiente Tabla se observa la variación del Flujo de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Quimibond a un 0.7% en Perú II y un 0.8% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.83. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.

TEMPERATURA	FLUJO MARSHALL (plg/100)					
MEZCLADO	MAC (Peru)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)
150	12,3	0%	-	-	-	-
140	-	-	12,32	0,16%	14,72	19,67%
130	-	-	-	-	15,24	23,90%

En la **Grafica 3.57** se puede observar la variación de flujo que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Quimibond a diferentes temperaturas de mezclado.

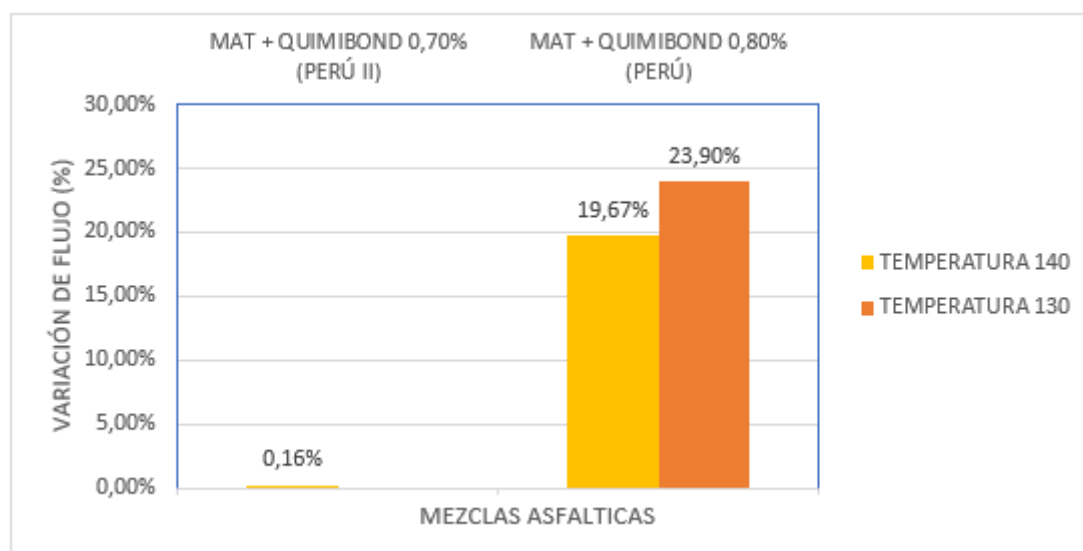


Gráfico 3.57. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Quimibond de 0.70% y 0.80%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 0.70% el flujo sufre una ligera variación de 0.16% a una temperatura de 140°C, mientras que al aumentar el porcentaje a 0.80% de aditivo Quimibond el flujo ha sufrido un incremento de 23.90% a una temperatura de 130°C, con respecto a la mezcla asfáltica caliente, el incremento de porcentaje de aditivo no podría ser favorable al momento

de trabajar con temperaturas bajas como 130 °C, ya que no podría cumplir con los requerimientos establecidos en las normas de cada país como es el caso el flujo debe de mantenerse en un rango de 8-14.

3.4.3.3. Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Quimibond

En la siguiente Tabla se observa la variación del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Quimibond a un 0.7% en Perú II y un 0.8% en Perú, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.84. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Quimibond.

TEMPERATURA	VACÍOS MARSHALL (%)					
MEZCLADO	MAC (Peru)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)	MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)	VARIACION DE MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)
150	4,1	0%	-	-	-	-
140	-	-	3,3	-19,51%	5	21,95%
130	-	-	-	-	4,6	12,20%

En el **Grafico 3.58** puede observar la variación de vacíos que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Quimibond a diferentes temperaturas de mezclado.

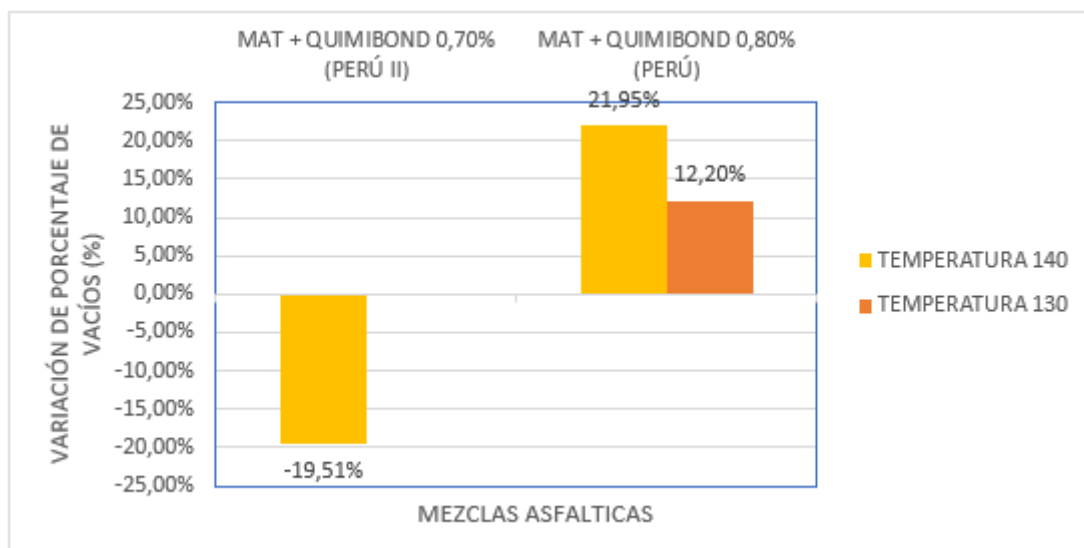


Gráfico 3.58. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Zycotherm de 0.07% y 0.15%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en la gráfica, se puede determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 0.70% los vacíos se reducen en -19.51% con una temperatura de mezclado de 140°C, mientras que al aumentar el porcentaje de aditivo químico Quimibond a 0.80 %, los vacíos sufren un incremento de 21.95% con una temperatura de mezclado de 140°C, con respecto a la mezcla asfáltica caliente, el incremento de porcentaje de aditivo no podría ser favorable al momento de trabajar con temperaturas altas, ya que no podría cumplir con los requerimientos establecidos en las normas de cada país como es el caso el porcentaje de vacíos debe de mantenerse en un rango de 3-5%.

3.4.4. Aditivo Rediset

3.4.4.1. Estabilidad Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Rediset

De la misma forma se determinó la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) vs las mezclas asfálticas tibias (MAT) aplicando el

aditivo químico REDISET al 2 % a diferentes temperaturas de mezclado aplicados en Ecuador y Colombia.

Tabla 3.85. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (lb-fuerza)						
	MAC (ECUADOR)	MAC (COLOMBIA)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + REDISET 2% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + REDISET 2% (ECUADOR)	MAT + REDISET 2% (COLOMBIA)	VARIACION DE MAT + REDISET 2% (COLOMBIA)
150	2470	3616	0%	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	4057	12.20%
100	-	-	-	3488	41.22%	-	-
80	-	-	-	2907	17.69%	-	-

En el **Gráfico 3.59** se determinó la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Rediset a diferentes temperaturas de mezclado, utilizados en Ecuador y Colombia.

