



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTOR: REVELO CORELLA, MARY ELIZABETH

**TEMA: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
MODIFICADAS CON ELASTÓMERO (CAUCHO) Y TEREFTALATO DE
POLIETILENO RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20**

DIRECTOR: ING. ROMERO FLORES, ALEX PATRICIO MSC.

CO-DIRECTOR: ING. BONIFAZ GARCÍA, HUGO FABIÁN

SANGOLQUÍ, AGOSTO 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INGENIERIA CIVIL

CERTIFICADO

Ing. Patricio Romero Flores MSc. e Ing. Hugo Bonifaz García

Certifican que el trabajo titulado “ **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON ELASTÓMERO (CAUCHO) Y TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20**”, realizado por Revelo Corella Mary Elizabeth ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato (PDF).

Autorizan a Revelo Corella Mary Elizabeth que lo entreguen al Ing. Pablo Caiza PhD. en su calidad de Director de la Carrera

Sangolquí, Agosto 2014

Ing. Patricio Romero MSc.

DIRECTOR

Ing. Hugo Bonifaz

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**INGENIERIA CIVIL****AUTORIA DE RESPONSABILIDAD****REVELO CORELLA MARY ELIZABETH**

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “ **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON ELASTÓMERO (CAUCHO) Y TEREFALATO DE POETILENO RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20**”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva respetando derechos intelectuales de terceros conforme citas que constan al final del presente trabajo, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Agosto 2014

EL AUTOR

Revelo Corella Mary Elizabeth

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**INGENIERIA CIVIL****AUTORIZACIÓN**

Yo, Revelo Corella Mary Elizabeth

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la institución el proyecto titulado: “ **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON ELASTÓMERO (CAUCHO) Y TEREFALATO DE POETILENO RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Agosto 2014

EL AUTOR

Revelo Corella Mary Elizabeth

DEDICATORIA

Dedicado a mi DIOS por su amor infinito, y a los dos grandes guerreros que eligió como mis padres, Sonia Corella y Manuel Revelo quienes han sido el pilar fundamental en todo tiempo y ante toda circunstancia, su amor y entrega incondicional han hecho posible que llegue hasta este punto de mi vida, que será el inicio de muchos caminos nuevos por seguir.

A pesar de haber cumplido este sueño compartido sin mi padre, mi corazón se contenta al saber que Él siempre está en cada paso que doy y en cada MISIÓN CUMPLIDA.

Mary Elizabeth

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios por su fidelidad, su amor y su mano extendida en todo tiempo, a mis padres, Sonia y Manuel, la más grande bendición en mi vida, a mis hermanas Cristy y Ale por su amor y por la confianza puesta en mí.

A mis amigos de carrera por el apoyo incondicional que supieron brindarme dentro y fuera de las aulas.

A cada uno de los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil, que han hecho posible mi desarrollo como estudiante y como persona a lo largo de mis estudios en la Universidad de las Fuerzas Armadas, de manera especial al Ing. Patricio Romero e Ing. Hugo Bonifaz por el respeto, amistad, confianza y ayuda incondicional.

Y a cada una de las personas que han estado pendientes de mi avance y desarrollo universitario.

Mary Elizabeth

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO	I
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD.....	II
AUTORIZACIÓN.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	X
ÍNDICE DE CUADROS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
CAPÍTULO 1	1
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Estado del arte	3
1.2.1. Proyectos de aplicación del tereftalato de polietileno reciclado	3
RPET	3
1.2.2. Proyecto de aplicación del elastómero triturado	7
1.3. Área de influencia.....	10
1.4. Objetivos del Proyecto	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos	11
1.5. Justificación e importancia	11
1.6. Metodología.....	13
CAPÍTULO 2	16
2. MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	16
2.1. Introducción.....	16
2.2. Propiedades.....	17
2.2.1. Propiedades de una mezcla asfáltica como capa superior del pavimento.....	18

2.2.2.	Propiedades de una mezcla asfáltica como capa inferior del pavimento.....	20
2.2.3.	Principales propiedades en el diseño de mezclas asfálticas.....	21
2.3.	Clasificación de las mezclas asfálticas.....	28
2.3.1.	Por diferentes fracciones de agregado pétreo.....	28
2.3.2.	Por la proporción de vacíos de aire en la mezcla asfáltica.....	29
2.3.3.	Por el tamaño máximo del agregado pétreo.....	29
2.3.4.	Por la estructura del agregado pétreo.....	30
2.3.5.	Por la granulometría.....	30
2.3.6.	Por la temperatura de puesta en obra.....	30
2.4.	Consideraciones generales para la selección de una mezcla asfáltica.....	31
2.5.	Comportamiento de una mezcla asfáltica compactada.....	32
2.6.	Evaluación y ajuste de una mezcla de diseño.....	38
CAPÍTULO 3.....		41
3.	RECICLAJE Y DISPOSICIÓN DEL ELASTÓMERO DE NEUMÁTICOS ...	41
3.1.	Introducción.....	41
3.2.	Los neumáticos.....	42
3.2.1.	Composición y características.....	42
3.2.2.	Propiedades.....	44
3.3.	Reciclaje de neumáticos.....	45
3.4.	Sistemas de tratamiento de los neumáticos usados.....	47
3.5.	Usos del elastómero de neumáticos tras el reciclado.....	49
CAPÍTULO 4.....		53
4.	RECICLAJE Y DISPOSICIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO “PET”.....	53
4.1.	Introducción.....	53
4.2.	Clasificación de los plásticos.....	54
4.2.1.	Según la disposición de las macromoléculas.....	54
4.2.2.	Según su comercialización.....	55
4.3.	Tereftalato de polietileno PET.....	57
4.3.1.	Proceso de reciclaje para uso en mezclas asfálticas.....	58
4.3.2.	Propiedades del PET.....	61
CAPÍTULO 5.....		63
5.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	63
5.1.	Introducción.....	63
5.2.	Antecedentes.....	63

5.3.	Caracterización de los materiales que componen la mezcla asfáltica	67
5.3.1.	Agregado pétreo	67
5.3.1.1	Análisis granulométrico en el agregado grueso y fino	69
5.3.1.2	Gravedad específica y absorción del agregado grueso	73
5.3.1.3	Gravedad específica y absorción del agregado fino	76
5.3.1.4	Gravedad específica del polvo mineral (pasante del tamiz No.200).....	81
5.3.1.5	Resistencia a la abrasión del árido grueso	83
5.3.1.6	Equivalente de arena al tráfico pesado	86
5.3.2.	Cemento asfáltico.....	90
5.3.2.1.	Gravedad específica.....	90
5.3.2.2.	Penetración	93
5.3.2.3.	Punto de ablandamiento	96
5.3.2.4.	Índice de penetración.....	100
5.3.3.	Elastómero.....	101
5.3.3.1.	Gravedad específica.....	101
5.3.3.2.	Reacción a la temperatura	102
5.3.4.	Tereftalato de Polietileno Reciclado RPET	103
5.3.4.1.	Gravedad específica.....	104
5.3.4.2.	Reacción a la temperatura	105
5.4.	Método de Diseño Marshall	106
5.4.1.	Mezcla asfáltica normal - Briquetas patrón	106
5.4.1.1.	Estabilización granulométrica	107
5.4.1.2.	Elaboración de briquetas	111
5.4.1.3.	Determinación de la Densidad Bulk (Gmb) de las mezclas compactadas	116
5.4.1.4.	Ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall.....	118
5.4.1.5.	Ensayo Gravedad específica teórica máxima - RICE (Gmm).....	120
5.4.1.6.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto	125
5.4.2.	Mezcla asfáltica modificada.....	130
5.4.2.1.	Material: Partículas de elastómero pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.	131
5.4.2.2.	Determinación del porcentaje óptimo de elastómero	133
5.4.2.3.	Material: 50% de partículas de elastómero y 50% de escarcha de RPET pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.....	134
5.4.2.4.	Determinación del porcentaje óptimo de material 50E-50P.....	135
5.5.	Ensayo de choque térmico.....	135

CAPÍTULO 6.....	138
6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	138
6.1. Introducción.....	138
6.2. Diseño de la Mezcla Asfáltica Normal.....	138
6.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica Modificada	144
6.3.1. Material: Partículas de elastómero pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.	144
6.3.2. Material: 50% de partículas de elastómero y 50% de escarcha de RPET pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.....	149
6.4. Análisis comparativo de resultados de los tres tipos de mezclas asfálticas.....	155
6.4.1. Relación - Vacíos de aire	155
6.4.2. Relación – Densidad Bulk.....	156
6.4.3. Relación – Estabilidad.....	157
6.4.4. Relación – Flujo	158
6.4.5. Relación – VAM	159
6.4.6. Relación – VAF.....	160
6.4.7. Relación – Volúmenes	161
6.5. Análisis comparativo de resultados entre los porcentajes óptimos de los materiales modificadores y la mezcla patrón.....	162
6.6. Análisis de resultados del ensayo - Choque Térmico.....	165
CAPÍTULO 7.....	169
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
7.1. Conclusiones.....	169
7.2. Recomendaciones	170
BIBLIOGRAFÍA.....	172

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Modelo de muestra Plastisoil expuesta en laboratorio	4
Fotografía 2. Ladrillos de plástico terminados	5
Fotografía 3. Formas de material reciclado PET	6
Fotografía 4. Adoquines fabricados con caucho de llantas recicladas.....	7
Fotografía 5. Detalle de lámina de caucho reciclado	8
Fotografía 6. Impermeabilización de terraza con membrana EPDM.....	9
Fotografía 7. Forma de la escama de PET	59
Fotografía 8. Forma del pellet de PET	59
Fotografía 9. Recogida selectiva del PET	60
Fotografía 10. Cantera de Pifo	63
Fotografía 11. Muestreo de agregado fino	64
Fotografía 12. Muestreo de agregado grueso	65
Fotografía 13. Muestra de asfalto.....	65
Fotografía 14. Reducción de muestra mediante cuarteo manual	66
Fotografía 15. Serie de tamices (a); Tamizador eléctrico (b).....	70
Fotografía 16. Eliminación del agua superficial del agregado.....	74
Fotografía 17. Muestra de agregado grueso en tanque de inmersión.....	75
Fotografía 18. Tamaños de agregados que corresponden al material fino.....	77
Fotografía 19. Material fino sobre papel absorbente (a); material expuesto a la corriente de aire (b)	78
Fotografía 20. Calibración de picnómetro (a); colocación de la muestra dentro del picnómetro (b)	78
Fotografía 21. Extracción de aire (a); peso del picnómetro más muestra y más agua (b)	79
Fotografía 22. Polvo mineral dentro del picnómetro (a); extracción de aire con la bomba (b); peso del picnómetro, agua y muestra (c)	82
Fotografía 23. Material para ensayo de abrasión	84
Fotografía 24. Esferas de acero (a); Máquina de los Ángeles (b).....	85
Fotografía 25. Material tamizado por la malla No.12.....	85
Fotografía 26. Equipo para equivalente de arena.....	87
Fotografía 27. Solución floculante h=4"(a); muestra dentro de la probeta (b)	88
Fotografía 28. Dispositivo de sifonado (a); muestra en sedimentación (b)	89
Fotografía 29. Lectura de arcilla suspendida (a); lectura de arena (b).....	89
Fotografía 30. Baño de agua 25°C (a); peso del picnómetro más tapón (b); peso del picnómetro más tapón y más agua (c).....	92
Fotografía 31. Asfalto aproximadamente a 1/3 de capacidad del picnómetro.....	92
Fotografía 32. Muestra en baño de agua 25°C (a); Picnómetro más muestra y agua (b).....	93
Fotografía 33. Muestras calientes de asfalto (a); muestras en baño de agua (b), control de temperatura hasta lograr 25°C±1°C (c).....	94

Fotografía 34. Penetrómetro listo para el ensayo (a); Muestra a ensayar (b)	95
Fotografía 35. Equipo punto de ablandamiento	97
Fotografía 36. Muestra preparada, anillos con asfalto	98
Fotografía 37. Sistema completo colocado dentro del agua con hielo.....	98
Fotografía 38. Control de temperatura hasta llegar a $5^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$	98
Fotografía 39. Primera esfera en el fondo (a); segunda esfera en el fondo (b)	99
Fotografía 40. Partículas de elastómero PNo.10-RNo.40	101
Fotografía 41. Extracción de aire de la muestra (a); peso del picnómetro, agua y muestra (b).....	102
Fotografía 42. Muestra de partículas de elastómero a ensayar (a); muestra en el horno a $150^{\circ} C$ (b); partículas adheridas entre sí luego del período en el horno (c).	103
Fotografía 43. Escarcha de RPET P No.10-R No.40	104
Fotografía 44. Extracción de aire de la muestra (a); peso del picnómetro, agua y muestra (b).....	105
Fotografía 45. Muestra de escarcha de RPET a ensayar (a); muestra en el horno a $150^{\circ} C$ (b); escarcha luego del período en el horno (c)	106
Fotografía 46. Mezcla de agregados, 5 muestras	113
Fotografía 47. Vertiendo el asfalto a la mezcla de agregados.....	114
Fotografía 48. Control de temperatura en la mezcla (a); partículas totalmente cubiertas de asfalto (b).....	114
Fotografía 49. Golpes del palustre contra la mezcla en el molde	115
Fotografía 50. Briquetas compactadas en período de enfriamiento	115
Fotografía 51. Extractor de muestras (a); briquetas fuera del molde (b)	117
Fotografía 52. Lectura del peso sumergido – agua a $25^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$	117
Fotografía 53. Se retira el agua superficial de la briqueta.....	118
Fotografía 54. Posición firme del deformímetro.....	120
Fotografía 55. Agua destilada a $25^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$	122
Fotografía 56. Calibración del frasco volumétrico (a); inclusión de aire (b); sin inclusión de aire (c)	122
Fotografía 57. Briqueta disgregada a mano (a);.....	123
Fotografía 58. Peso de la muestra seca	123
Fotografía 59. Extracción de aire de la muestra cubierta de agua (a); conjunto agitado para acelerar la expulsión de aire (b).....	124
Fotografía 60. Peso del frasco, muestra, placa de vidrio y agua $25^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$ (a); inclusión de aire (b); sin inclusión de aire (c)	124
Fotografía 61. Partículas de elastómero P N°10 - R N°40	131
Fotografía 62. Muestras con diferentes porcentajes de elastómero	132
Fotografía 63. Agregados combinados con elastómero	132
Fotografía 64. Briquetas de la mezcla modificada con elastómero	133
Fotografía 65. Partículas de material posterior a la disgregación de las briquetas ..	133
Fotografía 66. 50% elastómero y 50% RPET	134

Fotografía 67. Muestras con diferentes porcentajes de material 50E-50P.....	135
Fotografía 68. Tres diferentes tipos de mezclas.....	136
Fotografía 69. Baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$	137
Fotografía 70. Baño de agua a 0°C	137

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Normas ASTM utilizadas en el presente proyecto	15
Cuadro 2. Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento.....	23
Cuadro 3. Causas y efectos de la poca durabilidad del pavimento	24
Cuadro 4. Causas y efectos de la permeabilidad en el pavimento	24
Cuadro 5. Causas y efectos en la trabajabilidad de la mezcla asfáltica	26
Cuadro 6. Causas y efectos de la baja resistencia a la fatiga	27
Cuadro 7. Causas y efectos de la baja resistencia al deslizamiento	28
Cuadro 8. Densidades de plásticos granulados	56
Cuadro 9. Materiales disponibles en el mercado por tipo de plástico.....	57
Cuadro 10. Propiedades del PET en la modificación de mezclas asfálticas	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Determinación del tamaño máximo nominal del agregado	68
Tabla 2. Límites granulométricos, NEVI-12.....	68
Tabla 3. Cantidad inicial de muestra según el t.m.n para agregados gruesos	70
Tabla 4. Resultados de granulometría, agregado fino y grueso	71
Tabla 5. Cantidad de muestra para gravedad específica, agregado grueso	73
Tabla 6. Gravedades específicas y absorción, P 3/4" - R1/2"	75
Tabla 7. Gravedades específicas y absorción, P1/2" - R3/8"	76
Tabla 8. Gravedades específicas y absorción, P3/8" - RNo.4.....	76
Tabla 9. Gravedades específicas y absorción, PNo.4- RNo.10.....	79
Tabla 10. Gravedades específicas y absorción, PNo.10- RNo.40.....	80
Tabla 11. Gravedades específicas y absorción, PNo.40- RNo.80.....	80
Tabla 12. Gravedades específicas y absorción, PNo.80- RNo.200.....	81
Tabla 13. Gravedad específica aparente del polvo mineral	83
Tabla 14. Gradación de las muestras de ensayo, resistencia a la abrasión.....	84
Tabla 15. Especificaciones para la carga abrasiva	84
Tabla 16. Resultado del ensayo de resistencia a la abrasión	86
Tabla 17. Resultados de equivalente de arena	90
Tabla 18. Resultado del peso específico del asfalto.....	93
Tabla 19. Resultados de ensayo de penetración.....	96
Tabla 20. Valores de ensayos para un asfalto de grado de viscosidad 60°C.....	96
Tabla 21. Resultado del ensayo-punto de ablandamiento.....	99
Tabla 22. Gravedad específica de las partículas de elastómero	102
Tabla 23. Gravedad específica de la escarcha de RPET	105
Tabla 24. Estabilización granulométrica.....	107
Tabla 25. Resultados de la granulometría estabilizada de la mezcla de agregados	108
Tabla 26. Porcentajes reales de mezcla.....	109
Tabla 27. Tamaño de la muestra de ensayo	121
Tabla 28. Porcentajes de cada tamaño de agregado que intervienen en la mezcla.....	126
Tabla 29. Gravedades específicas Bulk de cada tamaño de agregado	126
Tabla 30. Gravedades específicas aparentes de cada tamaño de agregado.....	127
Tabla 31. Porcentajes de material modificador.....	131
Tabla 32. Porcentajes de material 50E-50P	134
Tabla 33. Factores de corrección para la Estabilidad.....	138
Tabla 34. Propiedades de una mezcla asfáltica compactada - mezcla patrón.....	139
Tabla 35. Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla patrón	140
Tabla 36. Condición de aceptación en base a densidades específicas	141
Tabla 37. Resumen de datos.....	141

Tabla 38. Resumen de resultados – mezcla patrón	144
Tabla 39. Fórmula maestra con relación a la mezcla de agregados y a la mezcla total.....	144
Tabla 40. Propiedades de una mezcla asfáltica compactada – mezcla modificada con elastómero.....	145
Tabla 41. Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla modificada con elastómero.....	146
Tabla 42. Condición de aceptación en base a densidades específicas	146
Tabla 43. Resumen de datos.....	147
Tabla 44. Resumen de resultados – mezcla modificada con elastómero	149
Tabla 45. Propiedades de la mezcla asfáltica compactada- mezcla modificada con material 50E-50P	150
Tabla 46. Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla modificada con material 50E-50P	151
Tabla 47. Condición de aceptación en base a las gravedades específicas	151
Tabla 48. Resumen de datos.....	152
Tabla 49. Resumen de resultados – mezcla modificada con material 50E-50P.....	154
Tabla 50. Propiedades de la mezcla patrón.....	155
Tabla 51. Propiedades de los tres tipos de mezclas asfálticas.....	162
Tabla 52. Propiedades de mezclas asfálticas compactadas- choque térmico.....	166
Tabla 53. Datos de estabilidad y flujo antes y después del choque térmico	167
Tabla 54. Resultados finales, mezcla modificada con elastómero respecto a la mezcla modificada con 50E-50P	168

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva granulométrica fuera de rango	72
Gráfico 2. Curva granulométrica estabilizada.....	108
Gráfico 3. Curva granulométrica real utilizada.....	109
Gráfico 4. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón	142
Gráfico 5. Porcentaje de asfalto (%) vs Relación f/a - mezcla patrón	143
Gráfico 6. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – modificada con elastómero ..	148
Gráfico 7. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – modificada con material 50E-50P.....	153
Gráfico 8. Variación de vacíos.....	155
Gráfico 9. Variación porcentual de vacíos.....	156
Gráfico 10. Variación de Densidad Bulk	156
Gráfico 11. Variación porcentual de densidad Bulk	157
Gráfico 12. Variación de Estabilidad	157
Gráfico 13. Variación porcentual de Estabilidad	158
Gráfico 14. Variación de Flujo.....	158
Gráfico 15. Variación porcentual de Flujo.....	159
Gráfico 16. Variación de VAM.....	159
Gráfico 17. Variación porcentual de VAM.....	160
Gráfico 18. Variación de VAF	160
Gráfico 19. Variación porcentual de VAF	161
Gráfico 20. Variación de volúmenes.....	161
Gráfico 21. Variación porcentual de volúmenes.....	162
Gráfico 22. Variación de Densidad Bulk	163
Gráfico 23. Variación de Estabilidad	163
Gráfico 24. Variación de Flujo.....	163
Gráfico 25. Variación de Vacíos.....	164
Gráfico 26. Variación de VAM.....	164
Gráfico 27. Variación de VAF	165
Gráfico 28. Variación de Estabilidad (lb) antes y después del choque térmico.....	167
Gráfico 29. Variación de Flujo (0,01") antes y después del choque térmico.....	168

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aislante en paredes a base de residuos de neumáticos	10
Figura 2. Estructura de un pavimento flexible	16
Figura 3. Parámetros de diseño volumétrico.....	34
Figura 4. Volúmenes en un espécimen de mezcla asfáltica compactada.....	36
Figura 5. Relación esfuerzo - deformación del caucho natural y vulcanizado	43
Figura 6. Disposición de neumáticos fuera de uso en Ecuador.....	47
Figura 7. Proceso de trituración mecánica	48
Figura 8. Clasificación de los plásticos según la disposición de las macromoléculas	54
Figura 9. Codificación de plásticos en el Sistema Internacional	56
Figura 10. Proceso de reciclaje mecánico convencional.....	61
Figura 11. Granulometría para diseño de mezcla asfáltica	110

RESUMEN

El objetivo principal de la investigación es analizar y comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con relación a una mezcla asfáltica normal, los materiales modificadores utilizados son de origen plástico como el elastómero (caucho) proveniente de neumáticos fuera de uso y tereftalato de polietileno (PET) proveniente de botellas de plástico recicladas con el fin de crear una alternativa de aplicación de estos materiales que generan contaminación al ambiente puesto que su biodegradación se produce a los 500 años. La granulometría utilizada corresponde a la Mezcla Asfáltica Normal MAC-2 determinada por la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 para un material pétreo de tamaño máximo nominal $\frac{3}{4}$ ". El trabajo realizado en laboratorio consta de caracterización de los materiales a utilizarse como el agregado, cemento asfáltico, elastómero y PET, posteriormente se realiza la elaboración y ensayo de estabilidad y flujo de briquetas mediante el Método Marshall, inicialmente para determinar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla patrón y luego la aplicación de materiales modificadores en porcentajes variables, con lo que se determina el porcentaje óptimo elastómero y el porcentaje óptimo de la combinación 50% de elastómero y 50% de PET. Finalmente se analiza el comportamiento de las mezclas diseñadas al ser sometidas a cambios bruscos de temperatura en un ensayo de choque térmico.

PALABRAS CLAVE: MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS, ELASTÓMERO, TEREFTALATO DE POLIETILENO, ESTABILIDAD Y FLUJO, CHOQUE TÉRMICO.

ABSTRACT

The main objective of the research is to analyze and compare the performance of the asphalt mixtures modified with related to a normal asphalt modifiers, plastic materials source and elastomer (rubber) from used tires and polyethylene terephthalate (PET) from recycled plastic bottles in order to create an alternative application of these materials that cause pollution to the environment since their biodegradation occurs within 500 years. The grain used corresponds to the Normal Mix Asphalt MAC-2 determined by the Standard Vial Ecuadorian NEVI-12 for a stone material of nominal maximum size $\frac{3}{4}$ ". The laboratory work consists of characterization of materials for use as aggregate, asphalt cement, PET, elastomer and subsequently the development and testing of stability and flow of briquettes by Marshall Method is performed initially to determine the optimum asphalt of the standard mixture and then the application of modifier materials in varying percentages, so that the elastomer optimum percentage and the combination 50% elastomer and 50% PET optimum percentage determined, finally behavior analyzing mixtures designed to be subjected to sudden changes in temperature in a thermal shock test.

KEYWORDS: MODIFIED ASPHALT MIXTURES, ELASTOMER, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE, STABILITY AND FLOW, THERMAL SHOCK.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES

1.1. Introducción

El desarrollo y avance de un País se manifiesta por la infraestructura vial que posee y es lo que Ecuador ha logrado en los últimos 5 años, de manera que la tecnología para acrecentar la vida útil de las vías avanza constantemente. Desde hace algunos años en nuestro país se ha implementado asfaltos modificados con polímeros que de manera general no son ecológicos y no contribuyen a la mitigación de la contaminación, por tal motivo este proyecto pretende sustituir la utilización de dichos polímeros con materiales reciclados, tratando de mantener y mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a menor costo.

Estamos en un período en el que uno de los objetivos principales es reducir la contaminación del medio ambiente y cada vez aumentan los proyectos de reciclaje, tratamiento y reutilización de desechos. Para este proyecto se analizan dos de los desechos más peligrosos no biodegradables como son el caucho de llanta y el plástico reciclado RPET. Según datos del Ministerio del Ambiente Ecuador (MAE), las llantas son uno de los principales componentes de la basura.

Existe millones de neumáticos que se encuentran olvidados en los botaderos a nivel nacional (Ministerio del Ambiente, 2013), en general el Ecuador desecha anualmente millones de neumáticos, un porcentaje de ellos son reutilizados para el reencauchado, pero la gran mayoría es incinerada o depositada en basureros al aire libre, lo que representa una amenaza contra el ambiente ya que produce emisiones de

gases que contienen partículas nocivas para el entorno y el almacenamiento de neumáticos fuera de uso incrementa la proliferación de roedores e insectos.

Uno de los procesos más seguros y no contaminantes para la reutilización del caucho de llanta reciclado es la trituración mecánica que permite obtener un nuevo material como materia prima, por ser un proceso puramente mecánico los productos resultantes son de alta calidad, limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. Otro de los desechos con un índice de contaminación crítica es el plástico, anualmente, en el mundo se producen cerca de 60.000 millones de toneladas de plástico (Jaime Plaza. Coord. de Sociedad, 2009), en especial envases, fundas y envolturas, según la Empresa Ambientalista Internacional Greenpeace, únicamente se recicla el 20% el resto del material se convierte en contaminación visual y ambiental de las ciudades, ríos y playas. El plástico en general se demora de 100 a 500 años en descomponerse (Noticias de Internet, 2012), no beneficia en los rellenos sanitarios puesto que su tamaño no permite el drenaje correcto y aporta a la emisión de lixiviados.

Los productos a base de Tereftalato de Polietileno PET, son varios y se utilizan para envasar agua, refrescos, hidratantes, entre otros. La generación de estos desechos se ha vuelto imparable; de las 1 500 toneladas de basura que se generan a diario en Quito, el 14% es plástico; si bien no hay un registro exacto nacional, se conoce que aproximadamente un 40% del total de basura corresponde a plásticos (Jaime Plaza. Coord. de Sociedad, 2009).

“La empresa recicladora más grande del País Recypet Continental recibe cerca de 1.4 millones de botellas diariamente para procesarlas” (Recypet, s.f) , hasta tener

como resultado la escarcha de tereftalato de polietileno reciclado RPET que sirve de materia prima para varias aplicaciones industriales que se asocian cada vez más al cuidado del medio ambiente por lo que muchos de los nuevos proyectos, experimentos a nivel mundial se basan en la utilización de material reciclado, no sólo en mezclas asfálticas, sino también en la estructura misma del pavimento flexible, o en elementos de construcción en donde el plástico y el caucho son la principal materia prima para que los proyectos funcionen correctamente, debido a sus propiedades.

1.2. Estado del arte

Dentro del ambiente tecnológico industrial de las mezclas asfálticas en Ingeniería Civil y con lo que corresponde al presente proyecto de grado, se analiza el “estado del arte” o “estado de la técnica” que hace referencia a todos aquellos desarrollos de última tecnología realizados con los materiales modificadores de mezclas asfálticas como lo son el tereftalato de polietileno PET y el elastómero reciclados, que han sido probados en la industria y acogidos por los fabricantes, dentro y fuera del Ecuador.

La utilización de los materiales modificadores en la Industria se expone a continuación.

1.2.1. Proyectos de aplicación del tereftalato de polietileno reciclado RPET

a) Plastisoil

Como primera aplicación se describe al novedoso asfalto Plastisoil, está fabricado con botellas de plástico (tereftalato de polietileno PET) pulverizadas mezclado con tierra. Es fruto de la investigación de Naji Khouri, profesor asistente

de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Temple, en Filadelfia (Estados Unidos). Una vez que las botellas de plástico son trituradas y mezcladas con tierra, se calientan hasta formar una sustancia dura similar al cemento, pero más permeable y porosa, lo que facilita la absorción del agua, aceite y suciedad, esto produce mayor adherencia y por tanto aumenta la seguridad de los vehículos al circular por las carreteras. Con el Plastisoil también se puede pavimentar aceras, caminos, aparcamientos, carriles para bicicleta entre otros. “Khouri asegura que por cada tonelada de Plastisoil producida hacen falta 30.000 botellas de plástico, lo que supone una importante cantidad. Además, se requiere consumir menos energía para producir una tonelada de este producto de plástico reciclado que para una tonelada de cemento o asfalto y resulta más barato” (Amarillo, 2012).



Fotografía 1. Modelo de muestra Plastisoil expuesta en laboratorio

Fuente. (Coxworth, 2010)

b) Ladrillos a base de plástico reciclado

Una segunda aplicación son los ladrillos de plástico reciclado. El proceso de producción de este tipo de ladrillos resulta muy sencillo e incluso puede llevarse a cabo por manos poco experimentadas. Se necesita como materia prima, los envases de plástico de polietileno, cemento portland, agua y aditivos para la mezcla. Las herramientas que se necesitan para llevar a cabo este proceso son una trituradora y una hormigonera.



Fotografía 2. Ladrillos de plástico terminados

Fuente. (Equipo editorial de construcción.vilssa, 2013)

Los ladrillos de plástico reciclado pueden ser usados para la autoconstrucción, en promociones realizadas por los propios dueños de las viviendas en casos concretos. Una vez triturado los plásticos, se realizará una mezcla con agua y cemento. “Dependiendo de las dosificaciones se obtendrán productos con mejores comportamientos aislantes, distintas resistencias, etcétera.

Una vez obtenida la mezcla se procederá a su moldeo y posterior curado durante siete días. Las piezas de ladrillo de plástico reciclado alcanzan su resistencia de uso al cabo de los 28 días desde su creación, momento en que podrán ser colocadas en obra” (Equipo editorial de construcción.vilssa, 2013).

Los cerramientos o paredes realizadas a partir de ladrillos de plástico reciclado llevan un recubrimiento de mortero para evitar su deterioro a la intemperie. En el año 2005 la asociación de vivienda económica, construyó un prototipo de 12 m² cuyas habitaciones fueron realizadas a partir de mampostería de 15 cm de espesor de ladrillos de plástico reciclado (Equipo editorial de construcción.vilssa, 2013).

c) Mezcla asfáltica adicionando tereftalato de polietileno PET

Como tercer aplicación se tiene un diseño de un pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico AC-

20, es un Proyecto de Grado realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Carrera de Ingeniería Civil, por los Señores estudiantes Juan Daniel Cazar Ruiz y Guillermo Javier Huertas Cadena, en este diseño se añadió el material triturado de botellas de plástico utilizadas en bebidas carbonatadas y agua (PET) que mejora las condiciones y características de un pavimento flexible elaborado de forma tradicional, representa una metodología novedosa y una solución que podría reemplazar en un futuro el uso de pavimentos mejorados con polímeros.

Este estudio se desarrolla con tres diferentes formas de material reciclado PET:

- a. Fibra, con una dimensión no menor a 3mm de ancho y una longitud aproximadamente de 5 a 8cm.
- b. Partícula gruesa, retenida en el tamiz No.4 o pasante del tamiz No. 3/8”.
- c. Partícula fina, pasante del tamiz No.10 o retenida en el tamiz No.40.



Fotografía 3. Formas de material reciclado PET

Fuente. (Cazar Daniel. Huertas Javier, 2014)

Luego de un análisis de resultados, se concluye que la mezcla asfáltica en caliente adicionando partícula fina de PET reciclado es la mejor de los tres tipos de material, mejorando así la estabilidad y flujo, en comparación a una mezcla asfáltica tradicional (Cazar Daniel. Huertas Javier, 2014).

1.2.2. Proyecto de aplicación del elastómero triturado

a) Adoquines fabricados con caucho de llantas recicladas

Julio Pérez fundó la primera firma mexicana dedicada a la fabricación de pequeños adoquines a base de caucho de llantas recicladas. Se trata de ‘Genbrugger’, un claro ejemplo de lo rentable que puede resultar esta novedosa práctica. A tan solo 11 meses de haber lanzado su innovador producto, la compañía logró facturar 250 mil dólares y exportar a países como Colombia y Guatemala. “Es un mercado virgen y de mucha oportunidad en varias partes del mundo” (Expreso, 2011).



Fotografía 4. Adoquines fabricados con caucho de llantas recicladas

Fuente. (Expreso, 2011)

Argentina, Chile, Costa Rica y España también han aplicado la fórmula con éxito, así en Ecuador 3 jóvenes ecuatorianos de la Escuela de Postgrado en Administración de Empresas (ESPAE) de la ESPOL desarrollaron una propuesta similar pero acorde al mercado local. Además, este proyecto representa un beneficio para el sector de la construcción, sobretodo para la edificación de ciudadelas y urbanizaciones. Es por las características que tiene el adoquín, a diferencia del de arcilla o el de hormigón, este es más flexible, ayuda para que las pisadas de las personas sean más suaves, es antiruido y antideslizante. Se le puede dar el color que uno quiera y su costo es similar al del adoquín convencional.

b) Lámina impermeabilizante de caucho reciclado

En el mercado español la empresa SOCYR comercializa la manta de caucho reciclado llamada SOCYTEC Top. Es una lámina de caucho para protección estructural de membranas impermeabilizantes de alta calidad y sistemas aislantes. SOCYTEC top proporciona protección de sistemas impermeabilizantes en cubiertas de edificios, terrazas, puentes y vías.



Fotografía 5. Detalle de lámina de caucho reciclado

Fuente. (Equipo de redacción de terra.org, 2011)

Esta lámina se coloca sobre una capa de EPDM, es un termopolímero elastómero que tiene buena resistencia a la abrasión y al desgaste. Tiene propiedades de aislamiento eléctrico, resistencia a los agentes atmosféricos y a los productos químicos en general.

Es una lámina de fácil colocación sobre cualquier superficie que se desee impermeabilizar. Es uno de los productos de la empresa española Zicla puntera en el desarrollo de productos reciclados y valorización de residuos que trabajan para crear productos innovadores, ambientalmente correctos y diferenciados de la competencia y, naturalmente, comercialmente viables, no sólo por la durabilidad de la intervención sino también por la minimización de residuos de construcción en obras

de rehabilitación de terrazas es la opción más ecológica, económica e inteligente (Equipo de redacción de terra.org, 2011).



Fotografía 6. Impermeabilización de terraza con membrana EPDM

Fuente. (Equipo de redacción de terra.org, 2011)

c) Aislante para viviendas a partir de residuos de neumáticos

En Madrid la investigación de un nuevo material aislante para viviendas que absorbe el ruido y las vibraciones ha sido desarrollada a partir de residuos de neumáticos de automóviles y camiones por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). El producto está especialmente dirigido al sector de la construcción, como material para el aislamiento acústico y vibracional de paredes, suelos y techos, y está compuesto por partículas de caucho, fibras metálicas y fibras textiles (Comunitat Valenciana, 2012).

El proceso parte de la recogida del neumático, para ser triturado por las empresas colaboradoras antes de extraer las partículas de caucho de distinto tamaño y forma, así como las diferentes fibras; la metálica se separa con electroimanes y la textil por corriente de aire. Este producto puede competir como absorbente acústico con los productos del mercado, como la fibra de vidrio y poliestireno expandido.

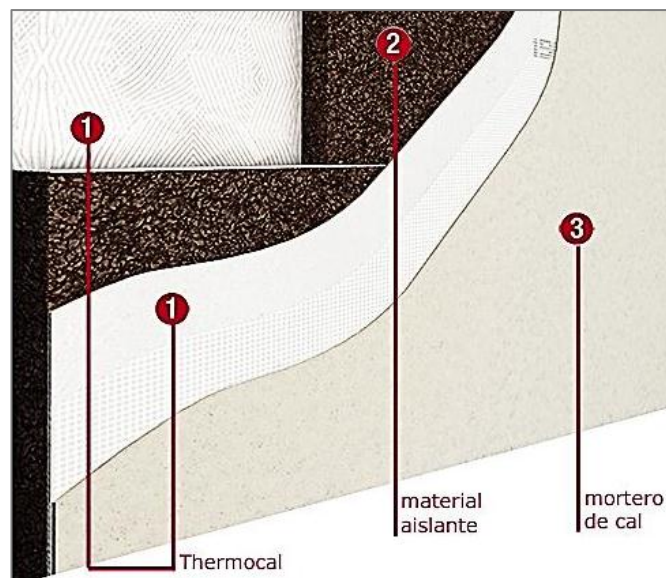


Figura 1. Aislante en paredes a base de residuos de neumáticos

Fuente. (Grupo Ibercal, s.f)

1.3. Área de influencia

Todos los involucrados en el área de pavimentos en Ingeniería Civil se ven beneficiados con este proyecto, puesto que al incorporar material reciclado de buenas características reducen costos y energía en la elaboración de mezclas asfálticas. La utilización de plásticos reciclados aumentan la vida útil de las mezclas asfálticas, esto beneficia de forma directa a los usuarios de las vías y de forma indirecta a todos los habitantes de una ciudad, puesto que se mitiga el impacto ambiental al procesar los desechos no biodegradables.

1.4. Objetivos del Proyecto

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una mezcla asfáltica como alternativa para la utilización de residuos reciclados de elastómero procedente de neumáticos y de tereftalato de polietileno

(PET) proveniente de botellas de plástico, en mezclas asfálticas en caliente para tráfico pesado, estudiando las características de resistencia y deformación de cada mezcla e identificando la mejor combinación entre, hormigón asfáltico + elastómero y hormigón asfáltico + RPET + elastómero, que contribuya a resolver las fallas en la carpeta asfáltica a menor costo.

1.4.2. Objetivos específicos

Primero diseñar una mezcla asfáltica tradicional en caliente empleando el método Marshall, segundo adicionando elastómero a dicha mezcla y tercero adicionando una combinación de elastómero (caucho) y RPET (plástico).

Analizar y comparar resultados entre los tipos de mezclas asfálticas: mezcla tradicional, mezcla modificada con RPET, mezcla modificada con elastómero y la mezcla modificada con una combinación de elastómero y RPET.

1.5. Justificación e importancia

En la actualidad uno de los problemas con mayor incidencia en el deterioro de la capa de rodadura, es la presencia de fisuras, cuando los esfuerzos o deformaciones exceden ciertos valores de fatiga, ocasionado, entre otras causas, por el endurecimiento del asfalto el cual incrementa la rigidez de la superficie asfáltica y aumenta su fragilidad, esto produce fisurar bajo esfuerzos por tensión ocasionados por el tránsito; estas fracturas en el pavimento constituyen el inicio del deterioro de la carpeta asfáltica, dando lugar a las fisuras que permiten la filtración de aguas superficiales, la cual provoca deformaciones de la estructura del pavimento flexible. Estas fallas en el pavimento se tornan molestosas para el usuario y generan pérdida de tiempo, accidentes, daños vehiculares y descontento de los usuarios al momento

de circular por las vías o caminos afectados, de tal manera que se requerirá a corto o largo plazo la rehabilitación de dichas vías generando así más inversión económica y molestias en los usuarios. Tener la idea de un buen proyecto desde el inicio genera optimización de tiempo, recursos, inversión económica, y la puerta abierta hacia nuevas oportunidades de aplicación, más vías en más ciudades, con la satisfacción de los ciudadanos, no sólo conductores, sino también peatones.

Con este proyecto se trata de generar una nueva alternativa para la elaboración de mezclas asfálticas mejoradas con polímeros patentados actualmente y comercializados en el país, estos modifican directamente las mezclas en su composición dándoles mayor resistencia, entre otras características, la desventaja de estos productos es su alto precio, lo que no sucede en este proyecto de investigación, ya que se adiciona materiales reciclados: elastómero y RPET, estos materiales se encuentran en grandes cantidades en rellenos sanitarios y pueden ser procesados y utilizados.

Sobre todo la importancia de este proyecto se debe a que todo el volumen de desperdicios de neumáticos y plásticos pueden tener una aplicación en grandes proyectos para incorporar la mayor cantidad posible en proyectos civiles para mitigar el impacto ambiental, todos los días se generan toneladas de desperdicio, en nuestro País se necesita más empresas capaces de procesar estos materiales no biodegradables. En el área civil, el campo vial es el más amplio para la aplicación de materiales no biodegradables.

Este proyecto está direccionado al séptimo objetivo del Programa de Gobierno 2013-2017 Buen Vivir, el cual es: “Garantizar los derechos de la naturaleza y

promover la sostenibilidad ambiental, territorial y global” en el apartado Revolución Ecológica, apuesta por la transformación productiva bajo un modelo ecoeficiente con mayor valor económico, social y ambiental (Programa de Gobierno 2013-2017, 2013).

En este sentido, se plantean como prioridades la conservación y el uso sostenible del patrimonio natural y sus recursos naturales, la inserción de tecnologías ambientalmente limpias, la aplicación de la eficiencia energética y una mayor participación de energías renovables, así como la prevención, el control y la mitigación de la contaminación y la producción, el consumo y el pos consumo sustentables (Programa de Gobierno 2013-2017, 2013).

1.6. Metodología

Para el presente proyecto de grado se utilizará el método analítico- práctico que consiste en descomponer el objeto de estudio en cada una de las partes que lo componen.

La metodología inicia con la caracterización de los materiales, para luego continuar con el diseño y estudio de las propiedades estáticas; estabilidad y deformación (flujo) de las mezclas asfálticas en caliente modificadas.

En la metodología de trabajo se consideran los siguientes procesos:

- 1.- Determinar las características y propiedades de los agregados mediante los ensayos: granulometría, equivalente de arena, abrasión, peso específico y porcentaje de absorción, aplicando las respectivas normas ASTM.

2.- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos: penetración, punto de ablandamiento y peso específico, aplicando las respectivas normas ASTM.

3.- Determinar el peso específico y reacción a la temperatura del elastómero y del tereftalato de polietileno.

4.- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente convencional sin adición de materiales modificadores mediante el Método Marshall, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto.

5.- Diseñar una mezcla asfáltica modificada con elastómero reciclado y con la combinación del 50% de elastómero y 50% de tereftalato de polietileno reciclado RPET, determinar el porcentaje óptimo de material modificador, mediante el Método Marshall.

6.- Analizar los resultados en los ensayos realizados en cada una de las mezclas asfálticas, y comparar las propiedades estáticas y volumétricas entre la mezcla tradicional y las mezclas modificadas.

7.- Realizar el ensayo de choque térmico de las tres mezclas realizadas: convencional, modificada con elastómero y modificada con la combinación 50% elastómero y 50% tereftalato de polietileno y realizar el respectivo análisis comparativo.

Las Normas ASTM utilizadas en el siguiente proyecto de grado son las siguientes:

Cuadro 1.

Normas ASTM utilizadas en el presente proyecto

Ensayo	Norma ASTM
<i>Caracterización de los agregados</i>	
Muestreo de áridos	D 75
Reducción de muestras a tamaños de ensayo	C 702
Granulometría de agregados finos y gruesos	C 136-06
Gravedad específica y absorción para agregado fino	C 128-12
Gravedad específica y absorción para agregado grueso	C 127-12
Resistencia a la abrasión del árido grueso	C 131
Equivalente de arena al tráfico pesado	D 2419
<i>Caracterización del ligante asfáltico</i>	
Muestreo de ligante asfáltico	D140
Punto de ablandamiento del asfalto	D 36
Penetración	D 5
Peso específico	D 70
<i>Especímenes Marshall</i>	
Elaboración de especímenes	D 6926
Densidad Bulk	D 2726
Estabilidad y fluencia Marshall	D 6927
Gravedad específica teórica máxima	D 2041

Adicionalmente se realiza el ensayo de Choque – Térmico, el cual consiste en someter a las mezclas asfálticas, resultantes del diseño, a cambios bruscos de temperatura.

CAPÍTULO 2

2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Introducción

Una mezcla asfáltica tradicional es la combinación de ligante asfáltico y agregados minerales pétreos en proporciones exactas de diseño que se emplean generalmente en la capa superior de la estructura del pavimento flexible llamada carpeta asfáltica, la cual se coloca sobre la capa base de un pavimento (Figura 2), sin olvidar que la mezcla asfáltica se utiliza también en las capas inferiores del pavimento para tráficos pesados intensos, es así que se usan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros.

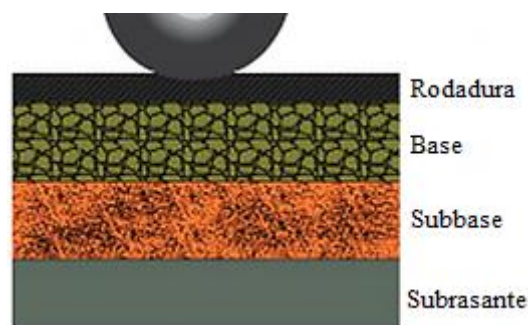


Figura 2. Estructura de un pavimento flexible

Fuente. (Reyes Lizcano Freddy, 2011)

Una mezcla asfáltica está compuesta aproximadamente por el 90 % de agregados pétreos, entre grueso y fino, 5% de polvo mineral (filler-pasante del tamiz No. 200) y 5% de cemento asfáltico. La calidad de estos componentes, determinada mediante ensayos de caracterización, determina un buen comportamiento del pavimento.

El ligante asfáltico y el polvo mineral son los elementos de mayor influencia en la calidad de la mezcla asfáltica y en su costo total, por lo que el diseño debe ser técnica y económicamente viable. El diseño de la mezcla asfáltica debe garantizar el

tiempo de vida útil, determinada por la resistencia a las cargas de tránsito y la resistencia al desprendimiento de la película de asfalto en el agregado, producido por efectos de aguas superficiales, abrasión del tránsito, agentes ambientales y químicos.

En la mayoría de los casos, las fisuras expuestas en la capa de rodadura no sólo se originan por la falta de calidad de la mezcla asfáltica, sino de la capacidad de la subrasante para soportar las cargas de tránsito que se transmiten por las capas del pavimento que están sobre esta, así como lo expone la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 “La vida útil del pavimento depende en gran proporción del estado y situación del material de la subrasante, el mismo que antes de la ejecución de la estructura debe estar en condiciones de soporte óptimos” (NEVI-12, 2013).

El diseño de la mezcla asfáltica empieza con el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto, éste elemento debe formar una membrana alrededor de las partículas del material pétreo, de un espesor suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie y a su vez no debe ser muy gruesa, puesto que resulta un diseño antieconómico y la superficie de rodadura se vuelve resbaladiza por el exceso de asfalto.

2.2. Propiedades

En el diseño de una mezcla asfáltica es muy importante la selección y dosificación de los materiales que la componen, de esta manera se garantiza un buen comportamiento de la mezcla para que mantenga las propiedades requeridas antes y después de su construcción. El comportamiento de la mezcla también depende de circunstancias externas a ella, como la temperatura de mezclado, el tiempo de aplicación de la carga.