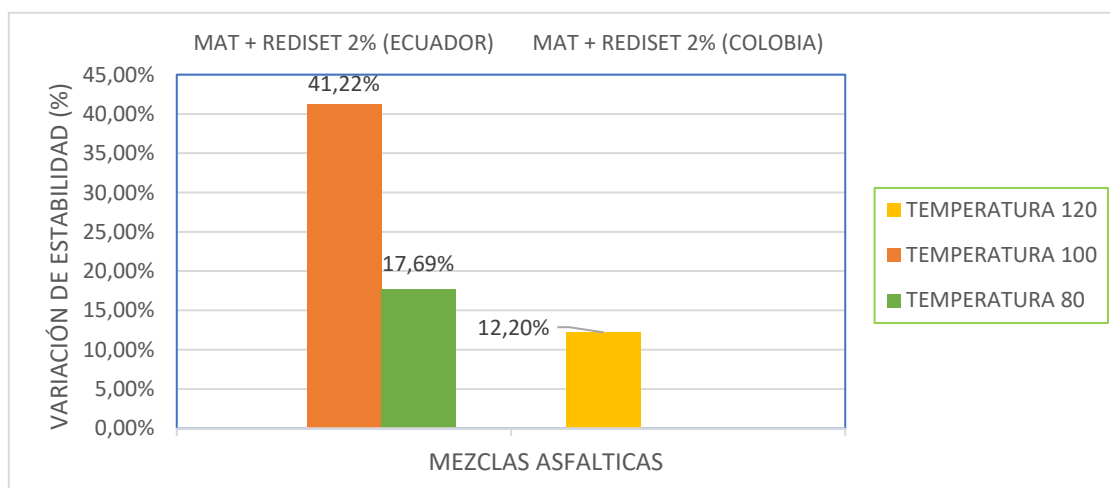


Gráfico 3.59. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Rediset al 2% a diferentes temperaturas de aplicados en Ecuador y Colombia.

Como se muestra en la figura 2 se ha llegado a determinar que a las distintas temperaturas de compactación, la estabilidad tiende a ser mayor en las mezclas asfálticas

tibias debido a la aplicación del aditivo REDISET incluso a temperaturas inferiores de hasta 80°C con una mejora del 12.20 % con respecto a las mezclas asfálticas en caliente (MAC), debido a la implementación de un alto porcentaje de aditivo que se utiliza en la mezcla asfáltica favorece significativamente a la estabilidad de las mezclas asfálticas tibias (MAT).

3.4.4.2. Flujo Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Rediset

En la siguiente Tabla se determinó la variación del flujo que existe entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) vs las mezclas asfálticas tibias (MAT) aplicando el aditivo químico REDISET al 2 % a diferentes temperaturas de mezclado aplicados en Ecuador y Colombia.

Tabla 3.86. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset

TEMPERATURA	FLUJO MARSHALL (plg/100)						
MEZCLADO	MAC (ECUADOR)	MAC (COLOMBIA)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + REDISET 2% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + REDISET 2% (ECUADOR)	MAT + REDISET 2% (COLOBIA)	VARIACION DE MAT + REDISET 2% (COLOMBIA)
150	11.8	14	0%	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	13	-9.79%
100	-	-	-	13	10.17%	-	-
80	-	-	-	15	27.12%	-	-

En el siguiente **Grafico 3.60** puede observar la variación de flujo que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico REDISET a diferentes temperaturas de mezclado.

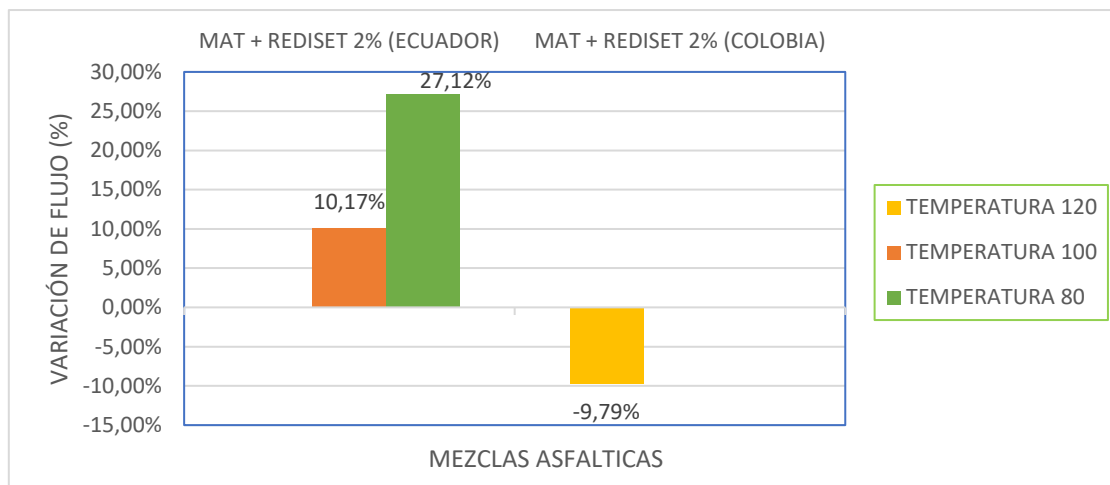


Gráfico 3.60. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando REDISET al 2%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 2% de REDISET el flujo en Ecuador presenta un incremento máximo del 27.12% debido a las bajas temperaturas que se elaboró la mezcla de 100 y 80°C el cual no es factible la aplicación de dicho aditivo cuando se trabaja con temperaturas bajas de 100°C ya que incumple el flujo con las normas establecidas de Ecuador, a diferencia de Colombia que presenta una disminución de 9.8% trabajando con una temperatura de 120°C cumpliendo con los requerimientos de dicho país.

3.4.4.3. Vacíos en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Rediset

En la siguiente Tabla se observa la variación del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Rediset al 2% aplicados en Colombia y Ecuador con diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.87. Cuadro de variación de porcentaje vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Rediset.

TEMPERATURA	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)							
	MEZCLADO	MAC (ECUADOR)	MAC (COLOMBIA)	VARIACIÓN DE MAC	MAT + REDISSET 2% (ECUADOR)	VARIACION DE MAT + REDISSET 2% (ECUADOR)	MAT + REDISSET 2% (COLOMBIA)	VARIACION DE MAT + REDISSET 2% (COLOMBIA)
150		4	4	0%	-	-	-	-
120		-	-	-	-	-	6	40.00%
100		-	-	-	5	21.00%	-	-
80		-	-	-	7.62	90.50%	-	-

En el siguiente **Grafico 3.61** puede observar la variación de vacíos que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico REDISSET a diferentes temperaturas de mezclado.

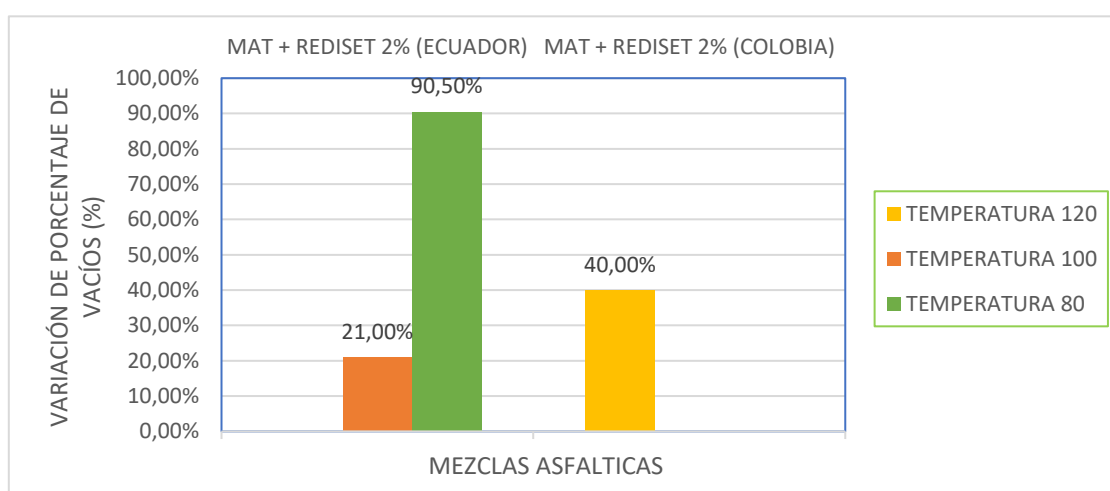


Gráfico 3.61. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Rediset de 2%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo de 2% de REDISSET el porcentaje de vacíos sufre una significativa variación para ambos casos ya que el porcentaje de vacíos tiende a aumentar, llegando a un incremento del 90.50% para el caso de Ecuador y de 40% en Colombia, esto se genera debido a la aplicación de un alto porcentaje de aditivo en la mezcla no siendo satisfactorio para las

mezclas asfálticas tibias ya que se incumple con los requerimientos establecidos en las normas de dichas países.