2.2.1. Propiedades de una mezcla asfáltica como capa superior del pavimento.

La funcionalidad de la carpeta asfáltica depende fundamentalmente del acabado de su superficie (textura y regularidad) y de la calidad de los materiales que la componen. Debe generar seguridad en el usuario brindando una adecuada adherencia del neumático a la carpeta, disminución del ruido en el exterior e interior del vehículo, comodidad y estabilidad al circular por la vía, el mínimo desgaste de los neumáticos, una fácil circulación de agua lluvia, resistencia a la rodadura y el cumplimiento de las propiedades ópticas.

Una mezcla asfáltica tratada como material estructural, se caracteriza por sus propiedades, como la cohesión y el rozamiento interno o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación, se consideran también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas; todas ellas se resumen en las siguientes propiedades:

- Estabilidad
- Deformación (flujo)
- Durabilidad
- Resistencia a la fatiga

En seguridad:

- Resistencia al deslizamiento
- Regularidad transversal
- Visibilidad (marcas viales)
- Color

En comodidad:

- Regularidad longitudinal
- Regularidad transversal
- Visibilidad
- Sonoridad

En durabilidad:

- Capacidad de soporte
- Permeabilidad adecuada
- Resistencia a la desintegración superficial

En Medio Ambiente:

- Ruido
- Capacidad de ser reciclado

Considerando el amplio análisis de las mezclas asfálticas es necesario aclarar que en el presente proyecto se realiza un análisis netamente estático, es decir el estudio de la estabilidad y deformación (flujo) en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Para evitar las molestias al momento de transitar por una vía se debe diseñar una mezcla capaz de combinar los beneficios físico-mecánicos con los económicos, con una adecuada gradación de agregados y contenido de asfalto, la gradación del material pétreo debe estar dentro de los límites de las especificaciones de trabajo.

Para el presente proyecto las especificaciones con las que se desarrolla este trabajo son las correspondientes a la Mezcla Asfáltica Normal MAC-2.

Se identifica 6 objetivos fundamentales de las mezclas asfálticas (Instituto del Asfalto, 1997):

- Suficiente contenido de asfalto para asegurar una mezcla durable.
- Suficiente estabilidad de la mezcla para satisfacer las demandas del tráfico, sin provocar la distorsión ni el desplazamiento.
- Una cantidad de vacíos de aire en la mezcla compactada suficientemente alta para permitir una leve compactación adicional producida por la carga del tráfico, sin perder estabilidad.
- Un máximo contenido de vacío para limitar la permeabilidad del aire y la humedad perjudiciales en la mezcla.
- Suficiente trabajabilidad que permita la eficiente colocación de la mezcla evitando la segregación.
- Obtener una superficie de mezcla con textura apropiada de agregada para evitar deslizamientos de vehículos.

En definitiva, la carpeta asfáltica debe proporcionar un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y las características útiles o imprescindibles para el usuario.

2.2.2. Propiedades de una mezcla asfáltica como capa inferior del pavimento.

Las capas de un pavimento absorber la mayor parte de las sollicitaciones del tránsito, de manera que los esfuerzos lleguen en menor intensidad al suelo natural. Existen diseños que utilizan capas asfálticas de gran espesor formando la losa estructural del pavimento. Se debe cumplir con las siguientes propiedades técnicas:

- Conductividad hidráulica
- Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico)
 - Resistencia a la fatiga
 - Resistencia a las deformaciones plásticas permanentes
 - Módulo de rigidez
 - Resistencia a la pérdida de partículas
- Durabilidad (en relación con el clima)
 - Resistencia al lavado por el agua
 - Resistencia a la fisuración térmica
 - Resistencia a la fisuración por flexión
 - Resistencia al envejecimiento
- Trabajabilidad
 - Compactibilidad
 - Resistencia a la segregación agregado grueso/ fino
 - Resistencia a la segregación agregado/ ligante

2.2.3. Principales propiedades en el diseño de mezclas asfálticas

En el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se toma en cuenta varias propiedades que garantizan la calidad y funcionalidad de la carpeta asfáltica. Se la diseña, produce y coloca de una manera tal que conserve las propiedades y características deseadas. Entre las propiedades más importantes se tiene: estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad (fluencia- flujo), resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. A continuación se describe cada una de ellas para entender su importancia.

Estabilidad.- Determina la resistencia, de una mezcla asfáltica, a desplazamientos y deformaciones bajo las cargas repetidas de tránsito, manteniendo su forma y superficie lisas, por el contrario cuando se genera inestabilidad se producen ahuellamientos, ondulaciones y otras fallas en la mezcla.

La mezcla asfáltica debe diseñarse luego de un análisis del tránsito al que va a someterse. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para resistir el tránsito esperado, pero no más altas de estas exigencias, ya que los valores muy altos de estabilidad producen rigidez en la mezcla y se disminuye su vida útil.

La estabilidad de una mezcla depende de dos factores: 1.- la fricción interna de las partículas del agregado que la componen, en la que se toma en cuenta la angularidad y textura superficial de las partículas, 2.- la cohesión interna resultante de la capacidad del ligante presente en el asfalto. Un grado apropiado de fricción y cohesión interna, en la mezcla asfáltica, previene el desplazamiento entre las partículas de agregado ante la aplicación de carga.

En general, entre más angular (no alargada) sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, mayor es la estabilidad de la mezcla. De la misma manera la cohesión aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta. Hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con los incrementos en el contenido de asfalto, y cuando se sobrepasa este nivel, los incrementos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa alrededor de las partículas de agregado, lo cual produce una pérdida de fricción entre las partículas.

Algunas causas y efectos debidos a la inestabilidad en mezclas asfálticas son:

Cuadro 2.

Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamientos y canalización

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

Durabilidad.- Es la capacidad de resistir la desintegración del agregado y los cambios en las propiedades de asfalto como la oxidación, y desprendimiento de las películas de asfalto, producido por la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos. La durabilidad de una mezcla puede ser mejorada usando la mayor cantidad posible de asfalto (sin producir desestabilización), usando una graduación densa de agregado, en sí, se debe diseñar una mezcla asfáltica con la máxima impermeabilidad, sin producir exudación.

Así, el máximo contenido posible de asfalto llena un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciéndolo impermeable al aire y al agua. Sin embargo se deja un determinado porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en climas cálidos.

Una graduación densa de agregado aporta a la durabilidad proporcionando un contacto más cercano entre las partículas del agregado que impermeabilizan la mezcla e incrementa la resistencia a la desintegración bajo cargas producidas por el tránsito. La resistencia a la separación de las partículas pétreas en la mezcla se mejora mediante el uso de aditivos, o cal hidratada, que rellenan los espacios vacíos.

Entre las principales causas y efectos de una poca durabilidad se presentan las siguientes:

Cuadro 3.

Causas y efectos de la poca durabilidad del pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua	Las películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

Impermeabilidad.- Es la resistencia, que posee la mezcla, al paso de aire y agua hacia su interior y esta relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Todas las mezclas asfálticas poseen un cierto grado de permeabilidad que debe estar dentro los límites. Se presenta a continuación algunas de las causas y efectos asociados con la permeabilidad en mezclas asfálticas.

Cuadro 4.

Causas y efectos de la permeabilidad en el pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Las películas de asfalto causan tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire entran fácilmente en el pavimento, causa oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultan vacíos altos en el pavimento, lo que conduce a la infiltración de agua y baja estabilidad

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

Trabajabilidad.- La trabajabilidad de una mezcla se define por su facilidad para ser tendida y compactada. Puede mejorarse la trabajabilidad modificando los parámetros de diseño, tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (contienen alto contenidos de agregado grueso) tienden a segregarse durante su manejo, esto se debe controlar mediante ensayos de laboratorio, se puede adicionar agregado fino y asfalto para volverla mas trabajable; se debe tener cuidado en el diseño para garantizar que la mezcla modificada cumpla con todos los límites de aceptación, como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno mineral (filler) puede afectar la trabajabilidad, haciendo que la mezcla se vuelva muy viscosa y se dificulte su compactación. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar la mezcla a mano, como alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros sitios similares.

El asfalto es una de las principales causas de los problemas de trabajabilidad, por su grado y porcentaje, puesto que la temperatura de mezclado afecta la viscosidad el asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, y una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva demasiado fluida y viscosa. Entre las principales causas y efectos de los problemas en la trabajabilidad se presentan las siguientes.

Cuadro 5.

Causas y efectos en la trabajabilidad de la mezcla asfáltica

CAUSAS	EFFECTOS
Tamaño máximo de agregado: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

Flexibilidad.- Es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para acomodarse, sin producir grietas a causa de los asentamientos progresivos de la subrasante debido a la acción de cargas y expansión del suelo. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto. La flexibilidad debe ser analizada con mucha precaución para no afectar la estabilidad de la mezcla asfáltica. El espesor de un pavimento y la capacidad de soporte de la subrasante, determinan la vida útil del pavimento; los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, lo que no ocurre con los pavimentos de espesores pequeños o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

Resistencia a la fatiga.- Es la resistencia a la aplicación de cargas repetitivas, los factores de mayor importancia son los vacíos y la viscosidad del asfalto presentes en la mezcla; a medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, disminuye la resistencia a la fatiga, de la misma

manera, si el asfalto utilizado se ha envejecido y endurecido considerablemente se reduce la resistencia a la fatiga. Las principales causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga se exponen a continuación.

Cuadro 6.

Causas y efectos de la baja resistencia a la fatiga

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

Resistencia al deslizamiento.- Es la capacidad de una capa asfáltica de reducir el deslizamiento de las ruedas de los vehículos al hacer contacto con ésta.

Cuando la superficie esté mojada, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento; una superficie áspera y rugosa proporciona mayor resistencia al deslizamiento. Por ello los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento).

Las mezclas que presentan baja resistencia al deslizamiento son aquellas que tienden a deformarse o a exudar. Se presenta a continuación algunas de las causas y efectos de la poca resistencia al deslizamiento.

Cuadro 7.

Causas y efectos de la baja resistencia al deslizamiento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente. (Diseño de mezclas, s.f)

2.3. Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación:

2.3.1. Por diferentes fracciones de agregado pétreo

Masilla asfáltica.- Es la combinación del polvo mineral más cemento asfáltico, la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla genera resistencia y no trabajan por rozamiento interno. El contenido de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Una estructura de este tipo es sensible a los cambios de temperatura, por ello es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, controlando la calidad del polvo mineral y aditivando el cemento asfáltico.

Mortero asfáltico.- Es la combinación de agregado fino más masilla, se lo puede asociar con el mortero Slurry Seal cuya composición básica se define como mortero asfáltico, sin embargo se adiciona aditivos, emulsiones, entre otros elementos.

Concreto asfáltico.- Es la combinación de agregado grueso más mortero, es la composición de las mezclas asfálticas más utilizadas en la construcción de carreteras, formando, por lo general, la carpeta asfáltica en la estructura de un pavimento.

2.3.2. Por la proporción de vacíos de aire en la mezcla asfáltica

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

Mezclas Cerradas o Densas.- Se considera cuando la proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas.- Se considera cuando la proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.

Mezclas Abiertas.- Se considera cuando la proporción de vacíos supera el 12 %.

Mezclas Porosas o Drenantes.- Se considera cuando la proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.3.3. Por el tamaño máximo del agregado pétreo

Mezclas Gruesas.- Formadas por agregados pétreos cuyo tamaño máximo es mayor a 10 mm.

Mezclas Finas o microaglomerados.- Son morteros asfálticos, que se forman básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

El tamaño máximo de agregado pétreo es inferior a 10 mm., lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Los microaglomerados en frío, a los cuales se les suele llamar lechadas asfálticas gruesas y los microaglomerados en caliente son tratamientos superficiales (3cm de espesor) con una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo en zonas urbanas, ya que evitan se evitan problemas con las alturas de los bordillos. Existen microaglomerados con texturas rugosas

elaboradas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados usados en vías de alta velocidad de circulación.

2.3.4. Por la estructura del agregado pétreo

Mezclas con esqueleto mineral.- Poseen un esqueleto mineral que proporciona una resistencia debida al rozamiento interno de los agregados, por ejemplo: las mezclas abiertas y los concretos asfálticos, aunque parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin esqueleto mineral.- La resistencia se debe exclusivamente a la cohesión de la masilla, por ejemplo: las masillas asfálticas.

2.3.5. Por la granulometría

Mezclas Continuas.- Posee una buena distribución granulométrica en relación a las cantidades de diferentes tamaños de agregado pétreo.

Mezclas Discontinuas.- Posee una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

2.3.6. Por la temperatura de puesta en obra

Mezclas Asfálticas en Caliente.- Se fabrican a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del cemento asfáltico, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con los agregados en la mezcla, estos deben estar previamente calientes. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente para facilitar su tendido y compactación.

Es el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como la combinación de ligante asfáltico, agregados (incluyendo el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos. Todas las partículas del agregado deben quedar totalmente recubiertas por una película homogénea de ligante.

El método más utilizado a través de los años y el que se utiliza para el desarrollo de esta investigación es el Método Marshall que analiza la estabilidad y flujo (deformación) de las mezclas asfálticas y los contenidos de vacíos (expresados en porcentajes).

Mezclas Asfálticas en Frío.- Se fabrican a base de emulsiones asfálticas cuya composición es de asfalto, emulsificantes y agua. Se caracterizan por su trabajabilidad luego de ser fabricada durante semanas, esto se debe a que el ligante (asfalto fluidificado) permanece por un largo período de tiempo con una viscosidad baja, el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios y facilita su almacenamiento, sin embargo luego de la puesta en obra de una capa de pequeño espesor, el endurecimiento es relativamente rápido debido a la evaporación del fluidificante.

2.4. Consideraciones generales para la selección de una mezcla asfáltica

El diseño de una mezcla asfáltica debe garantizar un comportamiento adecuado, para ello se analizan las siguientes fases:

a) Se identifica las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tipo de tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, entre otros.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, clima de la zona de trabajo, se identifica si se trata de un pavimento

nuevo o de una repavimentación, entre otros factores. Para el diseño de la mezcla asfáltica en la presente investigación, se considera una mezcla asfáltica como capa rodadura para tráfico pesado, en un pavimento nuevo.

b) Se determina las propiedades fundamentales según las condiciones de trabajo, estableciendo los límites de resistencia a las deformaciones plásticas.

c) Se selecciona el tipo de granulometría de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, considerando los efectos económicos y de puesta en obra.

d) Se selecciona los materiales pétreos y el polvo mineral, controlando su calidad.

e) Se selecciona el tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, tomando en cuenta el costo que es factor muy relevante.

f) Se realiza la dosificación y se determina el contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que la granulometría utilizada se encuentre dentro de la franja granulométrica de diseño.

g) Se identifica las exigencias de seguridad vial, estructura del pavimento, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, período de lluvias trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje y consideraciones económicas.

2.5. Comportamiento de una mezcla asfáltica compactada

Este análisis es aplicado tanto para el diseño de las mezclas asfálticas, como para el control de calidad de muestras extraídas en campo.

Básicamente se estudia las propiedades volumétricas: gravedad específica neta (Gsb), gravedad específica aparente (Gsa), gravedad específica efectiva (Gse), vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos con asfalto (VAF) y contenido de asfalto efectivo (Pbe).

La relación de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado, las propiedades que se utiliza para medir la gravedad específica del agregado son: gravedad específica neta (Gsb), la aparente (Gsa) y la efectiva (Gse).

El desempeño de la mezcla compactada está determinado por la densidad Bulk de la mezcla (Gmb), los vacío de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM) y contenido óptimo de asfalto (Pb).

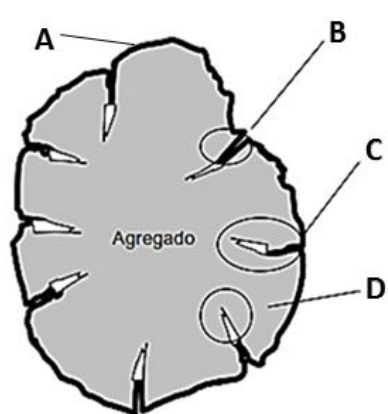
A continuación se define cada una de las propiedades antes mencionadas (Instituto de Asfalto, 1997)

Gravedad específica neta, (Gsb).- Es la proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material *permeable* (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una cierta temperatura, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una cierta temperatura.

Gravedad específica aparente, (Gsa).- Es la proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material *impermeable* a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

Gravedad específica efectiva, (Gse).- Es la proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material *permeable* (excluyendo vacíos permeables de

asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.



- A. Capa efectiva de asfalto
- B. Vacíos permeables de asfalto (asfalto absorbido)
- C. Vacíos permeables al agua (parte del volumen del agregado para gravedad específica neta G_{sb})
- D. Vacíos permeables al agua no llenados con asfalto (parte del volumen del agregado para gravedad específica efectiva G_{se})

Figura 3. Parámetros de diseño volumétrico

Fuente. (Instituto mexicano del transporte, 2006)

Vacíos de aire, (V_a).- Es el volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado cubiertas de asfalto, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada.

Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, proporcionando espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación. El porcentaje permitido de vacíos, en pruebas de laboratorio, para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del tipo de mezcla asfáltica.

Gran parte de la durabilidad de un pavimento asfáltico es el contenido de vacíos, puesto que, entre menor sea la cantidad de vacíos, menos va a ser la permeabilidad de la mezcla; un contenido demasiado alto de vacíos proporciona aberturas a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro, si

embargo, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto.

Vacíos en el agregado mineral, (VAM).- Es el volumen de espacio vacío entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, incluyendo los vacíos de aire, y el contenido de asfalto efectivo. Cuanto mayor sea el VAM, más espacio disponible hay para las películas de asfalto. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

Existen valores mínimos para determinar el VAM los cuales se especifican en función del tamaño del agregado, cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla, es decir, para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VAM.

Vacíos llenos de asfalto, (VAF).- Es el porcentaje de volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado (VAM), que es ocupado por el asfalto efectivo.

Contenido de asfalto efectivo, (Pbe).- Es el contenido de asfalto total (cantidad de asfalto que debe ser adicionada para producir las cualidades deseadas) de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado, en sí, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados, expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

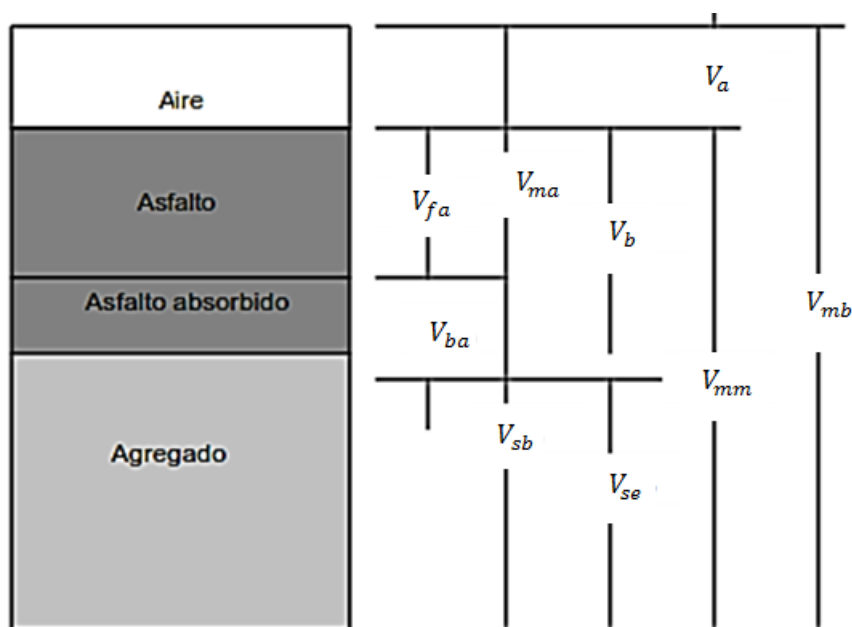


Figura 4. Volúmenes en un espécimen de mezcla asfáltica compactada

Fuente. (Instituto mexicano del transporte, 2006)

Donde:

- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica.
- V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
- V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Densidad Bulk de la mezcla, (G_{mb}).- Está definida por el peso de un volumen específico de mezcla; es una de las características más importantes de la mezcla, puesto que, es fundamental tener una alta densidad en la carpeta asfáltica terminada para generar un buen rendimiento y larga vida útil. Se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), su equivalente en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o libras por pie cúbico (Lb/ft^3).

La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada en obra como referencia para determinar si la densidad de la mezcla terminada es, o no adecuada. Las especificaciones en obra usualmente requieren que la densidad de la mezcla sea un porcentaje de la densidad del laboratorio, esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación del laboratorio.

La densidad Bulk y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad Bulk, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

Contenido óptimo de asfalto, (Pb).- Es el porcentaje de asfalto que contiene la mezcla menos la porción que se pierde, por absorción en el agregado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor es el área superficial total, y mayor es la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas y las mezclas más gruesas (con agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es mayor cuando existe relleno mineral; los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber gran parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy húmeda (saturada en asfalto).

La capacidad del agregado para absorber el asfalto utilizado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

2.6. Evaluación y ajuste de una mezcla de diseño

(Instituto del Asfalto, Métodos de diseño de mezclas, 1997)

En laboratorio es necesario realizar algunas mezclas de prueba, que se ajusten de acuerdo a los resultados obtenidos, cada una sirve como guía para encontrar la mezcla definitiva.

Para el diseño de mezclas preliminares, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla, para corregir las deficiencias. Existen alternativas para ajustar las mezclas de prueba, sin embargo, no funcionan en todos los casos:

Vacíos bajos - estabilidad baja.- Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas; la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, generando un adecuado VAM. Se debe tomar en cuenta que demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e

incremento de la permeabilidad. Si estos ajustes no producen una mezcla estable, el agregado debe cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

Vacíos bajos - estabilidad satisfactoria.- Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un período de tiempo ante la compactación adicional.

Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente.

Vacíos satisfactorios - estabilidad baja.- La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se debe tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Las partículas de agregado con textura rugosa y superficies

menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

Vacíos altos - estabilidad satisfactoria.- Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

Vacíos altos – estabilidad baja.- Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacerse una consideración de la calidad de los materiales, conforme “Vacíos bajos-estabilidad baja” y Vacíos bajos- estabilidad satisfactoria”.

CAPÍTULO 3

3. RECICLAJE Y DISPOSICIÓN DEL ELASTÓMERO DE NEUMÁTICOS

3.1. Introducción

Uno de grandes problemas medioambientales de los últimos años en todo el mundo es la constante fabricación de neumáticos que existe, sumada a la falta de gestión para tratar a estos productos una vez usados. La degradación de las llantas se demora más de 500 años (Grupo innovador del caucho, 2011).

El almacenamiento de neumáticos ocupa un espacio considerable, constantemente se corre el riesgo de generar incendios y acrecentar la proliferación de roedores e insectos. La quema directa para eliminar este tipo de desecho provoca graves problemas ambientales por la emisión de gases nocivos para el entorno, de la misma manera cuando se los deposita en rellenos sanitarios imposibilitan la compactación y ocasionan problemas de estabilidad de suelo por la degradación química parcial que experimentan y el gran volumen que ocupan.

En Ecuador se identifica (hasta el año 2013) aproximadamente un desecho de 120 toneladas diarias, entre llantas de automóviles, camionetas y camiones; los niveles de consumo de neumáticos en nuestro país se pueden estimar en el orden de 2,4 millones unidades anuales (Renovallanta Ecuador, 2013).

Uno de los métodos para valorizar los neumáticos desechados, es la obtención de granos de caucho que son utilizados como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas. El caucho reciclado es obtenido a través de la trituración de los neumáticos, separando el acero y las fibras textiles. Según el método utilizado para la

producción de granos de caucho, se obtienen diferentes características en cuanto a la forma y textura.

3.2. Los neumáticos

3.2.1. Composición y características

Están compuestos de una banda de rodamiento elástica, una cintura prácticamente inextensible, y una estructura de arcos radialmente orientada sobre una membrana inflada y sobre unos aros inextensibles que sirven de enganche a otro elemento rígido, que es la llanta.

El principal componente del neumático es el caucho y conforma casi la mitad de su peso, los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según el tipo de esfuerzo al que son sometidos, y vuelven a su forma original cuando el esfuerzo se retira.

El caucho es una sustancia natural o sintética caracterizada por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica, se obtiene el caucho natural del fluido lácteo llamado látex producido por varias plantas, la más importante es la HEVEA, es una de las fuentes del caucho sudamericano, así mismo se produce caucho sintético a base de hidrocarburos. La combinación de los componentes se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos proporcionen estabilidad térmica. Esta combinación favorece la durabilidad del caucho.

El caucho natural vulcanizado que posee los neumáticos resiste mayores esfuerzos que el caucho natural, como se puede observar en la siguiente figura:

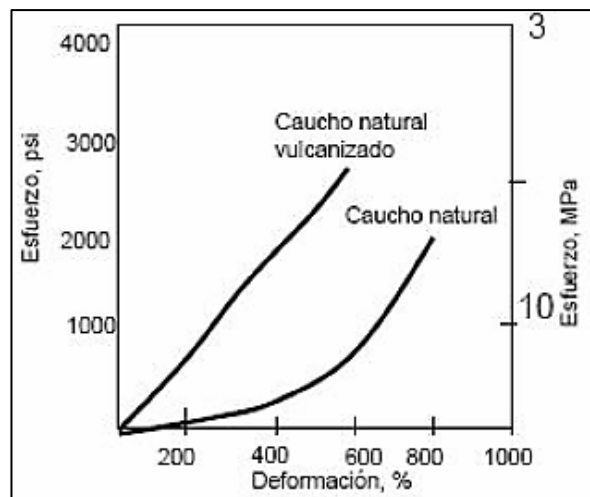


Figura 5. Relación esfuerzo - deformación del caucho natural y vulcanizado

Fuente. (Guillermo Castro, 2007)

El neumático está compuesto principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros basados en hidrocarburos. Se agregan además, al caucho otros materiales para mejorar sus propiedades, como: suavizantes, que aumentan la trabajabilidad del caucho, antes de la vulcanización, comúnmente denominados activadores; antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a la tensión del caucho.

A continuación se describen los componentes más importantes:

Caucho.- Es aproximadamente la mitad del peso del neumático, existen diferentes tipos: caucho natural, estireno-butadieno, polibutadieno, polisoprenos

sintéticos, entre otros, poseen estructuras químicas muy estables es por eso que se necesita gran cantidad de tiempo para su degradación.

Negro de carbono.- Son finísimas partículas de carbono obtenidas por la combustión parcial de gas natural o aceites de petróleo gasificados. Hasta ahora el negro de carbono representa aproximadamente la cuarta parte en peso de un neumático.

Azufre.- El azufre es el agente vulcanizador por excelencia; cumpliendo el objetivo de entrelazar los polímeros, solo puede liberarse si la goma vulcanizada se degrada o se quema, lo cual puede afectar al entorno si la transformación no se produce de una manera controlada.

Oxido de Zinc.- Se utilizan en pequeñas cantidades para acelerar o activar el proceso de vulcanización del neumático.

Existen otros productos que entran en la composición de los neumáticos, como antioxidantes o antiozono, retardantes y adhesivos para la unión de metal y textil con la goma.

3.2.2. Propiedades

Las propiedades del elastómero de neumáticos son varias, sin embargo, se describen a continuación, aquellas que interesan para su aplicación a las mezclas asfálticas:

Propiedades mecánicas.-

- Excelente resistencia a la abrasión
- Moderada resistencia al desgarro

- Excelente resistencia al impacto
- Elevada resistencia al corte
- Absorbentes de vibraciones
- Flexibilidad

Propiedades Físicas.-

- Baja resistencia a la intemperie (oxidación, luz solar)
- Excelente resistencia eléctrica
- Muy baja permeabilidad a los gases

Propiedades Químicas.-

- Resistente a la intemperie
- Baja biodegradabilidad.

Propiedades tecnológicas.-

- Tratamiento mecánico: proceso mecánico mediante el cual los neumáticos son comprimidos, cortados o fragmentados en piezas irregulares.

3.3. Reciclaje de neumáticos

La recolección de los neumáticos en desuso se debe dar en forma separada del resto de los residuos provenientes tanto de usuarios particulares como de talleres de reconstrucción, empresas de transporte, entre otros. Posteriormente los neumáticos usados son transformados en trozos de goma a través de una planta industrial, controlando la granulometría adecuada para su utilización en diferentes productos. Este procedimiento permite una ocupación más eficiente del espacio en los terrenos

de rellenos sanitarios; en consecuencia, la gestión sostenible debe estar direccionada a un ordenamiento lógico para el manejo de cualquier residuo, partiendo desde la generación, acumulación, recolección, transporte y almacenamiento, hasta llegar a su tratamiento para reciclado o reutilización, o para su disposición final.

Este proceso de gestión está basado en una buena sociedad entre los sectores públicos y privados con aplicaciones tecnológicas; su aplicación facilita tanto el manejo responsable de los desechos para eliminarlos del paisaje urbano y rural del país, como en la aceleración del proceso de reciclaje.

.Existen varios métodos para conseguir un adecuado reciclado de neumáticos, sin embargo en Ecuador no se lleva un proceso de reciclaje a gran escala, según La Secretaria de Ambiente, los gestores calificados de neumáticos fuera de uso, llevan un sistema de reciclaje a menor escala, entre ellos están las personas con fines artesanos. Aun hace falta políticas que favorezcan la recolección y la implantación de industrias dedicadas netamente a recuperar o eliminar, de forma limpia, los componentes peligrosos de los neumáticos. El reencauche es lo más utilizado en nuestro país para alargar la vida de un neumático, y no se considera como una alternativa de reciclaje, ya que el caucho cumple la misma función que tenía en su inicio.

En su mayoría los neumáticos fuera de uso se depositan directamente en vertederos sin recibir un tratamiento de reducción de tamaño, los tipos y porcentajes de reutilización que se dan en Ecuador son los siguientes:

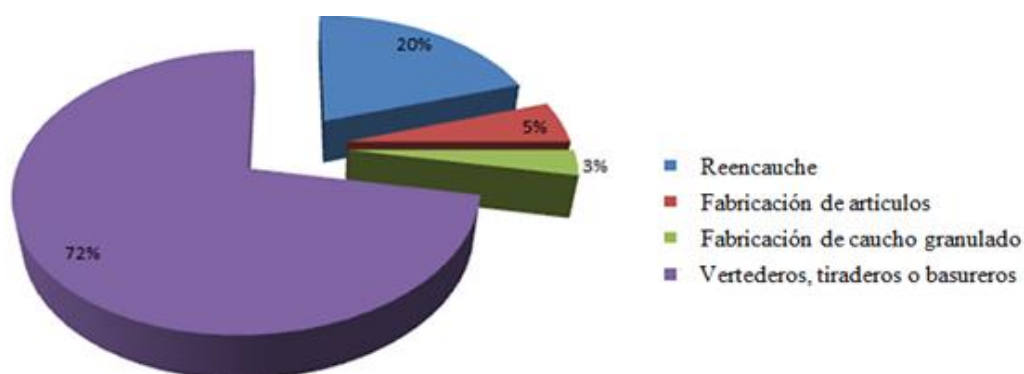


Figura 6. Disposición de neumáticos fuera de uso en Ecuador

Fuente. (Luna Morocho Patricio, 2013)

3.4. Sistemas de tratamiento de los neumáticos usados

Termólisis.- Se trata de un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen el efecto de destruir los enlaces químicos del caucho.

Pirólisis.- es parte especial de la termólisis; los productos obtenidos después del proceso de pirólisis son principalmente: gas similar al propano que se puede emplear para uso industrial, aceite industrial líquido que se puede refinar en diesel, y acero.

Trituración criogénica.- Este método necesita instalaciones muy complejas lo no es rentables económicamente y el mantenimiento de la maquinaria y del proceso es difícil. Los productos obtenidos son de baja calidad, puesto que existe dificultad para purificar y separar el caucho del metal y de los materiales textiles que forman el neumático.

Trituración mecánica.- Es un proceso netamente mecánico y los productos resultantes son de alta calidad, libres de impurezas, lo que garantiza la utilización de estos materiales en nuevos elementos y estructuras.

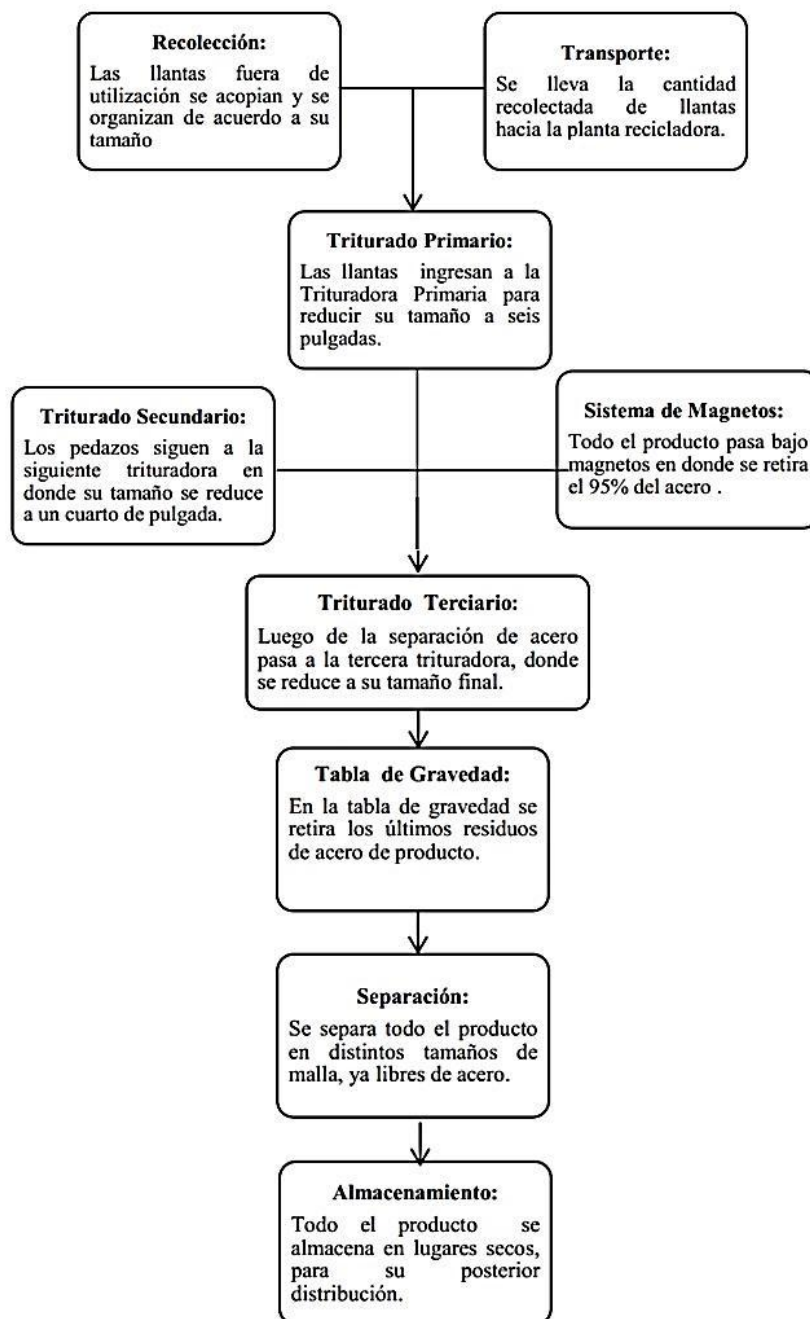


Figura 7. Proceso de trituración mecánica

Fuente. (Luna Morocho Patricio, 2013)

Incineración.- Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas en hornos. Es un proceso costoso debido a la necesidad de depuración de los residuos luego de la incineración.

3.5. Usos del elastómero de neumáticos tras el reciclado

Los materiales que se obtienen tras el tratamiento de los residuos de neumáticos, tienen varias utilidades, como lo describe a continuación:

Disposición Artesanal.- El caucho reciclado se utiliza en la elaboración de productos artesanales, como macetas, bolsos, recipientes para proteger el alimento de los animales, compuestos de goma, suelas de zapato, bandas de retención de tráfico, modificador del betún, entre otros.

Disposición Industrial.- El caucho de los neumáticos fuera de uso es usado como parte de los componentes de las capas asfálticas en la construcción de pavimentos. Las carreteras que usan estos asfaltos son mejores y más seguras. Pueden usarse también en alfombras, losetas de goma, para materiales de fabricación de tejados, cubiertas, masillas y aislantes de vibración; en el campo deportivo, en sitios de juego, suelos de atletismo o pistas de paseo y bicicleta; se usan también en el aislamiento acústico, en donde el caucho debe ser procesado únicamente por sistemas de trituración mecánica y molienda, para conservar su propiedades de absorción de ondas acústicas.

a) Disposición para reencauche.- El reencauche es una tecnología que permite reemplazar la banda de rodamiento que se ha desgastado por el uso de la llanta con una banda de rodamiento nueva para que la llanta tenga una vida adicional. Se conoce que en Ecuador se desechan miles de llantas usadas cada mes y solo el 10%

son reencauchadas, las restantes van a parar a los barrancos, ríos, lagos y mares (Renovallanta Ecuador, 2013).

Un buen porcentaje de las carcacas que existen en el País no son aptas para este proceso, puesto que, no sólo contienen la capa de rodamiento desgastada sino también la parte interna del neumático, esto se debe al desconocimiento del sistema de reencauche, por la poca cultura de reciclaje que existe a nivel nacional por lo que se rechazan aproximadamente un 30% de las carcacas que ingresan a las plantas reencauchadoras (Renovallanta Ecuador, 2013).

El proceso comienza librando de toda impureza al neumático y posteriormente ingresa en el área de raspado, en la que se retira la banda de rodamiento usada, este desperdicio se almacena y se lo clasifica (en lo posible) según el tamaño de las partículas, es usado en la elaboración de pisos sintéticos, mezclas asfálticas, entre otras aplicaciones.

b) Uso del elastómero en mezclas asfálticas.- Existen antecedentes de utilización en: mezclas bituminosas, membranas impermeabilizantes, sustitución parcial de áridos (material “inerte”), con moliendas de caucho mediante un proceso de vía seca o como modificador directo del asfalto mediante vía húmeda. Para la presente investigación se utiliza el proceso vía seca, mediante el cual el elastómero es introducido a la mezcla como un árido más.

Se adiciona, mediante vía húmeda, caucho a los cementos asfálticos que componen los selladores, el objetivo principal es disminuir el aporte de polímeros que existen en el mercado a un costo elevado.

El caucho aumenta la flexibilidad de las mezclas a través de la incorporación caucho molido. Se puede medir el comportamiento de las mezclas elasto-asfálticas versus las convencionales, mediante la utilización de los ensayos de uso tradicional en mezclas asfálticas, estabilidad y flujo del ensayo Marshall. Se debe analizar el tipo de caucho a utilizar y la forma de incorporación a la mezcla, ya que, se debe garantizar que las partículas de caucho queden perfectamente distribuidas en toda la mezcla.

El caucho proveniente de neumáticos desechados puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de tres métodos diferentes denominados como: proceso por vía húmeda, proceso por vía seca y proceso en refinería. En el proceso por vía húmeda, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, generando una mezcla llamada asfalto- caucho mientras que en el proceso por vía seca, el caucho es usado como una porción de agregado fino. En el proceso en refinería, la mezcla del caucho con el cemento asfáltico se realiza en la planta de producción de asfalto, para luego transportarlo a obra en donde se combina con los áridos para producir la mezcla asfáltica.

Entre estas ventajas del proceso por vía húmeda se encuentra el incremento de la resistencia a las deformaciones plásticas; cuanto más caucho se incorpora, es mayor el contenido de ligante en la mezcla asfáltica y se disminuye la reflexión de grietas, la susceptibilidad térmica, mejora el comportamiento a fatiga y al envejecimiento debido a los altos contenidos de ligante asfalto-caucho (entre 6.5 y 7.5% con respecto a los agregados), cuidando de no perjudicar la resistencia a las deformaciones plásticas. Tanto en el proceso por vía seca, como en el proceso por vía húmeda se realiza el estudio de la incorporación de caucho partiendo con una mezcla patrón,

con el fin de comparar la variación de las propiedades de esta mezcla al añadirle diferentes porcentajes de caucho.

Otra aplicación del caucho a mezclas asfálticas es en forma de partículas gruesas como un agregado, esto puede mejorar el desempeño de la misma; las partículas de caucho que quedan expuestas en la superficie del impiden que los neumáticos de los vehículos se deslicen sobre el pavimento, ofreciendo una mejor adherencia, y las que quedan dentro de la capa asfáltica ayudan a retardar el fisuramiento de la misma, debido a la absorción de los esfuerzos que evitan la propagación de la fisura.

CAPÍTULO 4

4. RECICLAJE Y DISPOSICIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO “PET”

4.1. Introducción

Los plásticos se caracterizan por su naturaleza química resistente a la biodegradación. Al separar los plásticos del resto de los residuos sólidos genera un aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios, mejora de la estética de las ciudades, genera empleos, ahorro de energía, entre otros factores.

Los plásticos como: bolsas, vasos, botellas, juguetes, entre otros, ocupan un porcentaje mucho mayor en el volumen en comparación al resto de los residuos sólidos, lo cual contribuye a aumentar los costos de la recolección, el transporte y la disposición final.

El mayor problema que se genera al depositar los residuos sólidos en vertederos (basureros), es la quema indebida y sin control, produciendo gases tóxicos que afectan al medio ambiente y al ser humano; al depositarlos en rellenos sanitarios, los plásticos dificultan la compactación de los residuos sólidos y perjudican la descomposición de los materiales biodegradables, puesto que las capas impenetrables que se forman afectan la circulación de gases y líquidos generados en el proceso de biodegradación de la materia orgánica. En Ecuador se está ejecutando el proceso de reciclaje de residuos sólidos direccionado por el Ministerio del Ambiente (MAE); desde el año 2011 la Ley de Fomento Ambiental y Optimización de los Ingresos del Estado, publicada el 24 de noviembre de ese año, creó el impuesto redimible (impuesto rescatable y recuperable) a las botellas plásticas no retornables con la

finalidad de disminuir la contaminación ambiental y estimular el proceso de reciclaje. Es así que en el año 2012, Ecuador obtuvo un lugar en el libro de récords Guinness por la recolección de más de 1,5 millones de botellas de plástico en quince días (MAE Comunicado, 2012).

Se debe desarrollar el sector Industrial en el que se procesa gran parte del material reciclado para la fabricación de nuevos objetos, o su aplicación en Industrias paralelas al área de construcción, ya sea en el ámbito estructural, vial, sanitario, entre otros.

4.2. Clasificación de los plásticos

4.2.1. Según la disposición de las macromoléculas

Según la disposición de las macromoléculas que constituyen los plásticos se clasifican en tres grandes grupos:

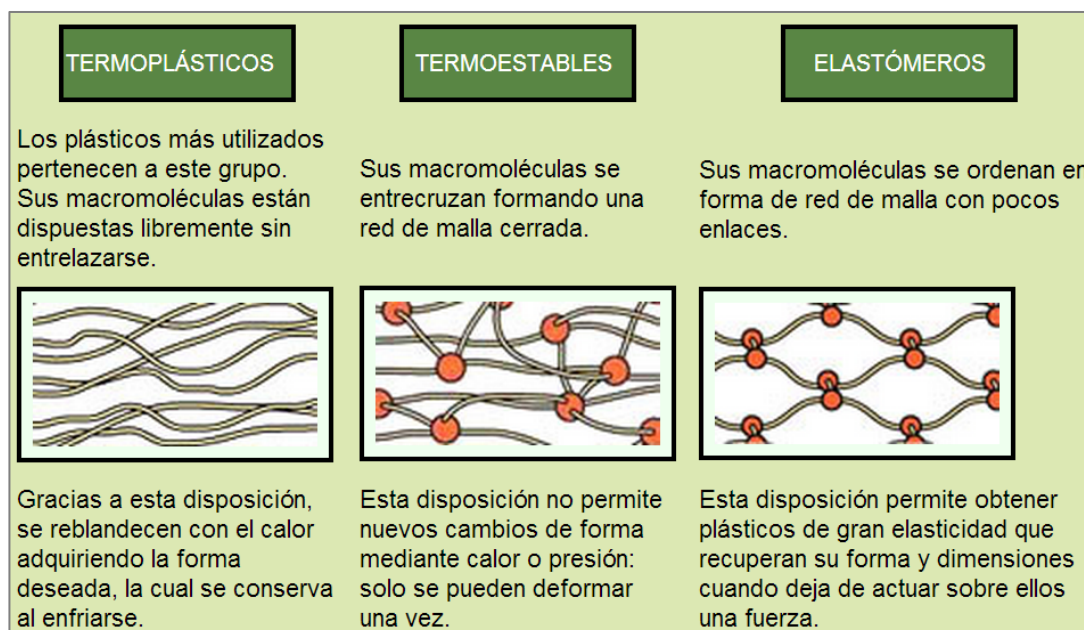


Figura 8. Clasificación de los plásticos según las macromoléculas

Fuente. (Diario ABCV, 2014)

4.2.2. Según su comercialización

Los plásticos provenientes de los residuos sólidos pueden ser comercializados en diversas formas y niveles de procesamiento, depende de: sistemas de recolección y clasificación; disponibilidad de empresas recicladoras en la región; entre otros.

En forma general, las empresas que se dedican al reciclaje y reventa de este material prefieren adquirirlo previamente clasificado y limpio, así es más fácil procesarlo, los plásticos deben pasar por un proceso que los prepare para una posterior transformación.

Según la preparación que se les aplique, pueden ser comercializados bajo las siguientes formas:

Plástico mezclado.- Los objetos de plástico se separan de los demás residuos sólidos, mediante la selección manual en una correa móvil; luego de separado, el material es colocado en bolsas plásticas, se comprimen, se presan e identifican.

Plástico separado.- Los elementos de plástico son separados por tipo de resina (composición del plástico), mediante la clasificación manual en una correa móvil; y se los deposita en recipientes identificados con el nombre o el símbolo de la resina, para luego colocarlos en bolsas plásticas, se los prensa e identifica.

Los plásticos se encuentran dentro de una codificación establecida en el Sistema Internacional por el tipo de resina que cada uno posee, esta codificación se presenta en la siguiente figura:



Figura 9. Codificación de plásticos en el Sistema Internacional

Fuente. (Plástico, 2013)

Cada uno de estos tipos de plásticos posee una densidad que los identifica:

Cuadro 8.

Densidades de plásticos granulados

	Plásticos	Densidad (g/cm³)
1	Tereftalato de polietileno PET	1.220 – 1.400
2	Polietileno de alta densidad PEAD	0.940 – 0.960
3	Policloruro de vinilo PVC	1.220 – 1.300
4	Polietileno de baja densidad PEBD	0.910 – 0.930
5	Polipropileno PP	0.900 – 0.910
6	Poliestireno PS	1.040 – 1.080

Fuente. (Manual de Gestión Integral, s.f)

Existen diversos materiales, que se encuentran en el mercado, por tipos de plásticos, se definen los siguientes:

Cuadro 9.
Materiales disponibles en el mercado por tipo de plástico

Materiales	Tipo de plástico
Baldes, frascos y botellas de alcohol, tanques	PEAD
Conductores para alambres y cables eléctricos	PVC, PEBD, PP
Vasos para agua mineral	PP y PS
Vasos desechables (café, agua, cerveza, etc.)	PS
Envoltorios para pasta, golosinas y galletas	PP, PEBD
Frascos de detergente y productos de limpieza	PP, PEAD, PEBD y PVC
Frasco de shampoo y artículos de higiene	PEBD, PEAD, PP
Gabinetes de computadoras, aparatos de sonido y TV	PS
Botellas de agua mineral	PEAD, PP, PET, y PVC
Botellas de refrescos	PET y la tapa en PP
Lonas agrícolas	PEBD y PVC
Envases de margarinas	PP
Bolsas de abono	PEBD
Bolsas para residuos sólidos	PEBD
Tuberías	PVC, PEAD y PP

Fuente. (Manual de Gestión Integral, s.f)

4.3. Tereftalato de polietileno PET

El tereftalato de polietileno, más conocido por sus siglas en inglés PET (polyethylene terephthalate) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Es un material sintético denominado poliéster y es un termoplástico que puede ser procesado y transformado para formar varios productos cuando se someten a temperatura y presión adecuada, se funden y pueden moldearse otra vez.