3.4.5. Aditivo Evotherm

3.4.5.1. Estabilidad Marshal en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico

Evotherm

En la siguiente tabla se puede observar la variación que existe de la estabilidad entre las mezclas asfálticas calientes (MAC) y las mezclas asfálticas tibias (MAT) mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm al 1%, en diferentes temperaturas de mezclado, en distintos lugares de El salvador.

Tabla 3.88. Cuadro de variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (lb-fuerza)					
MEZCLADO	MAC	VARIACIÓN DE MAC	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)
150	3290	0%	-	-	-	-
140	-	-	3750	13,98%	4229	28,54%
130	-	-	3487	5,99%		
120	-	-	3500	6,38%		
110	-	-	3162	-3,89%	-	-

En el siguiente **Grafico 3.62** se puede observar la variación de la estabilidad que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Evotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

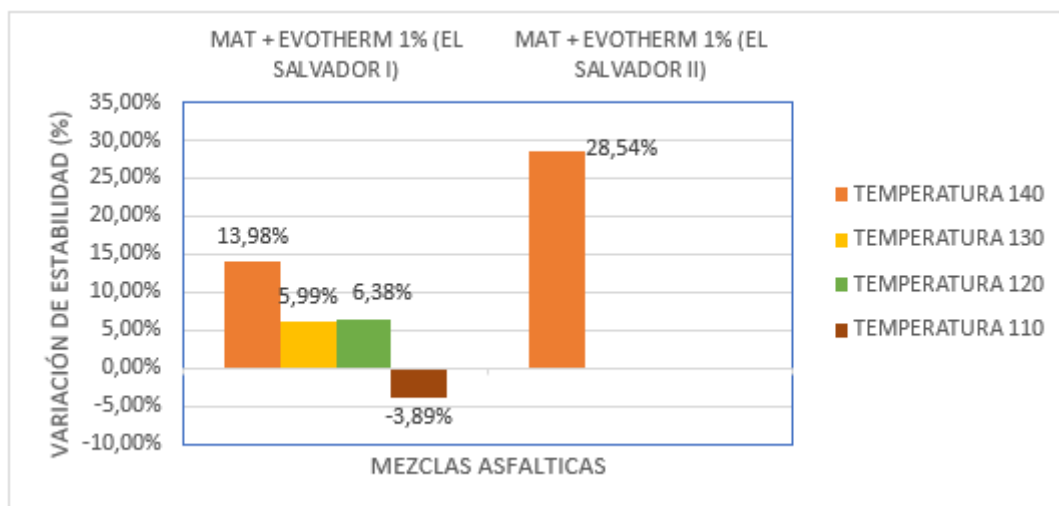


Gráfico 3.62. Porcentaje de la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en el gráfico se ha llegado a determinar que a una temperatura de 140°C presenta una estabilidad con un incremento del 28.54% debido a la aplicación del aditivo químico Evotherm en El Salvador II, pero también se observa que a temperaturas de 110°C, sufre una ligera variación de -3.89%, en comparación con las mezclas asfálticas Calientes.

3.4.5.2. Flujo en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico Evotherm

En la siguiente Tabla se observa la variación del Flujo de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Evotherm al 1%, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.89. Cuadro de variación de flujo de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.

TEMPERATURA	FLUJO MARSHALL (lb-fuerza)					
MEZCLADO	MAC	VARIACIÓN DE MAC	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)
150	11,03	0%	-	-	-	-
140	-	-	14,74	33,64%	13,9	26,02%
130	-	-	12,99	17,77%		
120	-	-	12,4	12,42%		
110	-	-	12,5	13,33%	-	-

En el siguiente **Grafico 3.63** se puede observar la variación de flujo que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Evotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

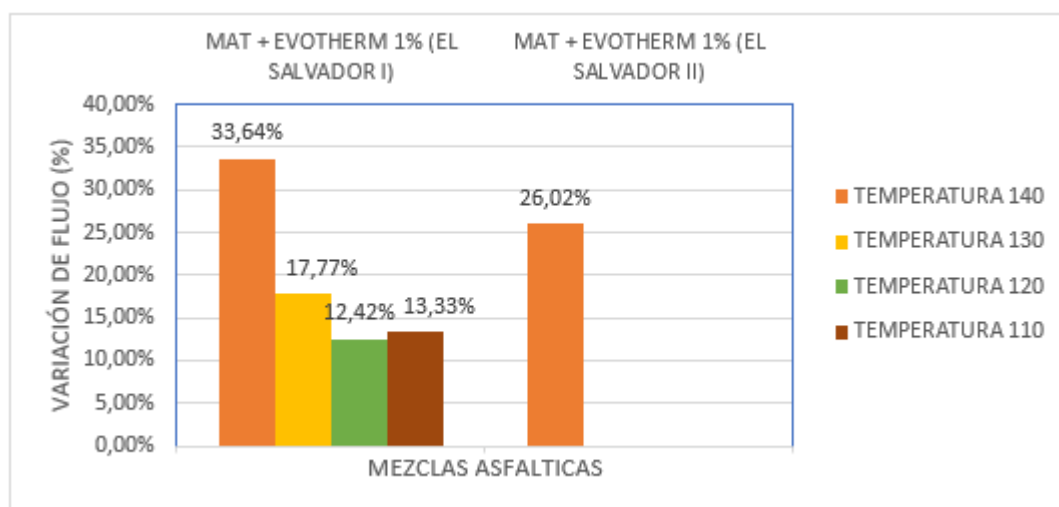


Gráfico 3.63. Porcentaje de la variación de flujo de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se puede observar en la gráfica, se ha llegado a determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo del 1%, presenta un incremento máximo del 33.64% y un mínimo de 12.42% lo cual no sería tan beneficioso ya que tiene una gran variación en el flujo lo cual se

tendría que estabilizar con otros porcentajes de aditivo ya que a una temperatura de 140°C se encontraría en el límite del rango de 8-14.

3.4.5.3. Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas tibias con el aditivo Químico

Evotherm

En la siguiente Tabla se observa la variación del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica tibia con respecto a la mezcla asfáltica caliente, mediante la aplicación de aditivo químico Evotherm al 1%, en diferentes temperaturas de mezclado.

Tabla 3.90. Cuadro de variación de porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas tibias con respecto a las mezclas asfálticas calientes mediante la aplicación del aditivo químico Evotherm.

TEMPERATURA	VACÍOS MARSHALL (lb-fuerza)					
MEZCLADO	MAC	VARIACIÓN DE MAC	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)	MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)	VARIACION DE MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)
150	4,16	0%	-	-	-	-
140	-	-	4,5	8,17%	4,65	11,78%
130	-	-	3,6	-13,46%		
120	-	-	4,1	-1,44%		
110	-	-	4,2	0,96%	-	-

En el siguiente **Grafico 3.64** puede observar la variación de vacíos que existe entre las mezclas asfálticas tibias y calientes, aplicando el aditivo químico Evotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

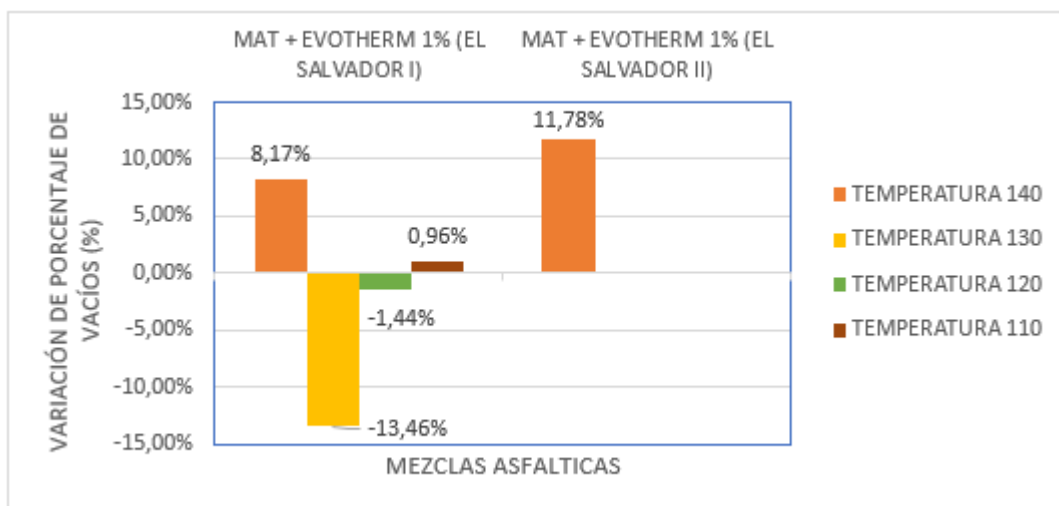


Gráfico 3.64. Porcentaje de la variación de vacíos de la mezcla asfáltica tibia aplicando Evotherm al 1%, a diferentes temperaturas de mezclado.