El Tereftalato de Polietileno (PET) puede ser degradado mediante diferentes métodos: procesos químicos y el proceso natural. En el proceso químico se puede

reutilizar el material para generar un nuevo producto; esto se debe a que se puede modificar su estructura molecular. El proceso natural, puede tardar más de 500 años (Noticias de Internet, 2012).

4.3.1. Proceso de reciclaje para uso en mezclas asfálticas

La escarcha de tereftalato de polietileno, usada en el diseño de mezclas asfálticas en la presente investigación, se obtiene mediante el reciclado mecánico.

Reciclaje mecánico.- Consiste en una serie de etapas a las que el material es sometido para su limpieza y procesamiento, sin producir un cambio químico en su estructura. Es importante conocer el origen del residuo de PET, puesto que, puede ser residuo de proceso industrial o residuo post-consumo, además es importante considerar la aplicación que tendrá el material.

La calidad del producto resultante depende definitivamente del proceso de separación previa de los materiales plásticos y de su limpieza, por lo que es de suma importancia la ejecución minuciosa de procesos y sub-procesos, como la separación, lavado en frío, lavado en caliente, secado, entre otros, dependiendo la disposición final a la que está direccionado el material.

Dentro del reciclado mecánico existen dos tipos de proceso: el reciclado mecánico convencional, utilizado para producir la escarcha de PET (Fotografía 7) usada en el diseño de mezclas asfálticas, y el proceso de súper limpieza que es complementario del primero y se lo utiliza para generar pellet de PET (Fotografía 8) usado como materia prima de fibras textiles y elaboración de nuevas botellas plásticas.



Fotografía 7. Forma de la escama de PET

Fuente. (ENKADOR, s.f)



Fotografía 8. Forma del pellet de PET

Fuente. (ENKADOR, s.f)

Las etapas que se siguen en ENKADOR en el reciclaje mecánico convencional son las siguientes:

Recogida selectiva.- Se eliminan impurezas de los plásticos mediante la selección automática o manual, tomando en cuenta factores como: color (por ejemplo eliminar colores críticos como amarillo, café, rojo y negro, solo son permitidos los azules e incoloros), tipo de materiales plásticos (eliminación de PEBD, PEAD, PP, PVC) son seleccionados solo las botellas de refrescos y agua.

Su efectividad depende totalmente de las características de los elementos a separar en relación al grado de suciedad y humedad.



Fotografía 9. Recogida selectiva del PET

Fuente. (ENKADOR, s.f)

Triturado.- Usualmente este proceso es realizado en molinos de cuchillas, el tamaño final del plástico puede variar de una planta procesadora a otra, sin embargo lo habitual es obtener una escarcha menor de 10 mm y que esta se encuentre libre de polvo.

Lavado.- Se hace sobre el triturado usando agua y/o tensoactivos diluidos a temperaturas variables; frío, temperatura ambiente, lavado medio aproximadamente a 40°C o lavado en caliente a una temperatura de 70°C a 90°C. Al realizar el lavado se elimina materiales contaminantes de tipo orgánico entre ellos tierra, arena presentes en la superficie de la escarcha.

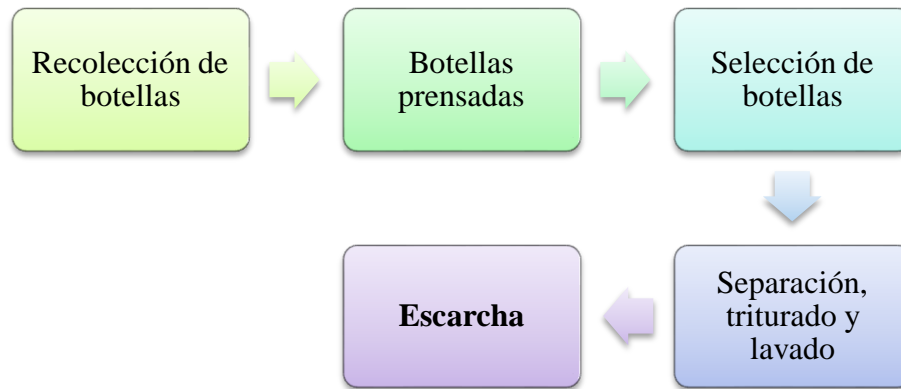


Figura 10. Proceso de reciclaje mecánico convencional

Fuente. (ENKADOR, s.f)

4.3.2. Propiedades del PET

Se definen las propiedades del tereftalato de polietileno PET que se toman en cuenta para su introducción en las mezclas asfálticas como material modificador en forma de escarcha cuyo análisis se direcciona a su resistencia física y durabilidad.

En general las propiedades son las siguientes:

- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Buena resistencia química y térmica.
- Reciclable
- Estabilidad a la intemperie
- Resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste
- Alta rigidez y dureza.

En forma específica se tiene las siguientes propiedades:

Cuadro 10.

Propiedades del PET en la modificación de mezclas asfálticas

Propiedades	Unidad	Valores
Observaciones		
Propiedades mecánicas a temperatura ambiente		
Peso específico	gr/cm ³	1,39
Resistencia a la compresión	kg/cm ²	260/480
Resistencia al desgaste por roce		Muy buena
Propiedad térmica		
Temperatura de fusión	°C	255
Propiedades químicas		
Resistencia a hidrocarburos		Buena
Efecto de los rayos solares		Algo lo afectan
Comportamiento a la combustión		Arde con mediana dificultad
Propagación de llama		Mantiene la llama

Fuente. (Plásticos de Ingeniería, 2013)

La propiedad térmica es de suma importancia considerar en el proceso de mezclado en la elaboración de las probetas de ensayo, se debe identificar que la temperatura de mezclado no afecte al PET.

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

5.1. Introducción

El diseño de mezclas asfálticas en caliente se desarrollan en base dos factores: marco teórico y trabajo de laboratorio; el marco teórico es el expuesto en el Capítulo 2 del presente proyecto, la mezcla asfáltica a diseñarse será para una capa de rodadura en condiciones de tráfico pesado; y el trabajo realizado en laboratorio consta de caracterización del material pétreo, caracterización del cemento asfáltico, elaboración y ensayo de estabilidad y flujo de briquetas mediante el Método Marshall.

5.2. Antecedentes

El material pétreo utilizado proviene de la Cantera de Pifo ubicada en Distrito Metropolitano de Quito.



Fotografía 10. Cantera de Pifo

El muestreo del agregado es tan importante como los ensayos de caracterización; el material debe ser tomado del producto terminado, y preferentemente de la trituración directa de la roca, su angularidad es mayor y por lo general carece de partículas alargadas, y sobre todo poseen mayor densidad que los obtenidos directamente del yacimiento.

El muestreo de agregado se realiza de acuerdo a la Norma ASTM D75 que determina varias formas de muestreo, en el presente proyecto se aplican dos de ellas.

Muestreo de un flujo de agregados.- Descarga de silos o correas (Fotografía 11), se obtiene por lo menos tres incrementos aproximadamente iguales, al azar, y se los combina para formar la muestra de campo. Este proceso evita la segregación del material y se tiene una muestra homogénea.



Fotografía 11. Muestreo de agregado fino

Muestreo de material apilado.- Cuando el material se encuentra apilado (Fotografía 12), la presente Norma condiciona la toma de muestra de la siguiente forma:

Se toma, para una sola muestra, varias cantidades de agregado en diferentes sitios de la pila (preferentemente en la corona, en el medio, y antes de llegar al pie de la

pila), se cava en el sitio una profundidad tal que permita tener un material homogéneo, así se descarta el agregado de la superficie que ha estado expuesto a agentes del ambiente.



Fotografía 12. Muestreo de agregado grueso

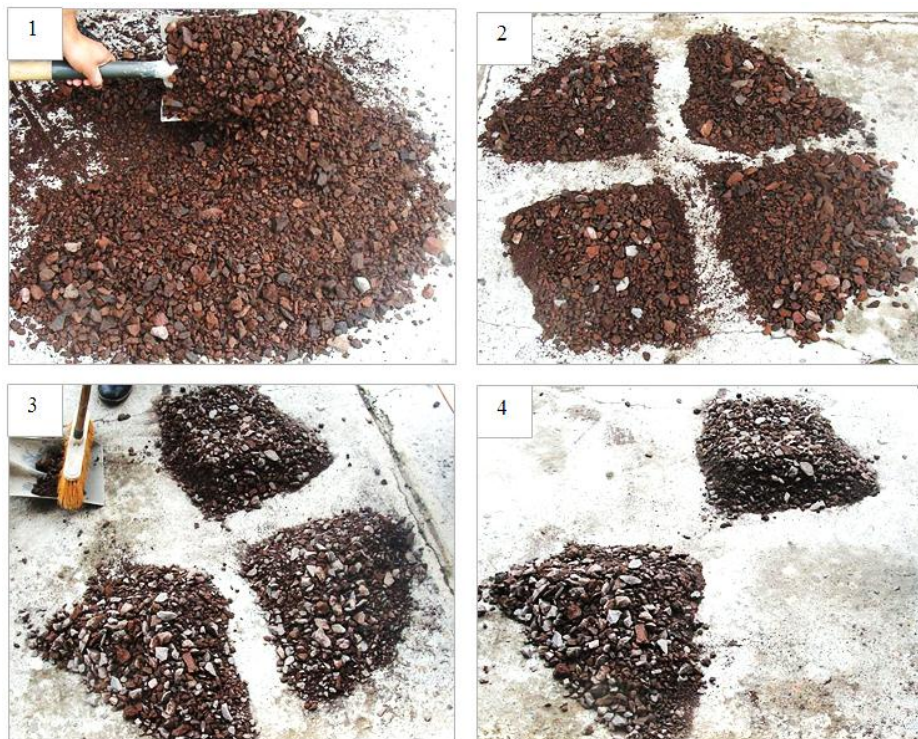
El asfalto utilizado proviene de la Planta Asfáltica ubicada en la avenida E28, en Calacalí; para la toma de muestras del ligante asfáltico AC-20 se utiliza la norma ASTM D140. Es recomendable que la muestra se mantenga en recipientes adecuados (Fotografía 13) para el fácil manejo del cemento asfáltico en el laboratorio.



Fotografía 13. Muestra de asfalto

Una vez obtenida la cantidad necesaria de agregado fino y grueso, se realiza la reducción de muestra en el laboratorio mediante cuarteo.

Se optó por realizar el procedimiento manualmente (Fotografía 14), este es el segundo método de cuarteo que describe la norma de reducción de muestras ASTM C702.



Fotografía 14. Reducción de muestra mediante cuarteo manual

Se coloca el material en una superficie firme, limpia y nivelada, se realiza la mezcla volteando la muestra más de tres veces, se forma una pila, depositando cada palada sobre la parte superior de la anterior, se aplana la pila, manteniendo un diámetro de cuatro a ocho veces el espesor, se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales y se retira los dos cuartos diagonalmente opuestos, sin que haya desperdicio de material. El proceso se puede repetir las veces que sea necesario hasta obtener la cantidad adecuada de material para determinados ensayos y usos.

5.3. Caracterización de los materiales que componen la mezcla asfáltica

Los ensayos de control de las características físico- mecánicas de los materiales que componen la mezcla asfáltica son de gran importancia, puesto que con ellos se verifica el comportamiento de los mismos, tanto individualmente como en conjunto. Los materiales que componen las diferentes mezclas asfálticas diseñadas son, agregado pétreo, cemento asfáltico, y materiales modificadores (tereftalato de polietileno y elastómero), todos ellos poseen su respectiva caracterización en base a las normas ASTM, que se describen a continuación.

5.3.1. Agregado pétreo

Inicialmente se determina el tamaño máximo nominal del agregado, puesto que de él depende la elección del tipo de curva granulométrica para el diseño, de la misma manera que el tamaño de muestra utilizado en cada uno de los ensayos de caracterización.

Tamaño máximo nominal (t m n).- Se define como la abertura de tamiz más pequeña por la cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal puede retener del 5% al 15% del agregado, esto se justifica por la definición del t.m.n en la Norma ASTM C125-07 literal 3 cuyo comentario especifica que esa malla puede retener una porción máxima definida de árido. La muestra de agregado, se obtiene por reducción de muestras a tamaño de ensayo mediante cuarteo manual. Se toma aleatoria y aproximadamente 5 kg de agregado grueso se utiliza las mallas 1", 3/4" y 1/2". De esta manera se determina que el t.m.n es 3/4", por el 8% de material retenido en el tamiz 3/4" y el 92% pasante del mismo tamiz, como se expone:

Tabla 1.
Determinación del tamaño máximo nominal del agregado

No. de Tamiz	Muestra inicial 5000 (g)	Muestra inicial 100 (%)
	Retenido Parcial (g) de agregado grueso	Retenido Parcial (%) de agregado grueso
1"	0	0
$\frac{3}{4}$ "	399,78	8
Pasante $\frac{3}{4}$ "	4597,52	92
Total sumado (g), (%)	4997,30	100

Una vez determinado el tamaño máximo nominal del agregado se elige el tipo de granulometría para el diseño, este proyecto se basa en la granulometría de la Mezcla Asfáltica Normal MAC definida en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, volumen 3, sección 405, 405-5.02.3, literal a. Para un tamaño máximo nominal $\frac{3}{4}$ " se tiene los límites granulométricos de la MAC-2 según la siguiente tabla.

Tabla 2.
Límites granulométricos, NEVI-12

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25 mm (1")	100	-	-
19 mm (3/4")	80	100	-
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	-
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (No.4)	43-54	51-68	65-87
2 mm (No.10)	29-45	38-52	43-61
425 mm (No.40)	14-25	17-28	16-29
180 mm (No.80)	8-17	8-17	9-19
75 mm (No.200)	4-8	5-8	5-10

5.3.1.1 Análisis granulométrico en el agregado grueso y fino

Norma ASTM C136-06.

El objetivo principal del análisis granulométrico en el diseño de hormigones asfálticos (y en cualquier tipo de hormigón), es que las partículas del agregado pétreo se encuentre dentro de los límites máximos y mínimos establecidos por la MAC-2 y que los porcentajes de cada tamaño de partículas sea la ideal para un buen comportamiento del material, esta distribución de porcentajes se llama graduación del agregado o graduación de la mezcla.

En sí, la granulometría es el factor más importante de todos los componentes, ya que determina el esqueleto mineral resistente de la mezcla asfáltica.

El método utilizado para realizar el análisis granulométrico de los agregados fino y grueso, es el tamizado seco, y tiene las siguientes características:

Equipo.- Balanza digital de apreciación ± 0.01 g, tamices de malla cuadrada: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No.4, No.10, No.40, No.80, y No.200 (Fotografía 15a), recipientes y bandejas metálicas, cepillo de alambre, brocha, y tamizador eléctrico.

Procedimiento.- Las muestras se reducen mediante cuarteo manual, hasta obtener la cantidad necesaria, para agregado fino mínimo 300g y para agregado grueso según lo que determina la presente norma (Tabla 3).

Tabla 3.
Cantidad inicial de muestra según el t.m.n para agregados gruesos

Tamaño máximo nominal Abertura de malla (mm)	Tamaño mínimo de la muestra (kg)
9,50	1
12,5	2
19,0 - 3/4"	5
25,0	10
37,5	15
50,0	20
63,0	35
75,0	60
90,0	100
100	150
125	300

Fuente. Norma ASTM C125

Se lava y seca el agregado hasta obtener un peso constante, se tamiza separadamente (Fotografía 15b) las muestras del agregado fino y del grueso, se pesa por separado cada una de las cantidades retenidas en cada tamiz de la serie de tamices y se anota en un registro.



Fotografía 15. Serie de tamices (a); Tamizador eléctrico (b)

Tabla 4.
Resultados de granulometría, agregado fino y grueso

Análisis Granulométrico Inicial												
	Ret. Parcial		Ret. Acumulado		Ret. Acumulado		Pasante parcial		Diseño pasante			
	Grueso (g)	Fino (g)	Grueso (%)	Fino (%)	Grueso (g)	Fino (g)	Grueso (%)	Fino (%)	Grueso (%)	Fino (%)		Mezcla (%)
M. inicial (g)	5104,2	671,5										Franja de diseño (%)
1 "	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
3/4 "	519,40	0,00	10,18	0,00	519,40	0,00	10,18	0,00	89,82	100,00	60,00	95,93
1/2 "	965,60	0,00	18,93	0,00	1485,00	0,00	29,11	0,00	70,89	100,00	60,00	88,36
3/8 "	820,10	0,00	16,08	0,00	2305,10	0,00	45,19	0,00	54,81	100,00	60,00	81,92
# 4	2004,60	119,20	39,30	17,78	4309,70	119,2	84,49	17,78	15,51	82,22	49,33	55,54
# 10	314,70	231,50	6,17	34,52	4624,40	350,7	90,65	52,30	9,35	47,70	28,62	32,36
# 40	247,10	225,50	4,84	33,63	4871,50	576,2	95,50	85,92	4,50	14,08	8,45	10,25
# 80	69,00	48,30	1,35	7,20	4940,50	624,5	96,85	93,13	3,15	6,87	4,12	5,38
# 200	75,20	24,50	1,47	3,65	5015,70	649,0	98,33	96,78	1,67	3,22	1,93	2,60
pasante # 200	85,40	21,60										
TOTAL (g)	5101,10	670,60										
PERDIDA (g)	3,10	0,90										

Zo. tamiz

Resultados iniciales de la granulometría de agregado grueso y fino.- Los resultados iniciales obtenidos (Tabla 4) del ensayo se expresan en porcentajes del peso total, que pasan por cada tamiz de la serie, posteriormente se calculan los porcentajes acumulados pasantes y retenidos, para luego determinar si la granulometría obtenida se encuentra dentro de los límites definidos por el tipo de granulometría de la mezcla asfáltica normal MAC-2.

La curva granulométrica obtenida (Figura 11) del análisis granulométrico, está fuera de los límites de la MAC-2, se realizó combinaciones desde el 60% de agregado grueso y 40% de fino hasta el que se expresa en la Tabla 14 con el 40% de agregado grueso y 60% de fino, pero en ninguna de las combinaciones de este rango cumple con dichos límites.

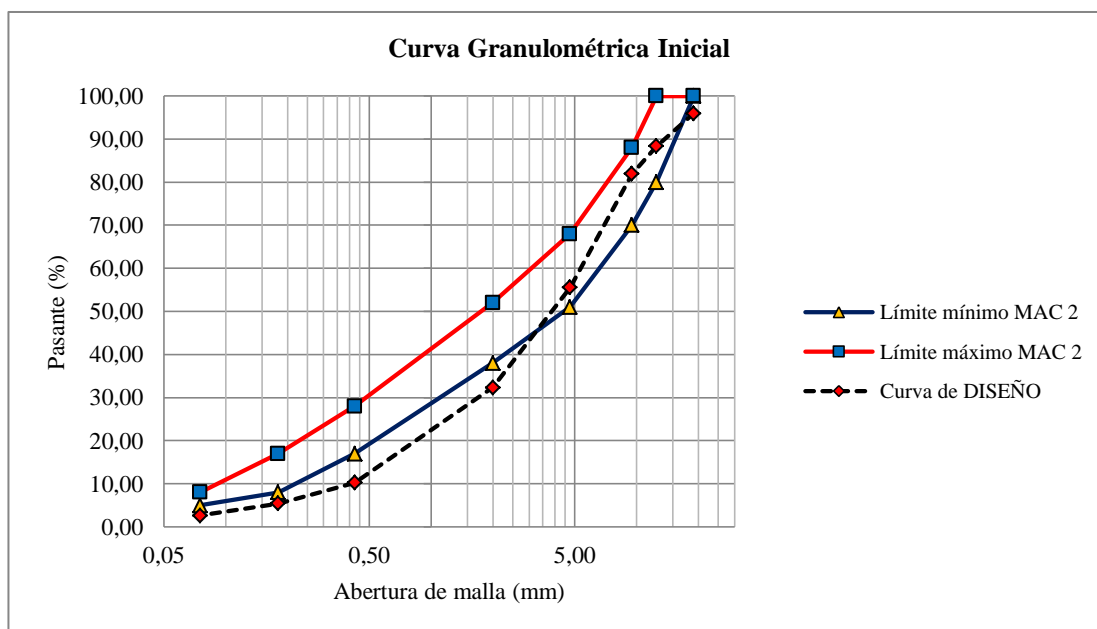


Gráfico 1. Curva granulométrica fuera de rango

Por tanto es necesario realizar la estabilización granulométrica que se describe en el literal 5.4 del presente Capítulo, con ello se logra que la curva granulométrica de diseño esté dentro de la franja MAC-2 del NEVI-12.

5.3.1.2 Gravedad específica y absorción del agregado grueso

Norma ASTM C127-12.

El objetivo principal es determinar la densidad de la porción sólida de una cantidad grande de partículas pétreas y proporcionar un valor promedio, que representa la muestra.

No se debe confundir con la masa unitaria (peso volumétrico) de los áridos, puesto que el peso volumétrico incluye el volumen de los vacíos entre las partículas del árido, lo que no sucede con la determinación de la gravedad específica que elimina el volumen de espacios vacíos.

Básicamente se determina los pesos específicos aparente y nominal y el porcentaje de absorción del agregado con partículas de tamaño igual o mayor a 4.75 mm (abertura del tamiz No.4), después de 24 horas de sumergidos en agua. La siguiente tabla determina la cantidad mínima de muestra.

Tabla 5.
Cantidad de muestra para gravedad específica, agregado grueso

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
(mm)	(pulgadas)	(kg)
12,5 o menor	½	2
19,0	¾	3
25,0	1	4
37,5	1 ½	5
50,0	2	8
63,0	2 ½	12
75,0	3	18
90,0	3 ½	25

Equipo.- Horno, balanza digital de apreciación $\pm 0.1g$ o menos, termómetro, tamiz No.4, canastilla metálica (abertura 4,75 mm), tanque de inmersión de apreciación $\pm 0.1g$, paño absorbente, recipientes metálicos.

Procedimiento.- Se toma una cantidad mayor a los 3 kg agregado grueso, se hace pasar por el tamiz No.4 para separarlo de las arenas, se lava la muestra de impurezas minerales y se seca en el horno a una temperatura de $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ hasta obtener una masa constante.

Una vez fría la muestra, se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas a temperatura ambiente. Luego de cumplido el período de inmersión, se escurre el agua y se elimina el agua visible de la superficie (Fotografía 16) de las partículas con el paño absorbente. Enseguida se pesa la cantidad requerida de muestra, mínimo 3 kg, en estado superficie saturada seca (SSS).



Fotografía 16. Eliminación del agua superficial del agregado

Para el presente proyecto se tomó las muestras para los tres tamaños de agregado grueso que se tiene en la faja granulométrica MAC-2: material pasante de $\frac{3}{4}''$ – retenido en $\frac{1}{2}''$; pasante de $\frac{1}{2}''$ – retenido en $\frac{3}{8}''$; pasante de $\frac{3}{8}''$ – retenido en No.4.

Posteriormente se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina el peso sumergido en agua a $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ en el tanque de inmersión.



Fotografía 17. Muestra de agregado grueso en tanque de inmersión

Cálculos y resultados.-

Para efectos del presente proyecto, se calcula las gravedades específicas del agregado grueso por diferentes tamaños de agregado, para esto se toman valores de muestra diferentes a 3 kg, proceso que se considera en laboratorio como válido.