Como se muestra en la gráfica, se puede determinar que al utilizar un porcentaje de aditivo del 1% los vacíos se encuentran estables con variaciones de 0.96% y -1.44%, con temperaturas de mezclado de 120°C y 110°C, mientras que temperaturas altas como 140°C tiende a aumentar en un 11.78% y a partir de una temperatura de 130% tiende a ser estable en comparación con las mezclas asfálticas calientes.

3.4.6. Variación promedio de la estabilidad Marshall al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la siguiente tabla se muestra los diferentes aditivos químicos utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas calientes, se puede observar el porcentaje de variación de la estabilidad, con lo que se puede dar cuenta si los valores de las propiedades mecánicas aumentan o disminuyen al adherir un aditivo. De igual manera se determina el promedio de todas las variaciones como el mínimo y máximo al utilizar los diferentes aditivos con distintas temperaturas de mezclado.

Tabla 3.91. Promedio de la variación de la Estabilidad Marshall aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales

Mezclas asfálticas	Variación de Estabilidad
MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)(110°C)	0,21%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(140°C)	2,85%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(130°C)	-6,78%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(120°C)	-8,38%
MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)(140°C)	9,13%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(140°C)	-5,95%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(130°C)	5,11%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(140°C)	13,98%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(130°C)	5,99%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(120°C)	6,38%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(110°C)	-3,89%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)(140°C)	28,54%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(150°C)	2,33%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(140°C)	9,82%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(130°C)	4,19%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(120°C)	-0,25%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(140°C)	42,11%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(130°C)	10,63%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(120°C)	9,84%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(110°C)	2,74%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(130°C)	9,37%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(120°C)	3,07%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(110°C)	1,27%
MAT + REDISSET 2% (COLOMBIA)(120°C)	12,20%
MAT + REDISSET 2% (ECUADOR)(100°C)	41,22%
MAT + REDISSET 2% (ECUADOR)(80°C)	19,69%
PROMEDIO	8,29%
MAXIMO	42,11%
MINIMO	-8,38%

El promedio que presenta la variación de la estabilidad Marshall es del 8.29% por lo que nos muestra que mediante la aplicación del aditivo químico la estabilidad tiende a aumentar en la mayoría de los casos incluso manejando temperaturas bajas de hasta 110°C, en el cuadro de análisis también se puede apreciar que la estabilidad tiende a ser constante o

disminuir al manejar temperaturas bajas como de 110°C mientras que si manejamos temperaturas altas de 140°C la estabilidad puede llegar a incrementar hasta un 42.11%.

3.4.7. Variación promedio del Flujo Marshall al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en convencionales

En la siguiente tabla se muestra los diferentes aditivos químicos utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas calientes, se puede observar el porcentaje de variación del flujo, con lo que se puede dar cuenta si los valores de las propiedades mecánicas aumentan o disminuyen al adherir un aditivo. De igual manera se determina el promedio de todas las variaciones como el mínimo y máximo al utilizar los diferentes aditivos con distintas temperaturas de mezclado.

Tabla 3.92. Promedio de la variación del Flujo Marshall aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales

Mezclas asfálticas	Variación de Flujo
MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)(110°C)	-12,36%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(140°C)	1,14%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(130°C)	11,54%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(120°C)	28,13%
MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)(140°C)	0,16%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(140°C)	19,67%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(130°C)	23,90%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(140°C)	33,64%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(130°C)	17,77%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(120°C)	12,42%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(110°C)	13,33%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)(140°C)	26,02%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(150°C)	-0,21%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(140°C)	-1,58%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(130°C)	-0,21%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(120°C)	1,37%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(140°C)	-1,83%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(130°C)	-14,43%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(120°C)	-11,50%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(110°C)	-11,50%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(130°C)	0,00%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(120°C)	4,92%

MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(110°C)	2,73%
MAT + REDISET 2% (COLOMBIA)(120°C)	-9,79%
MAT + REDISET 2% (ECUADOR)(100°C)	10,17%
MAT + REDISET 2% (ECUADOR)(80°C)	27,12%
PROMEDIO	6,56%
MAXIMO	33,64%
MINIMO	-14,43%

En el promedio de la variación del flujo Marshall llegamos a determinar un valor del 6.56% el cual nos muestra un ligero incremento que es favorable para las mezclas asfálticas tibias ya que tiende a ser constante en comparación a las mezclas asfálticas en caliente, también se observa que mediante la aplicación de aditivo químico al momento de trabajar en temperaturas altas el valor del flujo tiende a incrementar llegando a aumentar un 33.64% a diferencia de cuando trabajamos en temperaturas bajas el flujo tiende a ser constante o presentar una ligera disminución de hasta -14.43%, esto nos quiere decir que la aplicación del aditivo química nos permite disminuir la temperatura de mezclado hasta los 100 y 110 °C.

3.4.8. Variación promedio del porcentaje de vacíos al utilizar aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la siguiente tabla se muestra los diferentes aditivos químicos utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas calientes, se puede observar el porcentaje de variación de vacíos, con lo que se puede dar cuenta si los valores de las propiedades mecánicas aumentan o disminuyen al adherir un aditivo. De igual manera se determina el promedio de todas las variaciones como el mínimo y máximo al utilizar los diferentes aditivos con distintas temperaturas de mezclado.

Tabla 3.93. Promedio de la variación del porcentaje de vacíos aplicando aditivos químicos en las mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas convencionales

Mezclas asfálticas	Variación de vacíos
MAT + ZYCOTHERM 0,07% (ECUADOR)(110°C)	-26,00%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(140°C)	4,88%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(130°C)	14,63%
MAT + ZYCOTHERM 0,15% (PERÚ)(120°C)	34,15%
MAT + QUIMIBOND 0,70% (PERÚ II)(140°C)	-19,51%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(140°C)	21,95%
MAT + QUIMIBOND 0,80% (PERÚ)(130°C)	12,20%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(140°C)	8,17%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(130°C)	-13,46%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(120°C)	-1,44%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR I)(110°C)	0,96%
MAT + EVOTHERM 1% (EL SALVADOR II)(140°C)	11,78%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(150°C)	-4,56%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(140°C)	9,59%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(130°C)	30,70%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA I)(120°C)	56,59%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(140°C)	-41,00%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(130°C)	-15,33%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(120°C)	-14,83%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA II)(110°C)	-7,67%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(130°C)	-7,50%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(120°C)	-0,94%
MAT + HUSIL 1% (COLOMBIA III)(110°C)	4,38%
MAT + REDISET 2% (COLOMBIA)(120°C)	40,00%
MAT + REDISET 2% (ECUADOR)(100°C)	21,00%
MAT + REDISET 2% (ECUADOR)(80°C)	90,50%
PROMEDIO	8,05%
MAXIMO	90,50%
MINIMO	-41,00%

La variación promedio del porcentaje vacíos presenta un valor del 8.05% el cual es favorable considerando que en la mayoría de los casos se debe de encontrar en un rango de 3 a 5 %, mediante la aplicación del aditivo químico nos podemos dar cuenta que puede ser estable o presentar ligeras variaciones hasta una temperatura de 110° ya que si se trabaja con temperaturas menores a estas puede llegar a sufrir un incremento del 90% en algunos casos, mientras que si trabajamos con las temperaturas de 140 hasta 110°C los valores podrían

llegar a disminuir hasta un 41% el cual no afectaría significativamente a la mezcla asfáltica tibia.