Tabla 6.
Gravedades específicas y absorción, P 3/4" - R1/2"

Agregado grueso pasante 3/4" retenido 1/2"			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	1315,43
B	Peso en el agua de la muestra saturada	(g)	788,00
C	Peso de la muestra seca	(g)	1279,37
(C/C-B)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,60
(A/A-B)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,49
(C/A-B)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,43
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	2,82

Tabla 7.
Gravedades específicas y absorción, P1/2"- R3/8"

Agregado grueso pasante 1/2" retenido 3/8"			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	919,23
B	Peso en el agua de la muestra saturada	(g)	550,97
C	Peso de la muestra seca	(g)	893,78
(C/C-B)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,61
(A/A-B)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,50
(C/A-B)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,43
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	2,85

Tabla 8.
Gravedades específicas y absorción, P3/8"- RNo.4

Agregado grueso pasante 3/8" retenido No.4			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	1047,21
B	Peso en el agua de la muestra saturada	(g)	628,99
C	Peso de la muestra seca	(g)	1018,88
(C/C-B)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,61
(A/A-B)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,50
(C/A-B)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,44
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	2,78

5.3.1.3 Gravedad específica y absorción del agregado fino

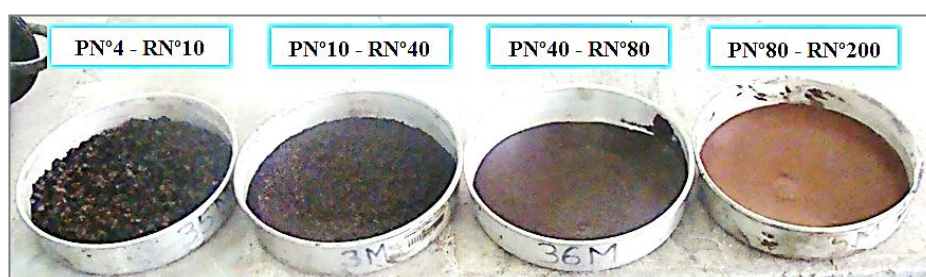
Norma ASTM C128-12.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente. Los valores de absorción se utilizan para calcular los cambios en la masa de un árido debido al agua absorbida por los

poros de las partículas. Este ensayo tiene como objetivo la determinación de la densidad aparente y neta, lo mismo que el porcentaje de absorción de agua, luego de que el agregado fino se sumerge en agua por un período de 24 horas.

Equipo. – Horno, balanza digital $A \pm 0.1g$ o menos, termómetro, bomba para extracción de aire, tamiz No. 4, picnómetro o matraz aforado, embudo, bandeja y recipientes metálicos.

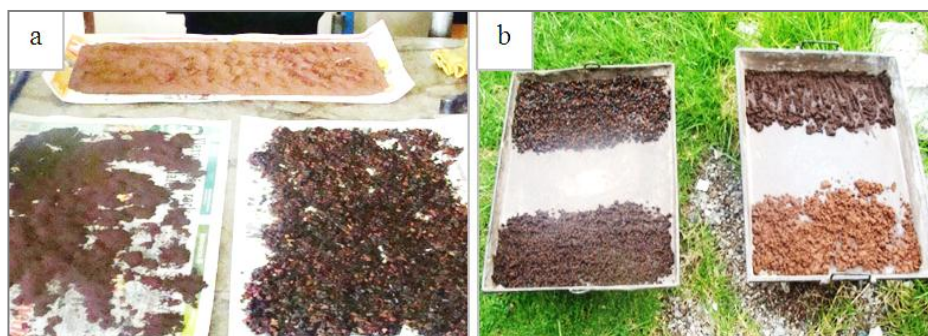
Procedimiento (Gravimétrico).- Se obtiene aproximadamente 1200g de agregado fino (material pasante del tamiz No.4), el 50% de esta cantidad ($500g \pm 10g$) será para la determinación de la absorción del agregado. Se lava la muestra de impurezas minerales y se seca en el horno a una temperatura de $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ hasta obtener una masa constante. Una vez fría la muestra, se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas a temperatura ambiente. Luego de cumplido el período de inmersión, se escurre el agua (con precaución de no perder el material más fino), se tiene las muestras por separado (Fotografía 18) de los tamaños de agregado fino.



Fotografía 18. Tamaños de agregados que corresponden al material fino

Se elimina el agua visible de la superficie de las partículas, (generalmente la determinación de la humedad superficial se realiza con un molde cónico y compactador), para este proyecto se procede a dejar la muestra sobre papel absorbente (Fotografía 19a) y en presencia de una corriente moderada de aire

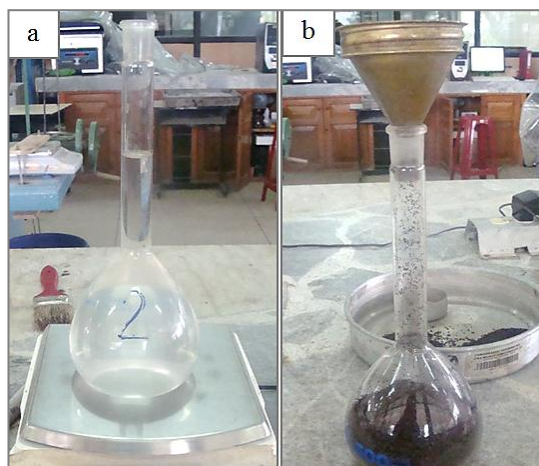
(Fotografía 19b), se remueve el material hasta que las partículas fluyan libremente (estado superficie saturada seca SSS).



Fotografía 19. Material fino sobre papel absorbente (a); material expuesto a la corriente de aire (b)

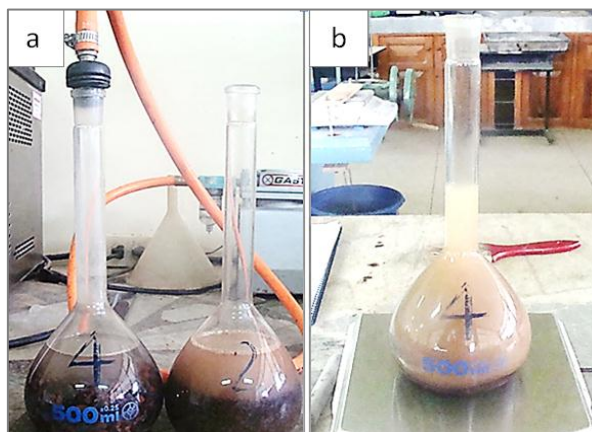
Se pesa 500 g del material en estado superficie saturada seca (SSS) y se lleva al horno a una temperatura $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ hasta obtener una masa constante y se registra el peso seco. Se calibra el picnómetro (Fotografía 20a) determinando el peso de éste lleno hasta su capacidad de calibración con agua destilada.

Posteriormente se introducen otros 500g de material (Fotografía 20b) en el picnómetro, luego se vierte agua hasta que cubra la muestra totalmente.



Fotografía 20. Calibración de picnómetro (a); colocación de la muestra dentro del picnómetro (b)

Temperatura del agua de ensayo $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$, se elimina el aire de entre las partículas con la bomba (Fotografía 21a) durante un período de 15 minutos mínimo, se agita el picnómetro cada 5 minutos hasta eliminar todo el aire.



Fotografía 21. Extracción de aire (a); peso del picnómetro más muestra y más agua (b)

Cálculos y resultados.- La presente Norma determina que puede utilizarse una cantidad distinta de $500\text{g}\pm 10\text{g}$ pero no menor a 50g, siempre que tal valor sea el mismo colocado al horno que el introducido en el picnómetro.

Tabla 9.

Gravedades específicas y absorción, PNo.4- RNo.10

Agregado fino pasante No.4 retenido No.10			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	500,00
C	Peso de la muestra seca	(g)	486,62
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	662,87
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	963,40
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,61
(A/A+D-E)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,51
(C/A+D-E)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,44
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	2,75

Tabla 10.
Gravedades específicas y absorción, PNo.10- RNo.40

Agregado fino pasante No.10 retenido No.40			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	400,00
C	Peso de la muestra seca	(g)	387,70
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	655,73
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	897,94
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,66
(A/A+D-E)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,54
(C/A+D-E)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,46
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	3,17

Tabla 11.
Gravedades específicas y absorción, PNo.40- RNo.80

Agregado fino pasante No.40 retenido No.80			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	210,40
C	Peso de la muestra seca	(g)	203,18
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	662,87
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	791,17
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,71
(A/A+D-E)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,56
(C/A+D-E)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,47
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	3,55

Tabla 12.
Gravedades específicas y absorción, PNo.80- RNo.200

Agregado fino pasante No.80 retenido No.200			
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(g)	300,25
C	Peso de la muestra seca	(g)	286,44
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	661,93
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	845,73
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	2,79
(A/A+D-E)	Gravedad específica de las partículas saturadas con superficie seca	---	2,58
(C/A+D-E)	Gravedad específica bulk de las partículas secas	---	2,46
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	4,82

5.3.1.4 Gravedad específica del polvo mineral (pasante del tamiz No.200)

Norma ASTM C128-12

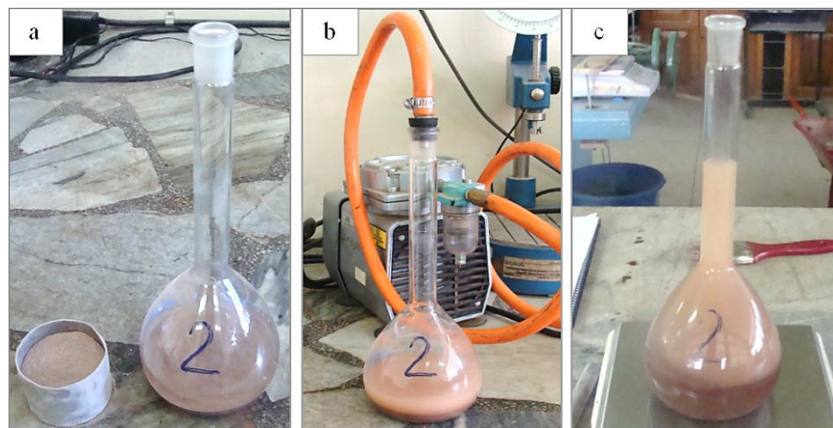
El polvo mineral o filler es un material necesario para el relleno de vacíos en los hormigones asfálticos (o cualquier tipo de hormigón), como mejorador de adherencia al par asfalto- agregado, de preferencia debe ser cal hidratada o polvo de roca (pasante del tamiz No.200), como lo define la NEVI 12 en la sección 405, literal 405-5.02.4. El ensayo se realiza mediante los dos métodos descritos por la Norma.

Método gravimétrico.- Es el mismo desarrollado en la determinación de la gravedad específica del agregado fino, salvo que no se considera la determinación de la superficie saturada seca de las partículas, por la finura de las partículas, es así que el ensayo se realiza con el material seco y como resultado da únicamente la gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas.

Equipo.- Horno, balanza digital de apreciación $\pm 0.1g$ o menos, termómetro, bomba para extracción de aire, tamiz No.200, picnómetro o matraz aforado, embudo, y recipiente metálico.

Procedimiento.- Se obtiene aproximadamente 90g de polvo mineral, pasante del tamiz No.200 (la Norma determina que puede utilizarse una cantidad distinta de $500g \pm 10g$ pero no menor a 50g), se lava y seca a una temperatura de $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$, hasta obtener una masa constante. Se calibra el picnómetro determinando el peso de éste lleno hasta su capacidad de calibración con agua destilada. Posteriormente se introducen los 60g de material (Fotografía 22a) en el picnómetro, luego se vierte agua destilada hasta que cubra la muestra totalmente. Se controla la temperatura $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ del agua de ensayo y se elimina el aire de entre las partículas con la bomba (Fotografía 22b) durante un período de 15 minutos mínimo, se agita el picnómetro cada 5 minutos hasta eliminar todo el aire.

Luego de este proceso se llena el picnómetro hasta la marca de aforo y se toma el peso del picnómetro más muestra y más agua (Fotografía 22c).



Fotografía 22. Polvo mineral dentro del picnómetro (a); extracción de aire con la bomba (b); peso del picnómetro, agua y muestra (c)

Cálculos y resultados.-

Tabla 13.

Gravedad específica aparente del polvo mineral

Datos	Unidad	Símbolo	Valor
Peso en el aire (muestra seca)	g	A	91,75
Peso Pic. + agua	g	B	658,12
Peso Pic. + agua + muestra	g	C	715,52
$\frac{A}{A + B - C}$			
Gravedad específica aparente			2,67

5.3.1.5 Resistencia a la abrasión del árido grueso

Norma ASTM C131.

Esta norma determina el desgaste del agregado natural o triturado inferior a 37,5 mm, al someterlo al choque con esferas de acero en la Máquina de los Ángeles.

El ensayo es de gran importancia, puesto que, los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida útil del pavimento.

La muestra de ensayo, para el tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " se define por la gradación tipo B (Tabla 14).

Tabla 14.
Gradación de las muestras de ensayo, resistencia a la abrasión

Abertura de Tamices (mm)		Masa (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	--	--	--
25,0	19,0	1 250 ± 25	--	--	--
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	--	--
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	--	--
9,5	6,3	--	--	2 500 ± 10	--
6,3	4,75	--	--	2 500 ± 10	--
4,75	2,36	--	--	--	5 000 ± 10
	Total	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

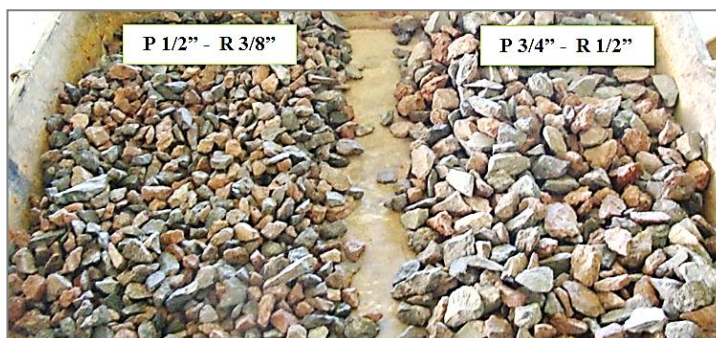
Fuente. Norma ASTM C131

Por consiguiente se necesitan 11 esferas de acero (Tabla 15) como carga abrasiva.

Tabla 15.
Especificaciones para la carga abrasiva

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

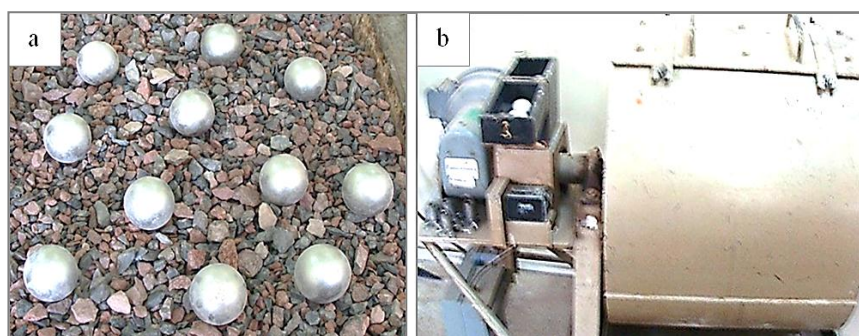
Fuente. Norma ASTM C131



Fotografía 23. Material para ensayo de abrasión

Equipo.- Horno, balanza digital de apreciación $\pm 0.1\text{g}$, Tamices (1/2", 3/8" y No.12), Máquina de los Ángeles, esferas de acero de diámetro 46.38mm y peso 390gr, bandejas y recipientes metálicos.

Procedimiento.- El material debe ser lavado y seco en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr una masa constante. Una vez fría la muestra se coloca en la Máquina de los Ángeles juntamente con las esferas (Fotografía 24) y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/min (30 y 33 r.p.m), deben completarse 500 vueltas.



Fotografía 24. Esferas de acero (a); Máquina de los Ángeles (b)

Luego de este proceso se descarga el material del cilindro y se separa la muestra ensayada mediante el tamiz No.12 (Fotografía 25), se descarta el material que pasa por dicho tamiz y el material retenido se lava y seca en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr una masa constante y se registra el peso.



Fotografía 25. Material tamizado por la malla No.12

Cálculos y resultados.- El resultado se expresa en porcentaje de desgaste.

Tabla 16.
Resultado del ensayo de resistencia a la abrasión

Resistencia a la abrasión de agregado grueso			
3/4" - 1/2"	Peso de la muestra seca pasante del tamiz 3/4" y retenida en el tamiz 1/2"	(g)	2501,20
1/2" - 3/8"	Peso de la muestra seca pasante del tamiz 1/2" y retenida en el tamiz 3/8"	(g)	2506,50
P1	Peso total de la muestra seca	(g)	5007,70
P2	Peso de la muestra lavada y seca retenida en el tamiz 12	(g)	3849,50
$((P1-P2))/P1*100$			
Desgaste del Agregado Grueso			(%) 23,13

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, volumen 3, página 419, tabla 405-5.1, el desgaste máximo permisible es de 40%, por lo tanto se considera al material con buena resistencia a la abrasión al resultar 23,13% de desgaste.

5.3.1.6 Equivalente de arena al tráfico pesado

Norma ASTM D2419.

Es empleado como un ensayo rápido de correlación en el campo, se determina la proporción relativa de finos plásticos o arcillas en el agregado fino menor de 4,75 mm (No.4). El término "equivalente de arena" se refiere a que la mayoría de agregados finos son mezclas de partículas gruesas, arena y arcillas indeseables.

Equipo.- Probeta cilíndrica de plástico graduada, con diámetro interior de 31.75 ± 0.381 mm (1¼ ± 0.015") y altura de 431.8 mm (17") aproximadamente, graduado en espacios de 2.54mm (0.1"), tapón de caucho, tubo irrigador, tubo flexible de plástico, varilla con sobrepeso, dispositivo de sifonado, un recipiente de medición de

capacidad 85 ± 5 ml (50g), un botellón de 3.785 litros, embudo de boca ancha, cronómetro, tamiz No. 4, solución floculante preparada (combinación de cloruro de calcio, glicerina, formaldehído, agua destilada en porcentajes normalizados).

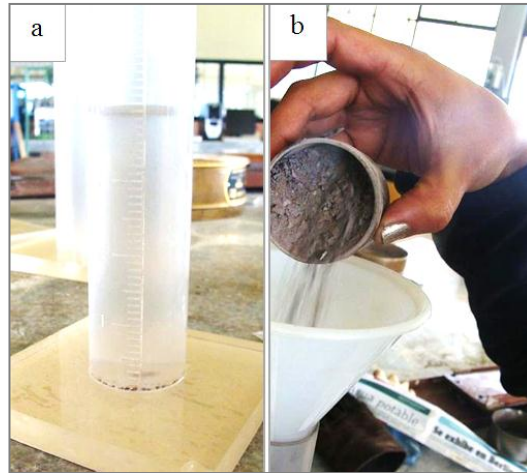


Fotografía 26. Equipo para equivalente de arena

Procedimiento manual.- Se selecciona aproximadamente 1500g de material natural (que no sea lavado) y que pase por el tamiz No.4, se desmenuza cualquier terrón que esté formado y manualmente se separa bruscamente los finos de las partículas más gruesas, frotándolas unas con otras. Se lleva la muestra al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta tener una masa constante. Verter la solución floculante en el cilindro graduado, hasta una altura de 101.6 ± 2.54 mm (4 ± 0.1 " (Fotografía 27a).

Con ayuda del embudo, se vierte la muestra de arena enrasada de 50g (recipiente de medición) en la probeta graduada (Fotografía 27b). Golpear varias veces el fondo del cilindro con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire. Dejar en reposo

durante 10 ± 1 minuto. Al finalizar este tiempo, tapar el cilindro con el tapón y remover el material del fondo invirtiendo el cilindro.



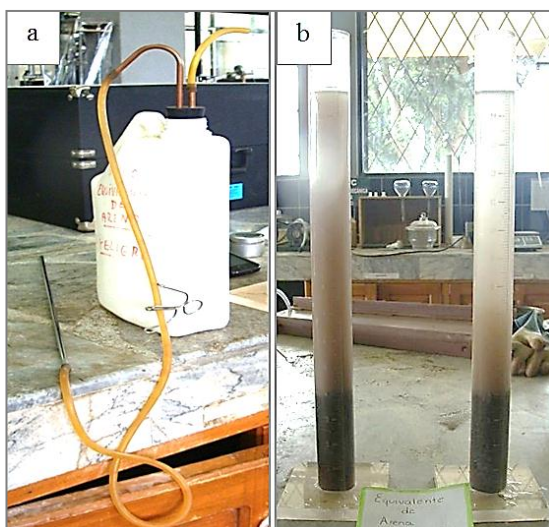
Fotografía 27. Solución floculante $h=4$ "(a); muestra dentro de la probeta (b)

Enseguida se sostiene la probeta cilíndrica en posición horizontal y se agita vigorosamente en forma lineal de extremo a extremo hasta completar 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos empleando un recorrido de 9 ± 1 pulgadas. Una vez realizada la operación de agitado, se coloca verticalmente la probeta sobre la mesa de trabajo y se le retira el tapón.

Proceso de irrigación.- Se mantiene la probeta en posición vertical asentada en la mesa de trabajo. Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro, y utilizando el dispositivo de sifonado (Fotografía 28a) se afloja la pinza de la manguera y se lava el material de las paredes de la probeta hasta llegar al fondo del cilindro atravesando el material.

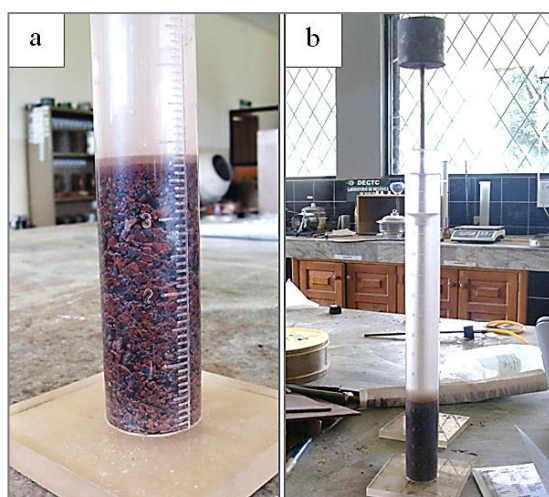
Se aplica una suave presión y giro mientras que la solución floculante fluye por el tubo irrigador (Esta acción impulsa hacia arriba el material fino del fondo y lo pone en suspensión sobre las partículas gruesas de arena), en la irrigación la probeta

debe llenarse hasta 15" y se deja en reposo por $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$ (Fotografía 28b), el tiempo se cuenta inmediatamente después de retirar el tubo irrigador.



Fotografía 28. Dispositivo de sifonado (a); muestra en sedimentación (b)

Al final el período de sedimentación se lee y anota el nivel de la parte superior de la arcilla suspendida (Fotografía 29a). Luego se coloca el conjunto del disco, la varilla y el sobrepeso dentro de la probeta (Fotografía 29b), se debe llegar suavemente sobre la arena. Una vez que el conjunto toca la arena, leer y anotar la marca que indica de la ranura del tornillo, esta será la lectura de arena.



Fotografía 29. Lectura de arcilla suspendida (a); lectura de arena (b)

Cálculos y resultados.-

Tabla 17.
Resultados de equivalente de arena

Determinación de equivalente de arena				
			M1	M2
h1	Arcilla	(plg)	3,90	4,20
h2	Arena	(plg)	13,70	14,00
h3=h2-10 plg	Arena final	(plg)	3,70	4,00
%EQ=(h3/h1)*100				
EQ	Equivalente de arena	(%)	94,87	95,24
Promedio	Equivalente de arena	(%)	95,05	

Según lo dispuesto en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI 12, volumen 3, pagina 419, tabla 405-5.4 que determina ara un tráfico en Ejes Equivalentes (millones) > 3-30 corresponde un valor mínimo de 50%, por lo tanto el resultado de este ensayo de 95,05% se encuentra dentro de la norma.

5.3.2. Cemento asfáltico

La caracterización del cemento asfáltico consta de varios ensayos de fácil ejecución que determinan su comportamiento en la mezcla asfáltica, este comportamiento puede producirse a escala real, para que cumplan con las exigencias de calidad del asfalto.

5.3.2.1. Gravedad específica

Norma ASTM D70.

Normalmente no se requiere determinar este dato en el laboratorio (puesto que el AC-20 es el único producido en el Ecuador), sin embargo, es necesario conocer la

gravedad específica de la asfalto con el que se está trabajando, puesto que puede cambiar (no en gran porcentaje) debido a factores como la temperatura y tipo de almacenaje.

La gravedad específica es la relación del peso de un volumen determinado de asfalto y el peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a una temperatura de 25°C, todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen al variar la temperatura. Se contraen cuando se enfrían y se expansiona cuando se calientan.

Equipo.- Horno, picnómetro con tapón de vidrio (50ml), baño de agua a 25°C±1°C en recipiente de vidrio o aluminio, termómetro, balanza digital de apreciación ± 0.01g.

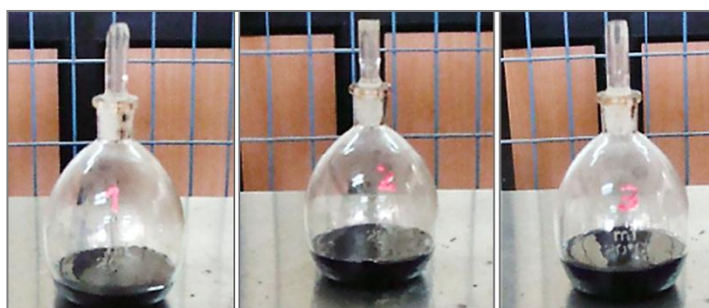
Procedimiento.- Se toma el peso del picnómetro (perfectamente limpio) más tapón de vidrio (Fotografía 30b).

Se realiza la calibración del picnómetro se lo lleva al baño de agua a 25°C, hasta que el picnómetro este completamente sumergido librando el cuello (Fotografía 30a) y se vierte dentro de él agua destilada hasta donde empieza el cuello del picnómetro, se coloca suavemente el tapón de vidrio, teniendo cuidado de no atrapar aire, y se lo deja por un mínimo de 30 minutos hasta que el conjunto alcance 25°C. Luego de este proceso se retira del baño, se seca la parte exterior y se toma el peso del conjunto (Fotografía 30c).



Fotografía 30. Baño de agua 25°C (a); peso del picnómetro más tapón (b); peso del picnómetro más tapón y más agua (c)

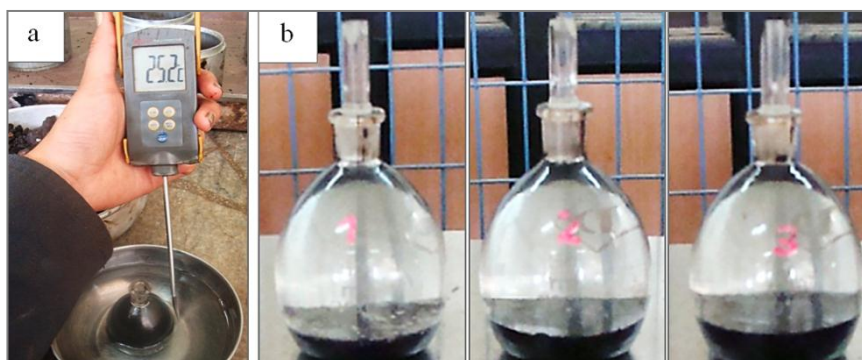
Posterior a esto se realiza la preparación de la muestra, se calienta el asfalto hasta lograr una viscosidad fluida y manejable (110°C en el horno), evitando el sobrecalentamiento. Se vierte el asfalto dentro del picnómetro (completamente seco) aproximadamente una cantidad de $\frac{3}{4}$ de capacidad, sin tocar las paredes ni el cuello y con precaución de que no se formen burbujas de aire (Fotografía 31).



Fotografía 31. Asfalto aproximadamente a $\frac{1}{3}$ de capacidad del picnómetro

Se deja enfriar el picnómetro y el asfalto hasta lograr una temperatura ambiente, luego de este período pesar el picnómetro más asfalto, más tapón. Se lleva nuevamente el picnómetro y asfalto al baño de agua a 25°C (Fotografía 32a) y se llena con agua destilada hasta la marca, se coloca suavemente el tapón, evitando que ingresen burbujas de aire, se deja 30 minutos en el baño hasta que el conjunto tenga

la temperatura de 25°C, luego de este período se retira del baño, se seca exteriormente el picnómetro y se toma el peso (Fotografía 32b).



Fotografía 32. Muestra en baño de agua 25°C (a); Picnómetro más muestra y agua (b)

Cálculos y resultados.-

Tabla 18.

Resultado del peso específico del asfalto

Pesos	Muestras			
		m1	m1	m2
Peso del picnómetro	g a	18,72	18,29	18,92
Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca	g b	68,71	68,34	68,13
Peso del picnómetro + asfalto	g c	27,21	29,11	32,01
Peso del picnómetro +asfalto + agua hasta la marca	g d	68,76	68,41	68,23
$(c - a)$				
$\frac{(b - a) - (d - c)}{(c - a)}$		1,0059	1,0065	1,0077
Gravedad específica			1,01	

5.3.2.2. Penetración

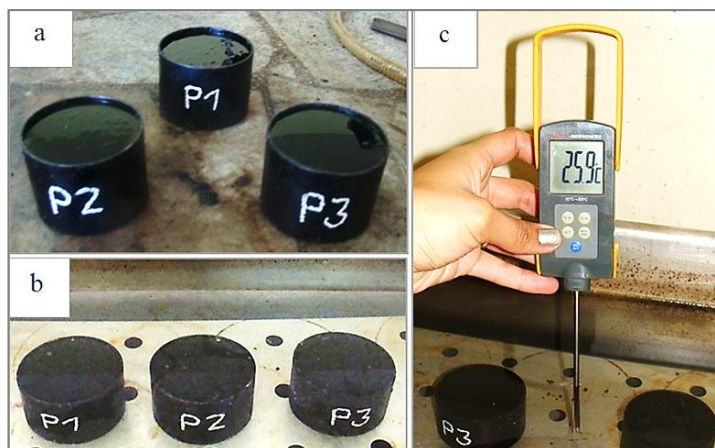
Norma ASTM D5.

Este ensayo permite determinar la dureza o consistencia relativa del asfalto. Se mide la distancia (expresada en décimas de milímetro) que recorre una aguja normalizada al penetrar verticalmente en una muestra del asfalto a una cierta temperatura, carga y tiempo. Si no se mencionan específicamente estas condiciones,

la penetración se realiza a 25°C, 100g de carga y 5s como el tiempo de aplicación de carga. La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal; lógicamente cuanto más blando sea el asfalto mayor es la penetración. Los asfaltos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración.

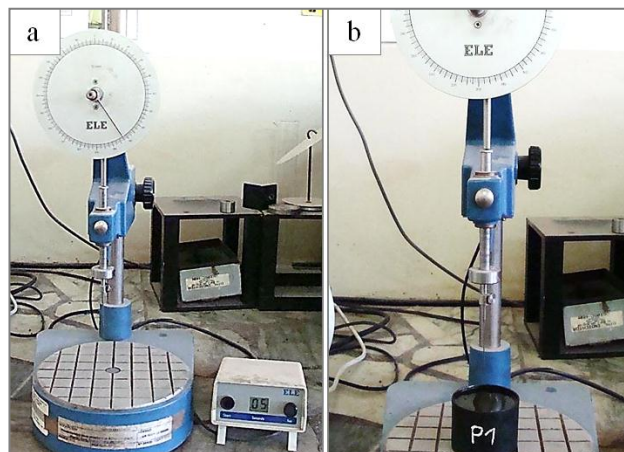
Equipo.- Horno, penetrómetro, contador eléctrico, aguja de penetración, recipientes metálicos cilíndricos y de fondo plano (diámetro 55mm y profundidad 35mm) para colocar la muestra, Baño de agua María, termómetro.

Procedimiento.- Se calienta el asfalto con cuidado y se vierte en los recipientes metálicos evitando la inclusión de aire, se debe tener cuidado de no poner hasta el borde del recipiente el asfalto (Fotografía 33a). Luego se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente durante 1 a 1.5 hora hasta lograr una temperatura de 25°C (puede tomarse la temperatura introduciendo el termómetro en medio de la muestra), se tapa con papel o vidrio para que no ingrese polvo mientras se enfría. Para mantener la muestra a 25°C se sumerge en el baño de agua hasta realizar el ensayo (Fotografía 33b).



Fotografía 33. Muestras calientes de asfalto (a); muestras en baño de agua (b), control de temperatura hasta lograr $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ (c)

Se verifica que el vástago del penetrómetro que soporta la aguja se deslice sin ninguna complicación. Se coloca la aguja y la carga de 50g, para que sume en conjunto con los accesorios 100g, el contador debe estar programado a 5s, luego de comprobar el estado del penetrómetro (Fotografía 34a), se va colocando una a una las muestras en la base (Fotografía 34b).



Fotografía 34. Penetrómetro listo para el ensayo (a); Muestra a ensayar (b)

Se aproxima la aguja desplazando el vástago hasta que la punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre, se encera manualmente el marcador y se da carga. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro.

Se realiza mínimo tres penetraciones en cada recipiente, en diferentes puntos de la superficie, no deben hacerse penetraciones en el centro, cada punto debe estar separado, como mínimo, 10 mm del otro y de las paredes del recipiente. Terminada cada penetración, se desmonta el vástago con la aguja y se limpia con un trapo humedecido con cualquier líquido disolvente.

Cálculos y resultados.-

Tabla 19.
Resultados de ensayo de penetración

Lectura (mm/10)	Muestra		
	P1	P2	P3
1	52	54	55
2	55	55,5	52
3	55	56,5	54
4	57	55	55,5
Promedio	54,8	55,3	54,1
Valor final	54,71		

El valor mínimo permitido para un asfalto AC-20 en el ensayo de penetración es 40 mm/10 (Tabla 19) de esta manera se comprueba que el resultado obtenido de 54,71 cumple con la norma.

Tabla 20.
Valores de ensayos para un asfalto de grado de viscosidad 60°C

Norma	Ensayo	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
ASTM D2171	Viscosidad, 60°C (Pa.s)	25±5	50±10	100±20	200±40	300±60	400±80
ASTM D2170	Viscosidad, 135°C, min, (mm ² /s)	80	110	150	210	250	300
ASTM D5	Penetración, 25°C, 100g, 5s, min.	200	120	70	40	30	20

Fuente. Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, volumen 3, página 885, tabla 810-3.4

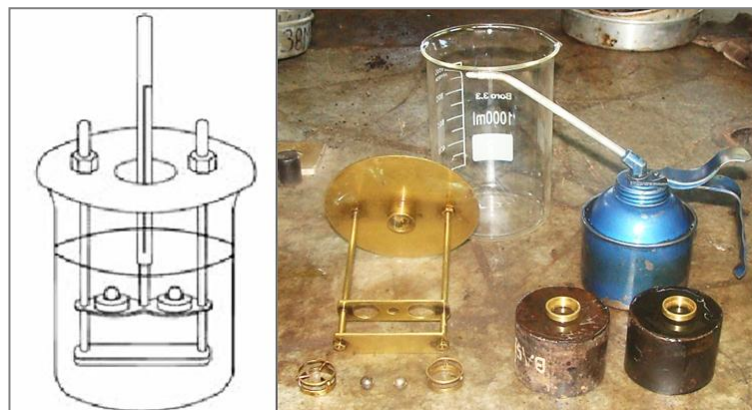
5.3.2.3. Punto de ablandamiento

Norma ASTM D36.

El objetivo de este ensayo es determinar si la fluencia de un asfalto es lenta y excesivamente gruesa o de fluencia líquida y menos viscosa, estos cambios imperceptibles en obra se dan por las variaciones de temperatura. Este ensayo mide

de forma indirecta la consistencia y la temperatura de equiviscosidad en las condiciones específicas de ensayo. Junto al ensayo de penetración a 25° C, se puede calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor cuan susceptible es el asfalto ensayado.

Equipo.- Anillos de bronce, guías para centrar las esferas y montaje completo, platos o elementos base, esferas de acero de 9.5mm de diámetro, (peso de cada una 3.5 g), vaso de precipitación capacidad 1000 ml, termómetro, aceitero y un recipiente grande de aluminio para realizar el baño de agua helada.



Fotografía 35. Equipo punto de ablandamiento

Procedimiento.- Calentar el asfalto hasta lograr una viscosidad manejable (evitando el sobrecalentamiento) para verterlo con un ligero exceso dentro de los anillos de bronce (Fotografía 36), previamente calentados a la misma temperatura del asfalto, teniendo cuidado de no introducir burbujas de aire.

La base en la que se colocada cada anillo debe estar previamente aceitada para evitar que al enfriarse la muestra quede pegada a dicha base, el período de enfriamiento debe ser mínimo de 30 minutos a temperatura ambiente, en ningún caso debe transcurrir más de 240 minutos hasta que se complete el ensayo.



Fotografía 36. Muestra preparada, anillos con asfalto

Se realiza el montaje del sistema, colocando los anillos con las muestras de asfalto y las guías con las esferas sobre los anillos dentro del vaso de precipitación, éste debe ser llenado con agua destilada hasta una altura entre 101,6 y 108 mm, se coloca todo el conjunto dentro del recipiente de aluminio que contiene el agua con hielo.



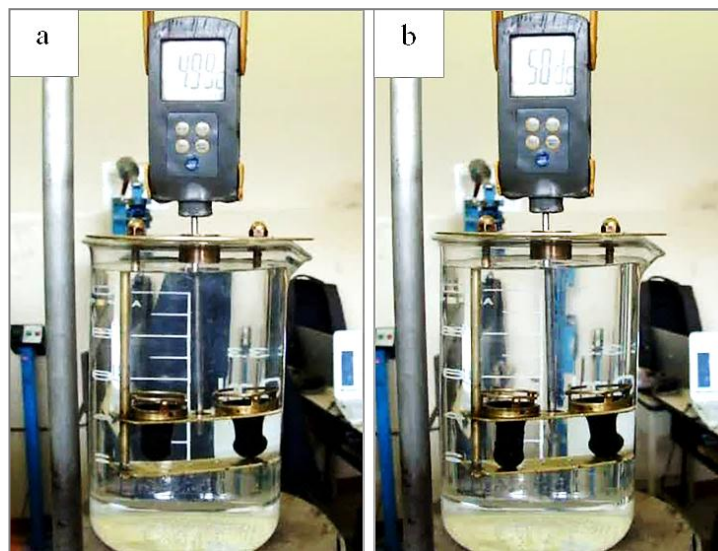
Fotografía 37. Sistema completo colocado dentro del agua con hielo

Con el termómetro ubicado en la parte superior se controla la temperatura del agua destilada hasta llegar a $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 15 minutos.



Fotografía 38. Control de temperatura hasta llegar a $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$

Posteriormente se calienta el conjunto del vaso, agua y sistema de soporte de esferas en forma pausada, hasta lograr que la temperatura se eleve constantemente a $5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. Se anota la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que cada esfera rodeada de asfalto toca el fondo de bronce.



Fotografía 39. Primera esfera en el fondo (a); segunda esfera en el fondo (b)

Cálculos y resultados.-

Tabla 21.

Resultado del ensayo-punto de ablandamiento

Temperatura	Esferas de acero	
Lectura ($^{\circ}\text{C}$)	1	2
1	49,9	50,1
Promedio	50,0 $^{\circ}\text{C}$	

La Norma Ecuatoriana Vial NEVI12 no especifica el rango al que debe darse este ensayo para un asfalto AC-20, por lo que se toma lo establecido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP (MOP, 2002); el punto de reblandecimiento debe ocurrir a menos de 60°C , tomando en cuenta este valor el resultado del ensayo es correcto.

5.3.2.4. Índice de penetración

Es un valor que se calcula a partir de los valores de penetración en mm/10 a 25°C, 100g y 5s y del punto de ablandamiento, °C. Con este índice se puede medir la susceptibilidad del asfalto a la temperatura e identificar su comportamiento.

Cuando se tiene un $IP < -1$ tenemos cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso, mientras que los asfaltos con índices elevados $IP > +1$ son poco susceptibles a la temperatura. Los asfaltos empleados en carretera tienen índices de penetración comprendidos entre +1 y -1.

El cálculo del IP se obtiene mediante las siguientes expresiones:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log Pen}{Tab - 25} \right]; \quad IP = \frac{20 - 10 * A}{A + 1}$$

En el presente proyecto se tiene como resultado del ensayo de penetración 54,71mm/10 y del ensayo de punto de ablandamiento 50°C, al remplazar en las anteriores ecuaciones se tiene:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log 54,71}{50 - 25} \right]; \quad A = 2,33$$

$$IP = \frac{20 - 10 * 2,33}{2,33 + 1}; \quad IP = -0,99$$

La norma ecuatoriana vial NEVI-12 no presenta un rango de aceptación del Índice de penetración, por lo que se toma en cuenta los valores establecidos por el MTOP (MOP, 2002), este rango es entre -1.5 a +1.5, por lo tanto el valor -0,99 es aceptable y señala que el asfalto tiene un buen comportamiento.

5.3.3. Elastómero

En las mezclas asfálticas modificadas diseñadas en este proyecto se utiliza partículas de elastómero que pasan el tamiz No.10 y se retienen en el tamiz No.40 (Fotografía 40).



Fotografía 40. Partículas de elastómero PNo.10-RNo.40

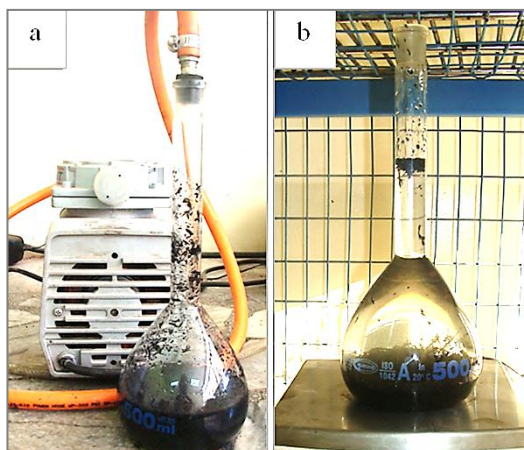
5.3.3.1. Gravedad específica

Se aplica el mismo procedimiento que se usa para el cálculo de la gravedad específica del polvo mineral.

Equipo.- Balanza digital de apreciación $\pm 0.1g$ o menos, termómetro, bomba para extracción de aire, tamices No.10 y No.40, picnómetro o matraz aforado, embudo, y recipiente metálico.

Procedimiento.- Se pesa 50g de partículas de elastómero del tamaño descrito, (la Norma determina que puede utilizarse una cantidad distinta de $500g \pm 10g$ pero no menor a 50g). Se calibra el picnómetro determinando el peso de éste lleno hasta su marca de aforo con agua destilada $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$. Posteriormente se introducen los 50g de material en el picnómetro, luego se vierte agua destilada hasta que cubra la muestra totalmente. Se elimina el aire de entre las partículas con la bomba (Fotografía 41a) durante un período mínimo de 15 minutos, se agita el picnómetro

cada 5 minutos hasta eliminar todo el aire. Luego de este proceso se llena el picnómetro hasta la marca de aforo y se toma el peso del picnómetro más muestra y más agua (Fotografía 41b).



Fotografía 41. Extracción de aire de la muestra (a); peso del picnómetro, agua y muestra (b)

Cálculos y resultados.-

Tabla 22.

Gravedad específica de las partículas de elastómero

Material pasante No.10- retenido No.40			
C	Peso de la muestra seca	(g)	50,00
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	658,63
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	662,64
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	1,09

5.3.3.2. Reacción a la temperatura

Es un ensayo para evidenciar de manera física y visual si el material sufre cambios bruscos al ser sometido a la temperatura de mezclado en la elaboración de briquetas, o si cambia en algún momento de estado sólido a líquido.

Equipo.- Horno, recipientes metálicos pequeños, termómetro.

Procedimiento.- Se calienta el horno a una temperatura aproximadamente igual a la temperatura de mezcla del hormigón asfáltico, entre 140°C y 160°C, se coloca una cierta cantidad de partículas de elastómero en el recipiente metálico y se introduce al horno por un período de 20 minutos.



Fotografía 42. Muestra de partículas de elastómero a ensayar (a); muestra en el horno a 150°C (b); partículas adheridas entre sí luego del período en el horno (c).

Resultados.- Se observa que, luego del período en el horno 150°C, las partículas más finas de elastómero se adhieren a las más grandes, puesto que el material no es homogéneo en la forma de sus partículas; esto indica que deben colocarse dispersamente junto con el agregado y llevarlos a calentar al horno antes de verter el asfalto y realizar la mezcla, por otra parte se determina que el elastómero no cambia a estado líquido, es decir, no fluye.

5.3.4. Tereftalato de Polietileno Reciclado RPET

En las mezclas asfálticas modificadas diseñadas en este proyecto se utiliza tereftalato de polietileno reciclado RPET en forma de escarcha que pase el tamiz No.10 y que retiene el tamiz No.40 (Fotografía 43).



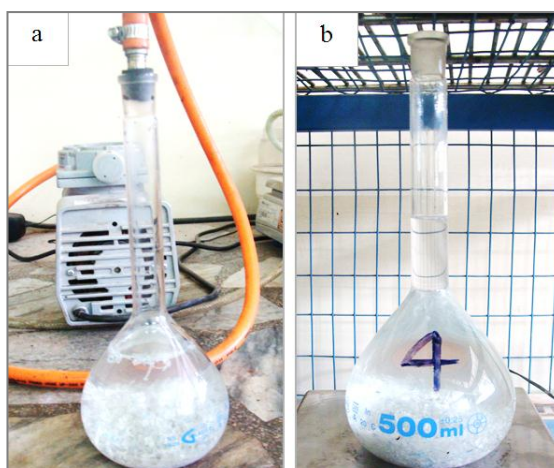
Fotografía 43. Escarcha de RPET P No.10-R No.40

5.3.4.1. Gravedad específica

Se aplica el mismo procedimiento para el cálculo de la gravedad específica del polvo mineral.

Equipo.- Balanza digital de apreciación $\pm 0.1g$ o menos, termómetro, bomba para extracción de aire, tamices No.10 y No.40, picnómetro o matraz aforado, embudo, y recipiente metálico.

Procedimiento.- Se pesa 50g de escarcha de RPET del tamaño descrito, (la Norma determina que puede utilizarse una cantidad distinta de $500g \pm 10g$ pero no menor a 50g). Se calibra el picnómetro, llenándolo con agua destilada $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ hasta su marca de aforo y se determina su peso. Posteriormente se introducen los 50g de material en el picnómetro, luego se vierte agua destilada hasta que cubra la muestra totalmente. Se elimina el aire de entre las partículas con la bomba (Fotografía 44a) durante un período mínimo de 15 minutos, se agita el picnómetro cada 5 minutos hasta eliminar todo el aire. Luego de este proceso se llena el picnómetro hasta la marca de aforo y se toma el peso del picnómetro más muestra y más agua (Fotografía 44b).



Fotografía 44. Extracción de aire de la muestra (a); peso del picnómetro, agua y muestra (b)

Cálculos y resultados.-

Tabla 23.
Gravedad específica de la escarcha de RPET

Material pasante No.10 retenido No.40			
C	Peso de la muestra seca	(g)	50,00
D	Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	663,31
E	Peso del picnómetro lleno con la muestra saturada	(g)	676,23
(C/C+D-E)	Gravedad específica aparente del material impermeable de las partículas	---	1,35

En el Capítulo 4 literal 4.2.2, la Tabla 8 define la densidad del PET en el rango de 1.22 – 1.40 g/cm³, considerando que en términos de gravedad específica no varía el valor en gran porcentaje, el resultado obtenido de 1,35 se encuentra dentro del rango mencionado.

5.3.4.2. Reacción a la temperatura

Equipo.- Horno, recipientes metálicos pequeños, termómetro.