3.5. Porcentajes de aditivos utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas tibias (MAT).

La siguiente tabla presenta los valores óptimos de cada aditivo y las diferentes temperaturas de compactación con las que se puede compactar también se presentan los valores de estabilidad, flujo y vacíos para conocer que aditivo será más factible su aplicación, por otra parte, realizar una comparativa entre las normas aplicadas en el Ecuador y la de los demás países latinoamericanos como son Colombia, Perú y el Salvador.

Tabla 3.94. Valores óptimos de los diferentes aditivos utilizados en cuatro países latinoamericanos

Aditivos	Temperatura de compactación	Porcentaje óptimo de asfalto	Porcentajes de aditivo	Estabilidad	Flujo	Norma	VA %	Norma
Zycotherm (Ecuador)	110	7	0.07%	2375	14	ASTM D6927	3.7	ASTM D 3549
Rediset (Ecuador)	100	7.2	2.00%	3488	13	ASTM D6927	4.84	ASTM D 3549
Quimibond (Perú)	130	5.8	0.80%	1123	15.24	MTC E 504	4.6	MTC E 504
	140			1255	14.72		5	
Zycotherm II (Perú)	130	5.8	0.15%	1113	13.72	MTC E 504	4.7	MTC E 504
	140			1228	12.44		4.3	
Quimibond II (Perú)	140	5.3	0.70%	1303	12.32	MTC E 504	3.3	MTC E 504
Evotherm (El Salvador)	120	5.3	1.00%	3500	12.4	AASHTO T 245	4.1	ASTM D 3203
	110			3162	12.5		4.2	
Evotherm II (El Salvador)	140	5.9	1.00%	4229	13.9	AASHTO T 245	4.65	ASTM D 3203
Rediset II (Colombia)	140	5.4	2.00%	4056	12.99	INV E-748-13	5.6	INV E-736
Husil (Colombia)	150	5.3	1.00%	2855	14.57	INV E-748-13	3.98	INV E-736
	140			3064	14.37		4.57	
Husil II (Colombia)	130	5	1.00%	2540.23	11.68	INV E-748-13	5.08	INV E-736
	120			2522.15	12.08		5.11	
	110			2359.43	12.08		5.54	
Husil III (Colombia)	130	5	1.00%	3030.25	14.4	INV E-748-13	2.96	INV E-736
	120			2855.69	15.11		3.17	
	110			2805.91	14.8		3.34	

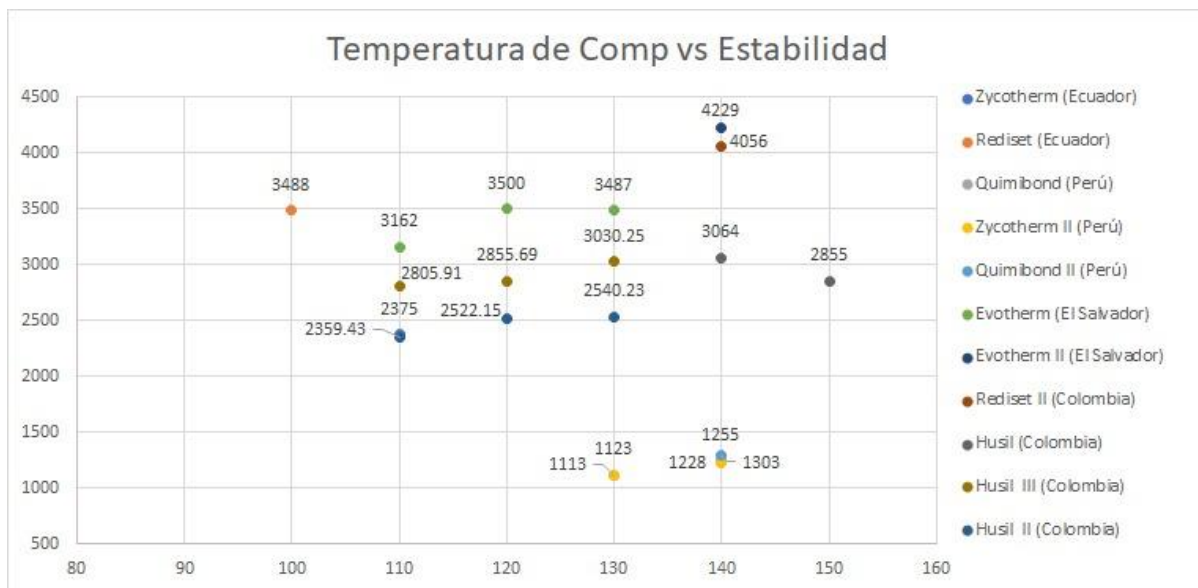


Gráfico 3.65. Temperatura de Compactación vs Estabilidad.

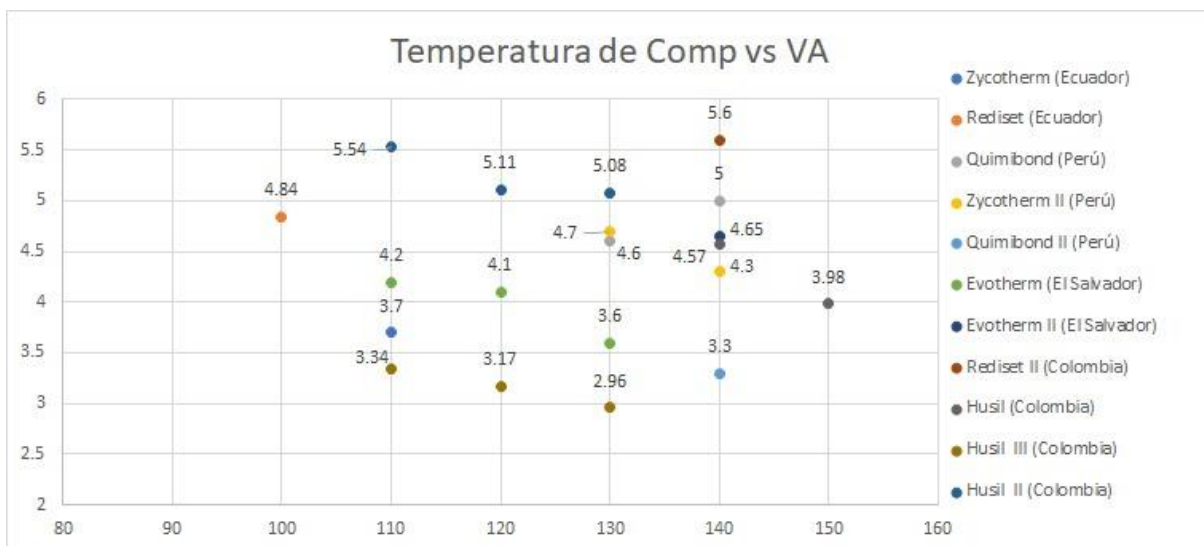


Gráfico 3.66. Temperatura de Compactación vs VA

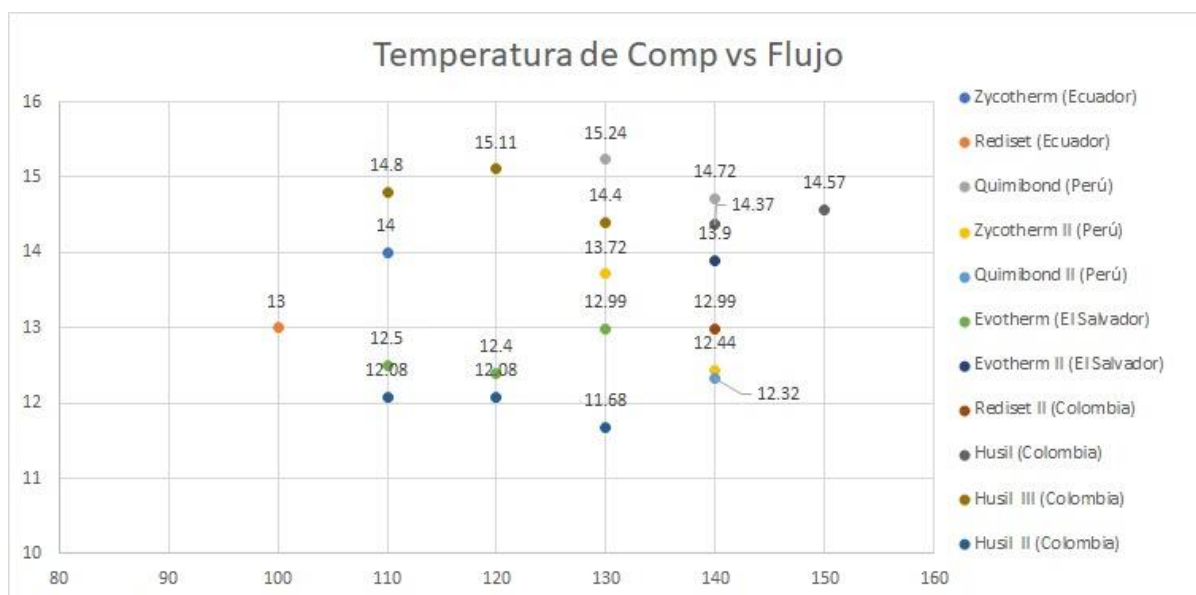


Gráfico 3.67. Temperatura de Compactación vs Flujo.

Como se puede observar en la gráfica Temperatura de compactación vs Estabilidad se puede determinar que los aditivos Zycotherm, Husil, Evotherm y Rediset aplicados en los países de Colombia, Ecuador y el Salvador cumple con los requisitos establecidos en la normativa Ecuatoriana MOP-001-F 2002 a diferencia del aditivo Quimibond, Quimibond II y Zycotherm II no cumplen con los requisitos aplicados en el Ecuador ya que la normativa que se aplica en la ciudad de Lima (Perú) requiere de una estabilidad baja.

Por otra parte, se llega a determinar que las gráficas de flujo y de vacíos cumplen con los requisitos establecidos por la norma MOP-001-F 200 establecida en Ecuador, esto quiere decir que los requisitos de las demás normas aplicadas en los distintos países de latino América son similares con los de Ecuador.

3.6. Análisis de costos de elaboración de mezclas asfálticas tibias

Tabla 3.95. Costos de los diferentes aditivos en cuatro países Latinoamericanos

	Muestra	Unidad	Costo
Zycotherm	Mezcla asfáltica convencional	\$US/m ²	6.36
	Mezcla asfáltica + 0.07 % de aditivo	\$US/m ²	6.18
Quimibond	Mezcla asfáltica convencional	\$US/m ²	7.84
	Mezcla asfáltica + 0.8 % de aditivo	\$US/m ²	7.61
Husil	Mezcla asfáltica convencional	\$US/m ²	8.69
	Mezcla asfáltica + 1 % de aditivo	\$US/m ²	8.71
Evotherm	Mezcla asfáltica convencional	\$US/m ²	7.41
	Mezcla asfáltica + 1 % de aditivo	\$US/m ²	11.44
Rediset	Mezcla asfáltica convencional	\$US/m ²	6.4
	Mezcla asfáltica + 2 % de aditivo	\$US/m ²	5.96

El análisis de costos realizado en esta investigación varía dependiendo de las tecnologías ya que se realizó en distintos países latinoamericanos, es por eso que para la elaboración de las mezclas asfálticas se necesitaron de algunos recursos y actividades tales como materiales, mano de obra, etc. Estos insumos pueden llegar afectar directamente a los costos de producción de las mezclas asfálticas.

En el caso del aditivo Zycotherm aplicado en Ecuador se observa una mínima disminución de precios al momento de utilizar el 0.07% de este aditivo, el costo de comercialización es de \$34,50 el kg y del cemento asfáltico AC 20 es de \$0,30 el kg por lo que al momento de llevar a cabo el análisis de costo de la mezcla elaborada se basó en la composición de los materiales tanto en volumen, peso y la afección que presenta la mezcla al momento de ser aplicado el aditivo, el diseño de la carpeta asfáltica es de 5 cm considerando a la unidad de medida m², llegando a determinar que las mezclas asfálticas convencionales tienen un costo de 6,36 \$/m² y de las mezclas asfálticas más el aditivo Zycotherm tiene un costo de 6,18 \$/m², como se puede observar la variación del costo es mínima pero en un proyecto vial el costo por kilómetro podría llegar a ser significativo (Escobar & Tunala, 2019).

En el aditivo Rediset aplicado en el Ecuador se pudo evidenciar una reducción en la fabricación de la mezcla de 160 a 120 grados Celsius, en el cual un caldero de Diesel consume 20 galones de Diesel por hora, lo que permitiría ahorrar 8 horas la cual es la duración en la que varía de 120 a 160 grados la temperatura, permitiendo reducir a 160 galones de combustible para el uso de 40 toneladas de asfalto líquido, esto implica que tendríamos una reducción de 4 galones de Diesel por tonelada. correspondiendo el 7% de una mezcla asfáltica, una tonelada de asfalto líquido, la cual se puede elaborar 14,29 toneladas de mezcla asfáltica. esto permitiría tener una reducción en el costo de la tonelada de mezcla asfáltica la que estaría en \$0,29, esto se dio por la reducción de combustibles (García, 2010).

Al elevar la temperatura de 120 a 160 °C tiene un costo el cual puede reducirse entre 1 y 2 galones por metro cúbico, esto produciría un ahorro 0,65 a 1,30 por tonelada de mezcla asfáltica. El costo de aditivos de adherencia está cerca de los \$2,80. En Ecuador las compañías constructoras usan cerca del 0,2 % de los aditivos sobre el asfalto de la mezcla. Esto produce una reducción de 40 ctvs. por tonelada de la mezcla asfáltica (García, 2010).

Para el caso del aditivo Husil que se lo aplica en la ciudad de Bogotá (Colombia) se realizó un análisis costo beneficio entre los distintos asfaltos (asfalto convencional y asfalto modificado), el ligante con el que se llevó a cabo los ensayo fue un CA 60/70 y CA 60/70 más el 1% de Husil, llegando a obtener un costo de 8.69\$ en el caso de las mezclas asfálticas convencionales a diferencia de las mezclas asfálticas tibias con un costo de 8.71\$/m², como se puede observar el asfalto modificado mediante la aplicación del aditivo Husil llega a ser más costoso debido a que se aplica un porcentaje más alto con respecto a los demás, lo que conlleva a disolver más tiempo en el ligante (Romero & Valencia, 2019).

La elaboración de las mezclas asfálticas tibias mediante la aplicación del aditivo Quimibond en Perú, muestran un comportamiento similar en sus componentes mecánicas en

relación a las mezclas asfálticas en caliente esto quiere decir que se obtienen pesos unitarios y resistencias similares, es por eso que no existe una gran variación en los costos en la elaboración de las mezclas asfálticas tibias relacionadas con las mezclas asfálticas calientes en donde se llega a observar una variación de costos es en la disminución de la energía al momento de fabricar, obteniendo una relación del 12,4% para reducir 30 grados de temperatura y del 6,2% para reducir 15 grados de temperatura llegando a formar un gran impacto en la emisión de gases que son generados por los combustibles, el costo que presenta las mezclas asfálticas convencionales para el caso de quimibond es de 7.84\$/m², mediante la aplicación del aditivo químico presentamos una disminución de costos (Flores & Rojas, 2019).

Para el caso del aditivo Evotherm el costo para elaborar un metro cuadrado de la mezcla asfáltica tibia en planta en relación a una mezcla convencional, con lo que llegamos a observar que las mezclas asfálticas convencionales tienen un costo de 7,41 \$/m² y de las mezclas asfálticas más el aditivo Evotherm tiene un costo de 11,44 \$/m², como se puede observar la variación del costo es de 4,03 \$/m² mayor a las mezclas convencionales.

3.7. Beneficios de las Mezclas Asfálticas tibias

3.7.1. Emisiones

Una de las ventajas que presentan las mezclas asfálticas tibias son las bajas emisiones que generan debido a la reducción de temperatura al momento de realizar su producción, en este caso presentamos la baja contaminación de los olores y del gas carbónico con respecto a la producción de la mezcla asfáltica en caliente.

Se toma en cuenta que las emisiones en la producción de mezcla – asfalto y la colocación suelen, en distintos niveles elevados, ser dañinos para la salud. En el año 2000 se publicó un estudio por parte del Instituto Nacional para la Salud y Salud Ocupacional, sobre

los efectos de riesgo en la salud Ocupacional por la emisión expuesta por la mezcla – asfalto. En esta publicación, el NIOSH determina las consecuencias potenciales que se presentaban en la salud por la exposición ocupacional al asfalto.

En 1977. El NIOSH analizó que entre las consecuencias adversas para la salud los riesgos se encuentran en la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio (Conrado & Córdoba, 2013).

Figura 3.2. Emisiones de los gases producidos en las mezclas asfálticas.



La representación de este análisis nos indica los porcentajes de reducción que presenta entre las mezclas asfálticas calientes (HMA) y las mezclas asfálticas tibias (WAM), por lo que indica una disminución de CO₂ de un 30 al 40 % acompañado de un 35 % en SO₂ (emisiones de dióxido de azufre), también se encuentra una reducción del 50 % en compuestos orgánicos, de un 60 al 70 % en óxido nitroso y finalmente un 25 – 55 % de polvo (Rodríguez, 2014).

3.7.2. Consumo de energía

La optimización del consumo de energía es el bien más visible que se ha podido recalcar en las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los beneficios más

importantes de ésta. Los análisis han determinado que al minimizar la energía se puede obtener una reducción de 30% mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto (Conrado & Córdoba, 2013).

La reducción de la energía es beneficioso ya que el costo de producción de la mezcla se reduciría y se obtendría una optimización en costos, pero a su vez puede tener una implementación por minimizar en los costos involucrados en el manejo de la producción de mezclas tibias, como para equipos de modificación y aditivos. También se puede obtener varios beneficios por la minimización de las temperaturas de producción, los cuales pueden producir menor desgaste en la planta asfáltica (Conrado & Córdoba, 2013).

3.7.3. Beneficios Económicos

Los beneficios económicos van de la mano del consumo de energía ya que se presenta una reducción en el consumo de combustibles por lo que se presenta una reducción en los costos de producción.

Relatan los países de Alemania y Francia en los años de experiencia, que el consumo de energía en las mezclas asfálticas tibias se disminuye entre un 20 al 75 % en relación a las mezclas asfálticas en caliente, esto rango varía dependiendo el rango de temperatura que disminuye incluso del aditivo que se encuentra utilizando.

Es muy importante el beneficio económico que presenta estas mezclas asfálticas, pero dependerá relativamente del sector en el que se encuentre elaborando las mezclas por lo que si el costo de la materia prima es alto el beneficio que presenta es de un alto impacto a diferencia que si el costo de los combustibles es bajo el impacto que generará es bajo, pero de igual manera en ambos casos existe un beneficio económico (Linares et al., 2010).

3.7.4. Beneficios de Producción

Permite ser transportado a mayores distancias entre el lugar de obra o colocación y la planta.

Debido a que la viscosidad como ya se mencionó se reduce en los procesos de las mezclas asfálticas tibias, brinda mayor tiempo a la mezcla hasta llegar al momento en el que se genera el endurecimiento, por lo que se presentan ciertas amplitudes de tiempo para aumentar la trayectoria de la aplicación de la mezcla.

La reducción de temperatura que las mezclas asfálticas tibias presenta al momento de la producción ayuda a la reducción del envejecimiento del asfalto o ligante.

La elaboración de las mezclas asfálticas tibias evita que se genere un gran desgaste de la planta debido a la reducción de temperatura, en referencia a las mezclas asfálticas en caliente que se desgastan con mayor frecuencia (Linares et al., 2010).

3.7.5. Beneficios de la aplicación en obra.

Debido a la reducción de temperatura de las MAT, existe mayor compactación de los agregados.

Al momento de compactar con las mezclas asfálticas tibias se puede trabajar de mejor manera ya que el compactador pasará un mayor número de veces debido a que no existe el enfriamiento rápido como en las mezclas asfálticas calientes (Linares et al., 2010).

3.8. Desventajas de las mezclas asfálticas tibias

Una de las posibles desventajas que puede llegar a generar la aplicación de las mezclas asfálticas tibias se puede presentar el ámbito económico, debido a las modificaciones que se deben generar a las plantas asfálticas ya adaptadas para la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, ya que las MAT necesitan ciertas adaptaciones tanto en la elaboración y

producción de dichas mezclas, por otra parte el costo podría aumentar al momento de la aplicación de los aditivos ya que aumentaría el precio por tonelada de la mezcla debido a dichos requerimientos.

No existen desventajas como tal que destaque debidos a las propiedades mecánicas ya que no existe una gran diferencia entre las mezclas asfálticas tibias y calientes.

Pero como ya se menciona la desventaja que más destaca las mezclas asfálticas tibias es la aplicación de estas nuevas tecnologías a las plantas asfálticas ya existentes ya que representa una inversión para dichas plantas (Linares et al., 2010).

Ventajas	Desventajas
Reducción de temperatura en la producción de las mezclas asfálticas, llegando a reducir las temperaturas entre 80 y 40°C	Modificación de las plantas asfálticas, la elaboración de las mezclas asfálticas tibias requiere de ciertas adaptaciones en las plantas asfaltadoras por lo que podría ser un problema al momento de la elaboración de dichas mezclas.
Reducción en la emisión de gases al momento de la producción de las mezclas asfálticas, reduciendo significativamente las emisiones de olores y humos en comparación a las mezclas asfálticas calientes (MAC).	Incremento en el costo de elaboración de las mezclas asfálticas tibias debido a la aplicación de los aditivos químicos.
Reducción del consumo de energía, es uno de los veneficios más obvio de las MAT ya que llegan a reducir alrededor de un 30 % al consumo de energía debido a la disminución de temperatura de mezclado.	
Mejoras al momento de la trabajabilidad en la producción de las mezclas, ya que facilitan la colocación y compactación de las mezclas asfálticas en comparación a las mezclas asfálticas en caliente.	
Reducción de la viscosidad del cemento asfáltico, llegando a cubrir totalmente los agregados a temperaturas inferiores a relación de las mezclas asfálticas convencionales (MAC).	

<p>Utilizando la tecnología de las mezclas asfálticas tibias se requiere de menos energía en el proceso de compactación generando menos esfuerzo.</p>	
<p>Apertura al tráfico, el uso de esta tecnología permite apertura al tráfico en un menor tiempo en relación a las mezclas asfálticas en caliente.</p>	

Capítulo IV

4.1. Conclusiones

Se pudo evidenciar que al momento de la elaboración de las mezclas asfálticas calientes y tibias se puede observar que presentan similares propiedades mecánicas tanto en la Estabilidad, flujo y vacíos.

Durante el análisis de las mezclas asfálticas tibias con y sin aditivo se determina que este tipo de mezcla al momento de aplicar el aditivo químico reducen el porcentaje de vacíos en la mezcla, que permite cumplir con los requisitos de las normas especificadas de cada país de Latinoamérica presentados en la investigación, además cumple específicamente con los requisitos de la norma la MOP-001-F 2002 de Ecuador.

Los resultados del ensayo Marshall presentan una estabilidad mayor en el caso de las mezclas asfálticas convencionales, una vez que se realiza las mezclas asfálticas tibias se puede observar una pequeña disminución en este valor debido a la disminución de temperatura de compactación, el cual cumple de la misma manera con los requisitos establecidos en las normas de cada país de Latinoamérica.

Mediante la aplicación del aditivo se pudo evidenciar la disminución de temperatura mejorando las propiedades de trabajabilidad y adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados, siendo una de las ventajas que presenta la elaboración de las mezclas asfálticas tibias, cabe recalcar que el porcentaje de aditivo dependerá de la cantidad que recomiende el fabricante.

La estabilidad del aditivo Quimibond de la ciudad de Lima – Perú es baja en comparación a los valores de los demás países, sin embargo, cumple con los requisitos de elaboración de mezclas asfálticas de la norma EG – 2013 de Perú, al mismo tiempo no

cumplen con los valores de la normativa ecuatoriana presentada en la norma MOP-001-F 2002.

La menor temperatura de compactación se la pudo evidenciar mediante la aplicación de los aditivos REDISET, ZYCOTHERM y EVOTHERM llegando a evidenciar una reducción entre 80 y 70 °C, a diferencia de los aditivos QUIMIBOND y HUSIL que presentaron una pequeña disminución entre 30 y 40°C, los cuales cumplen con los parámetros de estabilidad Marshall con respecto a la normativa de cada país de Latinoamérica.

En la comparación de costos se evidencio que al momento de la elaboración de las mezclas asfálticas tibia refleja un incremento debido a la aplicación de los aditivos químicos, este valor es compensado con la reducción de combustibles debido a la disminución de la temperatura, para el caso QUIMIBOND, ZYCOTHERM, REDISET y EVOTHERM, presenta un ahorro del 12.4% en combustible al momento de reducir 30 °C, a diferencia del aditivo HUSIL que presento un ligero incremento al momento de la elaboración ya que requiere de un mayor tiempo de calentamiento para la disolución del aditivo.

La ventaja principal que presenta la elaboración de las mezclas asfálticas tibias (MAT) es la reducción de emisión de gases tóxicos como el CO₂ que tiene una disminución de 30 a 40% debido a la reducción de temperatura y disminución de energía (Combustibles) al momento de la elaboración.

Una desventaja que puede presentar las mezclas asfálticas tibias es la modificación en las plantas de elaboración ya que requiere de ciertas modificaciones para la implementación de dichas mezclas.

Finalmente podemos decir que los aditivos más recomendados para la implementación de las mezclas asfálticas tibias son: ZYCOTHERM, REDISET y EVOTHERM ya que

cumplen tanto con los requisitos de estabilidad de cada país y específicamente con las normas ecuatorianas, de igual manera presenta beneficios en costos, la reducción de emisiones de gases tóxicos y la trayectoria para su tendido es mayor en relación a las convencionales.

4.2. Recomendaciones

Es importante realizar un estudio previo al momento de la elaboración de las mezclas asfálticas tibias con la finalidad de conocer cuál es la temperatura adecuada de compactación para que cumpla con los requisitos establecidos de cada país.

En el caso de que se requiera minimizar el impacto ambiental que generan las mezclas asfálticas calientes, es recomendable la elaboración de las mezclas asfálticas tibias ya que reduce la emisión de los gases al momento de tendido, incluso mejorando las condiciones de temperatura y disminución de energía que generan los combustibles.

Es recomendable conocer las normativas de cada país en el que se encuentre trabajando ya que deben de cumplir con los requisitos de estabilidad, flujo y vacíos establecidos en dichas normas.

Se recomienda la aplicación de los aditivos ZYCOTHERM, REDISSET y EVOTHERM ya que cumplen con los parámetros establecidos en las normas, son benéficos para la reducción de emisiones de gases tóxicos incluso presentan una disminución de costos el cual en la aplicación de proyectos viales de gran magnitud podrían llegar a ser significativos.

Bibliografía

- AkzoNobel. (2019). *Warm Mix*. <https://es.scribd.com/document/65573296/Rediset-WMX-Ecuador-R>
- Aponte, M., & Beltran, P. (2013). *CARACTERIZACION FÍSICA Y REOLÓGICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60- 70 MODIFICADO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Asfaltos de Centroamérica S.A. de C.V. (2012). *Mezclas Asfálticas de Temperatura Reducida*. <https://www.bnamericas.com/es/perfil-empresa/equipos-de-construccion-sa-de-cv>
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 7 th Edition Asphalt Mix Design Methods MS-2 7 th Edition Asphalt Mix Design Methods. 7th Editio.*
- Calderón, A. U. (2011). *Mezclas asfálticas tibias (MAT). Vol 2. N°1.*
- Camargo, J. (2016). ANALISIS COMPARATIVO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE MGC-1 Y UNA MEZCLA ASFALTICA DENSA TIBIA BAJO TECNICA DE ESPUMADO CON ADICION DE ZEOLITA SINTETICA. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (Vol. 5, Issue 2). UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Campos, C., Guzmán, M., & Sánchez, R. (2014). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA EN COMPARACIÓN CON EL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE*. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- Castaneda, C., Escobar, G., & López, L. (2011). *“APLICACIÓN DEL MÉTODO MARSHALL Y GRANULOMETRÍA SUPERPAVE EN EL DISEÑO DE MEZCLA*

ASFALTICA TEMPLADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA. ” UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Conrado, L., & Córdoba, J. (2013). Warm mix asphalt design from mix asphalt and crude palm oil. *Dyna*, 80(179), 99–108.

Contreras, C., & Mamani, D. (2019). *Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados.* UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS FACULTAD.

Escobar, P., & Tunala, A. (2019). *COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS (WMA) Y MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE (HMA) CON AGREGADOS DE LA MINA DE GUAYLLABAMBA.* PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADO.

Flores, R., & Rojas, J. (2019). *Comportamiento De Las Mezclas Asfálticas Tibias Adicionando Tensoactivos Y Sus Beneficios Respecto a Las Mezclas Asfálticas En Caliente.* UNIVERSIDAD RICARDO PALMA FACULTAD.

García, M. (2010). *Comparación del comportamiento mecánico de mezcla asfáltica tibia y mezcla asfáltica caliente.*

INVIAS. (2013). *INVIAS 2013 Capitulo 4.*

Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., & Del Val, M. (2004). *Ingeniería de Carreteras_Vol_II_Carlos_K (1).pdf* (C. Fernández Madrid (ed.); Volumen II).

Linares, L., Motan, R., & Peñate, R. (2010). *“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA SEMICALIENTE DRENANTE EN EL SALVADOR.”* UNIVERSIDAD DE EL

SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.

- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para ingeniería civil* (M. M. Romo (ed.); Segunda Ed).
- Méndez, G., Morán, J., & Pineda, L. (2014). “*DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA, MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL, UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO.*” UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- Ministerio de Obras Publicas y Comunicación. (2002). *PUBLICAS Y COMUNICACIONES MOP - 001-F 2002. 772.*
- Ministerio de Transporte y Comunicacion. (2013). *MANUAL DE CARRETERAS* : 605.
- Nations, U. (2011). *GLOBALLY HARMONIZED SYSTEM OF CLASSIFICATION AND LABELLING OF CHEMICALS (GHS).*
- QSI Perú S.A. (2019). *QUIMIBOND ADVANCE* ®.
- Rodríguez, J. (2014). *ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.*
- Rodriguez, N., & Sanchez, J. (2016). *DESARROLLO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA RECICLADA BAJO CRITERIOS TÉCNICOS Y MEDIOAMBIENTALES* (Issue May). UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Romero, J., & Valencia, W. (2019). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ALTO HORNO ESTABILIZADA CON UN ADITIVO QUÍMICO.* UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
- Rondón, A., Vergara, I., & Gómez, D. (2017). *Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto.*

- Rondón, H., Ocampo, M., Vacca, H., Reyes, F., Nieto, J., & Beltrán, D. (2016). The mechanical behavior of two warm-mix asphalts Comportamiento mecánico de dos mezclas asfálticas tibias. In *Ingeniería e Investigación* (Vol. 36, Issue 3).
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.54861>
- Salazar, J. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano*. 25–38.
- WISE. (2016). *¿QUÉ CONTIENE LA MEZCLA ASFÁLTICA?* 2016.
<https://blog.wise.com.mx/que-contiene-la-mezcla-asfaltica>
- Yepes Piqueras, V. (2014). *Maquinaria para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas*. 2014. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/aglomerado-asfaltico/>
- Zydex Inc. (n.d.). *ZycoTherm*. 2.