Procedimiento.- Se calienta el horno a una temperatura aproximadamente igual a la temperatura de mezcla del hormigón asfáltico, entre 140°C y 160°C, se coloca una

cierta cantidad de escarchas de RPET en el recipiente metálico y se introduce al horno por un período de 20 minutos.



Fotografía 45. Muestra de escarcha de RPET a ensayar (a); muestra en el horno a 150°C (b); escarcha luego del período en el horno (c)

Resultados.- Luego del período en el horno, la escarcha de RPET no cambia de forma ni dureza, puesto que su temperatura de fusión es de 255°C, y en ningún caso el proceso de mezclado llega a esta temperatura, las partículas no se adhieren entre sí y no pasa de estado sólido a líquido.

5.4. Método de Diseño Marshall

Se aplica al diseño de mezclas asfálticas en caliente, su objetivo principal es determinar el contenido óptimo de asfalto para una gradación específica de agregados, provee todos los criterios de análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, analiza densidades y contenidos óptimos de vacíos que influyen en el comportamiento final de la mezcla. Puede ser usado tanto para el diseño de mezclas en laboratorio como para el control de calidad en campo.

5.4.1. Mezcla asfáltica normal - Briquetas patrón

Se entiende como briquetas patrón a aquellas que se elaboran sin aditivo alguno, en su composición interviene; material pétreo, cemento asfáltico y polvo mineral.

5.4.1.1. Estabilización granulométrica

En el diseño de una mezcla asfáltica debe emplearse una correcta gradación del material pétreo, de esta manera se garantiza su calidad; Es por esto que se realiza la estabilización granulométrica (Tabla 24), inicialmente se establecen valores que se mantengan en el centro de los límites de la Mezcla Asfáltica Normal MAC-2, y posteriormente se varía de acuerdo a los resultados obtenidos, considerando los criterios de la “Evaluación y ajuste de una mezcla de diseño” descritos en el Capítulo 2.

Tabla 24.
Estabilización granulométrica

Malla	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°10	N°40	N°80	N°200	P N°200
Abertura (mm)	19,0	12,50	9,50	4,75	2,00	0,425	0,18	0,075		
Especificación NEVI	100	80,00	70,00	51,00	38,00	17,00	8,00	5,00		
MAC 2	100	100	88,00	68,00	52,00	28,00	17,00	8,00		
Pasante - Agregado Grueso (%)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Pasante - Agregado Fino (%)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Pasante - Mezcla (%)	100	85,00	75,00	56,00	43,00	22,00	12,50	6,00		(Ver fig. 12)
Retenido Acumulado Mezcla (%)	0,00	15,00	25,00	44,00	57,00	78,00	87,50	94,00	100	
Total Muestra (g)						1050,00				
Retenido Acumulado Mezcla(g)	0,00	157,5	262,5	462,0	598,5	819,0	918,75	987,0	1050	
Retenido Parcial Mezcla (g)	0,00	157,5	105,0	199,5	136,5	220,5	99,75	68,25	63,00	
Porcentaje por tamaño de agregado				44			56			

Luego de ciertas iteraciones en la gradación del material pétreo se determina que, la mezcla patrón obtenida contiene 44% de agregado grueso y 56% de agregado fino.

De esta manera se tiene los valores reales de mezcla, que se presentan a continuación:

Tabla 26.
Porcentajes reales de mezcla

Malla	1"	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°10	N°40	N°80	N°200	P N°200
Abertura (mm)		19,00	12,50	9,50	4,75	2,00	0,425	0,18	0,075	
Especificación NEVI		100,00	80,00	70,00	51,00	38,00	17,00	8,00	5,00	
MAC 2		100,00	100,00	88,00	68,00	52,00	28,00	17,00	8,00	
Pasante - Agregado Grueso (%)		100,00	70,35	42,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pasante - Agregado Fino (%)		100,00	100,00	100,00	100,00	76,75	39,19	25,15	11,62	
Pasante - Mezcla de agregado grueso + fino (%)		100,00	86,95	74,85	56,00	42,98	21,94	14,08	6,51	(Ver fig. 13 y 14)
Retenido Acumulado Mezcla (%)		0,00	13,05	25,15	44,00	57,02	78,06	85,92	93,49	100,00
Total Muestra (g)						1050,00				
Retenido Acumulado Mezcla (g)		0,00	136,98	264,07	462,00	598,69	819,58	902,13	981,69	1050,00
Retenido Parcial Mezcla (g)		0,00	136,98	127,09	197,93	136,69	220,89	82,55	79,56	68,31

Con estos valores se tienen la curva granulométrica real utilizada en el diseño.

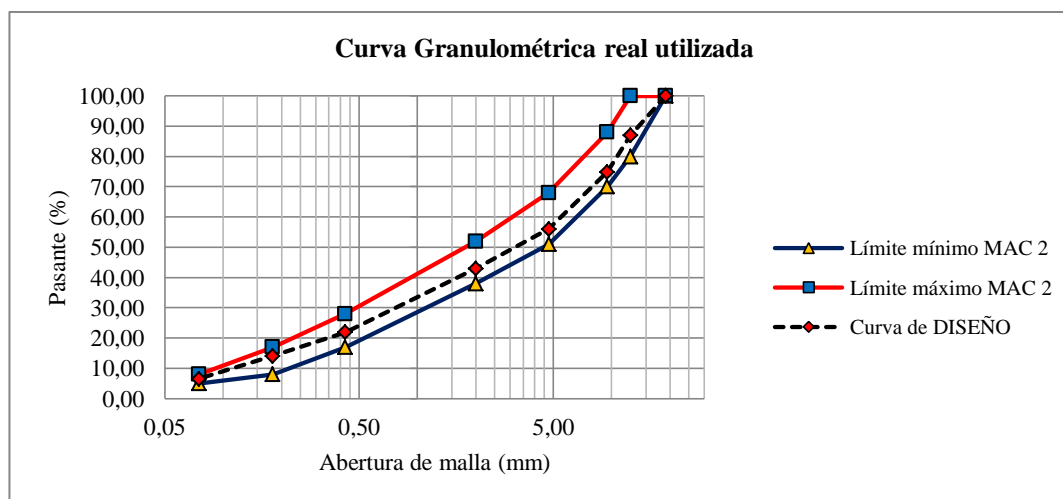


Gráfico 3. Curva granulométrica real utilizada

En la siguiente figura se expresan, de manera más detallada, los porcentajes que pasan por cada una de las mallas utilizadas:

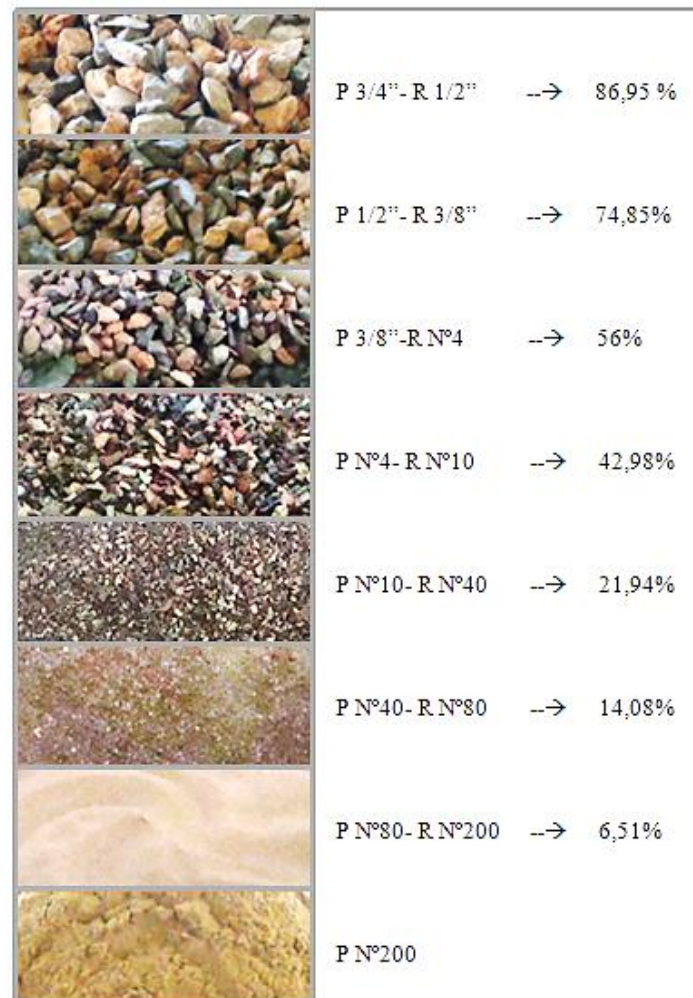


Figura 11. Granulometría para diseño de mezcla asfáltica

Es importante aclarar el por qué se utiliza en la mezcla de agregados 1050 g para todas las briquetas elaboradas en diseño.

Inicialmente se elaboran mezclas con 1200 g de agregado, que es lo más utilizado para realizar briquetas en laboratorio. Posteriormente se hace la corrección de altura de los especímenes (Instituto del Asfalto, Métodos de diseño de mezclas, 1997) con relación al peso de la mezcla de agregados, puesto que el factor de corrección para el

análisis de estabilidad es 1 (uno) cuando la altura de la briqueta alcanza los 63,5 mm. Se pretende obtener valores iguales o cercanos a esta altura para obtener el mínimo factor de corrección en el valor de la estabilidad.

Este análisis no es obligatorio para todos los diseños de mezclas asfálticas, depende del criterio del diseñador. Se utiliza la siguiente relación:

$$\text{Peso ideal de agregado} = \frac{63,5 \text{ mm} * (\text{peso actual de agregado})}{\text{altura de briqueta obtenida}}$$

$$\text{Peso ideal de agregado} = \frac{63,5 \text{ mm} * (1200 \text{ g})}{70 \text{ mm}}$$

$$\text{Peso ideal de agregado} = 1088,57 \text{ g} \rightarrow 1050 \text{ g}$$

Como peso ideal de agregados se obtiene 1088,57 g sin embargo, se elige 1050g, puesto que, por pruebas realizadas, el material modificador (elastómero y PET) esponjan la briqueta.

5.4.1.2. Elaboración de briquetas

Norma ASTM D 6926.

Se debe elaborar tres especímenes, de 64 x 102 mm de diámetro, por cada porcentaje de asfalto y con la misma gradación de material pétreo.

Los porcentajes de asfalto utilizados van desde 5% hasta 7% con intervalos de 0.5%, es decir 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%, deben ser mínimo cinco valores para generar los puntos suficientes en las curvas de análisis.

Equipo.-

Martillo de Compactación.- Consistente en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporciona una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06 "). Naturalmente se dispone con su respectivo pedestal de compactación.

Moldes de compactación.- Consistente en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y una altura interna aproximada de 75 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión son ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde.

Horno.- Provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida.

Fuentes metálicas.- Para realizar las mezclas, con una capacidad de volumen que facilite el proceso de mezclado, evitando que se desperdicie material.

Cocineta.- Provista de las conexiones adecuadas de gas.

Balanza digital.- Con capacidad de cinco (5) kg, sensible a un (1) g, o menos.

Termómetro blindado.- De 9.9° C a 204° C (50° F a 400° F), con sensibilidad de 2.8° C.

Recipientes metálicos.- Con la capacidad suficiente para colocar la combinación de material pétreo y llevarlo a calentar al horno.

Palustre.- O espátula metálica.

Aceitero y Tijeras

Procedimiento.-

Una vez lavado y seco el material (hasta lograr una masa constante), se prepara la combinación de agregados. Se pesan las cantidades predeterminadas en la Tabla 36.



Fotografía 46. Mezcla de agregados, 5 muestras

Se lleva las muestras al horno hasta que el agregado alcance una temperatura entre 150°C y 165°C (puede estar hasta 28°C por encima de la temperatura de mezclado). Serán en total 15 muestras. Se lleva al horno el cemento asfáltico hasta lograr una viscosidad fluida, debe tener la misma temperatura de mezclado, entre 140°C y 150°C.

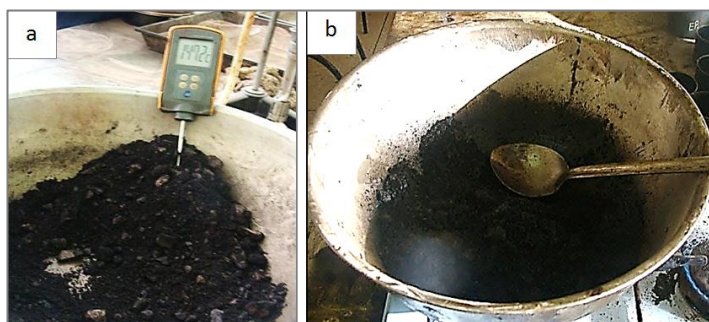
Se limpia, aceita y calienta los moldes de compactación a una temperatura entre 95°C y 150°C (200°F y 300°F), en la placa base del molde se coloca papel filtro (de forma circular) aceitado para evitar que la mezcla asfáltica se adhiera a la placa.

En una fuente metálica se coloca el material pétreo caliente y se forma un cráter en la mitad para verter el asfalto necesario en cada porcentaje (Fotografía 47), es importante aclarar que el porcentaje de asfalto se da con relación al peso de material pétreo y no al peso total de la mezcla asfáltica.



Fotografía 47. Vertiendo el asfalto a la mezcla de agregados

Se lleva el agregado junto con el asfalto a la cocineta y se mezcla rápidamente controlando la temperatura de mezclado (Fotografía 48a) en el rango de 140°C a 150°C.



Fotografía 48. Control de temperatura en la mezcla (a); partículas totalmente cubiertas de asfalto (b)

El tiempo de mezclado debe ser entre los 3 y 5 minutos para evitar que el asfalto se queme, en el proceso se debe evitar los sobrecalentamientos locales, hasta el punto de obtener una mezcla homogénea (Fotografía 48b), todas las partículas de agregado deben quedar cubiertas por el asfalto. Inmediatamente después se coloca la mezcla en el molde de compactación (caliente) con la ayuda de un embudo o simplemente con una cuchara grande, se vierte con cuidado todo el material evitando que haya desperdicios. Se remueve la mezcla 25 veces con el palustre (Fotografía 49), 15 alrededor del perímetro interno del molde y 10 en el centro del material.



Fotografía 49. Golpes del palustre contra la mezcla en el molde

Una vez terminado este proceso, se coloca papel filtro en el tope de la mezcla y se coloca al conjunto sobre el pedestal de compactación y se sujeta con precaución el molde.

La base plana circular del martillo, debidamente aceitada, debe calentarse y se coloca el martillo compactador perpendicularmente a la mezcla, se aplican los seguros necesarios y se da carga. Para este proyecto se considera un diseño de alto tráfico, puesto que se aplica 75 golpes en cada cara de la briqueta.

Finalmente se identifica las briquetas y se las deja enfriar a temperatura ambiente, en el mismo molde, durante un período de tiempo, mínimo una noche y máximo 24 horas, antes de ser ensayadas.



Fotografía 50. Briquetas compactadas en período de enfriamiento

5.4.1.3. Determinación de la Densidad Bulk (Gmb) de las mezclas compactadas

Norma ASTM D 2726.

La densidad Bulk de mezclas compactadas es uno de los factores más importantes en el diseño, puesto que su valor influye netamente en la determinación del porcentaje de vacíos en las briquetas. El objetivo principal de este ensayo es calcular el volumen de cada briketa, con el que se calcula la densidad Bulk.

Equipo.-

Extractor de muestras (especímenes).- Con un disco de 100 mm (3.95") de diámetro y 13 mm (0.5") de espesor, y una gata hidráulica para transferir la carga al espécimen.

Balanza digital.- Capacidad de 2 kg, sensible a 0.1 g. Con su respectiva canastilla de inmersión.

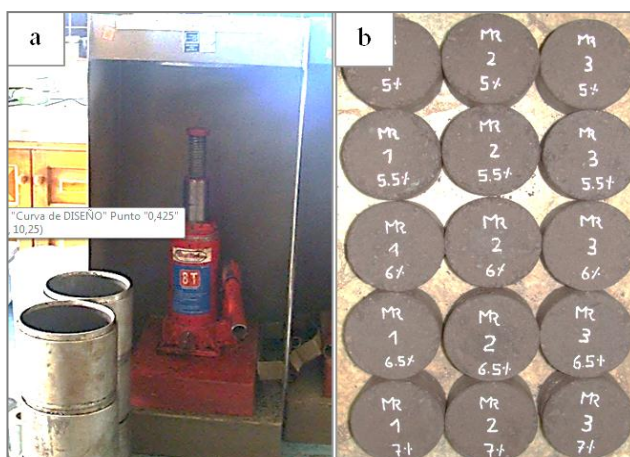
Tanque para agua.- De 152.4 mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $25^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C.

Papel absorbente.- Papel periódico o cualquier otro que cumpla la función de absorber el agua superficial de las briquetas.

Calentador eléctrico de agua, termómetro y cronómetro.

Procedimiento.-

Una vez cumplido el período de enfriamiento, las briquetas son retiradas del molde mediante el extractor de muestras (Fotografía 51a).



Fotografía 51. Extractor de muestras (a); briquetas fuera del molde (b)

Se debe tener mucho cuidado en el proceso para que no exista desperdicio de material y sobre todo que la manipulación no afecte la consistencia ni las propiedades de la briqueta.

Se procede a tomar el peso en seco (P_a) de cada una de las briquetas en la balanza digital y posteriormente se toma el peso sumergido (P_{sum}) (Fotografía 52), teniendo en cuenta que el agua del tanque debe estar a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, el tiempo que se espera para tomar el peso es de 10 a 15 minutos en el agua, hasta que la balanza se estabilice.



Fotografía 52. Lectura del peso sumergido – agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

Luego de este período se retira la briqueta del agua y se seca superficialmente, para esto se usa, de preferencia, papel periódico. Se toma el valor del peso de la briqueta en estado superficie saturada seca (SSS).



Fotografía 53. Se retira el agua superficial de la briqueta

Cálculos.-

Para determinar la densidad Bulk (G_{mb}) de las mezclas compactadas se utiliza las siguientes relaciones:

$$G_{mb} = \frac{P_a}{Vol}; \quad Vol = SSS - P_{sum}$$

Donde:

G_{mb} : Densidad Bulk de la mezcla compactada

P_a : Peso de la briqueta en estado seco, g

Vol : Volumen de la briqueta

SSS : Peso de la briqueta en estado superficie saturada seca, g

P_{sum} : Peso de la briqueta sumergida, g

5.4.1.4. Ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall

Norma ASTM D 6927.

Este ensayo se aplica tanto para briquetas elaboradas en laboratorio como para las obtenidas en obra. El objetivo principal es la determinación de la resistencia a la

deformación plástica de mezclas asfálticas, se registra la máxima estabilidad y la deformación de la muestra.

Equipo.-

Prensa hidráulica.- Capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 51 mm por minuto (2"/min.).

Mordazas.- Son dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 51 mm (2"). La mordaza inferior va sobrepuesta a una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella y que sirven de guía a la mordaza superior.

Medidor de la estabilidad.- Medidor eléctrico.

Medidor de deformación.- Deformímetro, con divisiones en 0.25 mm (0.01").

Horno.- Con control termostático.

Baño de agua.- Debe tener al menos una profundidad de 150 mm (6"), con control termostático. El tanque debe tener un falso fondo perforado capaz de sostener las probetas por lo menos a 50 mm (2") sobre el fondo del tanque.

Termómetro

Procedimiento.-

Se sumerge las briquetas en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante un período de tiempo entre 30 y 40 minutos. Se limpian las superficies interiores de las mordazas y se las lleva al horno hasta obtener una temperatura entre $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70 a $100\text{ }^{\circ}\text{F}$). Posteriormente se lubrica tanto las varillas de guía, para un fácil deslizamiento de las mordazas, como las superficies interiores de estas.

Se verifica que el deformímetro tenga el vástago libre para luego colocarlo sobre la guía, el marcador de la estabilidad debe estar encerado al igual que la base de la

prensa hidráulica. Luego de cumplido el período de saturación de la briqueta se retira del baño de agua y enseguida se la coloca en las mordazas, el deformímetro se encera en la posición que tenga el vástago al colocarlo sobre la varilla guía, se lo sujeta firmemente (Fotografía 54) y se aplica la carga, hasta que se produce la falla en la briqueta, en este momento se retira el deformímetro y se registra el valor expresado en 0.01”, de la misma manera el valor de la máxima resistencia (estabilidad) expresada en lb.



Fotografía 54. Posición firme del deformímetro

El proceso desde que se retira la briqueta del baño hasta la aplicación de la carga debe durar máximo 30 segundos.

5.4.1.5. Ensayo Gravedad específica teórica máxima - RICE (Gmm)

Norma ASTM D 2041.

El objetivo principal es la determinación de la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas no compactadas a $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$. Este ensayo puede realizarse disgregando la briqueta ensayada en la prensa Marshall, (como se procede en este proyecto) o utilizando la mezcla asfáltica recién elaborada y que mantenga $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ de temperatura.

Equipo.- Balanza digital de capacidad 3kg y apreciación $\pm 0.01g$, bomba de extracción de aire, termómetro, bandejas metálicas, pipeta de goma, paño absorbente, calentador eléctrico de agua y un frasco volumétrico con placa de vidrio. La presente norma establece que, para un frasco volumétrico de 4000ml (cm^3) se elige la cantidad de material a ensayarse de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado, como se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 27.
Tamaño de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Cantidad mínima de material (g)
37.5 o mayor	5000
19 a 25	2500
12.5 o menor	1500

Fuente. Norma ASTM D2041

En el presente proyecto se usa un frasco volumétrico de 1963,93ml (cm^3), este valor se determina con agua (destilada) a una temperatura de $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$. La relación para calcular la cantidad de material a utilizarse para un tamaño máximo nominal de agregado de $\frac{3}{4}$ " es la siguiente:

$$X = \text{cantidad de material a calcularse (g)}$$

$$X = \frac{\text{volumen obtenido en laboratorio (cm}^3\text{)} * 2500 \text{ (g)}}{4000 \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$X = \frac{1963,93 \text{ (cm}^3\text{)} * 2500 \text{ (g)}}{4000 \text{ (cm}^3\text{)}}; \quad X = 1227,5 \text{ g}$$

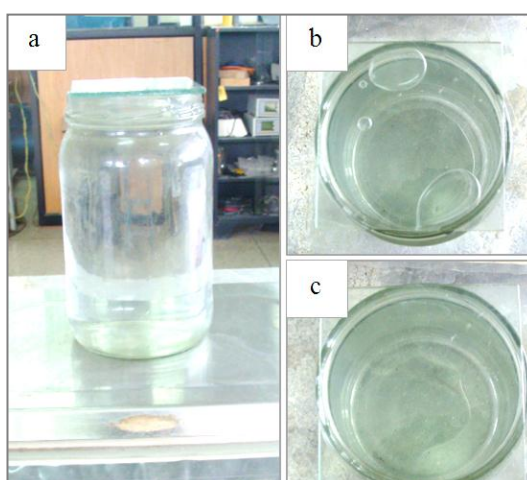
Procedimiento.-

Se calienta el agua destilada hasta una temperatura de $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$, para esto se utiliza un calentador eléctrico de agua o cualquier otro medio.



Fotografía 55. Agua destilada a $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$

Enseguida se calibra el frasco volumétrico, tomando el peso (D) del frasco más la placa de vidrio y más agua a $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Fotografía 56a), se tiene en cuenta que no debe generarse ninguna burbuja de aire (Fotografía 56b) para que no afecte el valor de la calibración, para esto es recomendable usar una pipeta de goma (o cualquier otro tipo) e ir llenando de agua las burbujas de aire (Fotografía 56c).



Fotografía 56. Calibración del frasco volumétrico (a); inclusión de aire (b); sin inclusión de aire (c)

La briqueta ensaya en la prensa Marshall es disgregada a mano (Fotografía 57a), tratando de separar los agregados gruesos y finos entre sí, de una forma suave, la muestra debe mantenerse a una temperatura de $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Fotografía 57. Briquea disgregada a mano (a); control de temperatura de la muestra (b)

Se pesa 1227,5 g de muestra disgregada y se registra el valor (C)



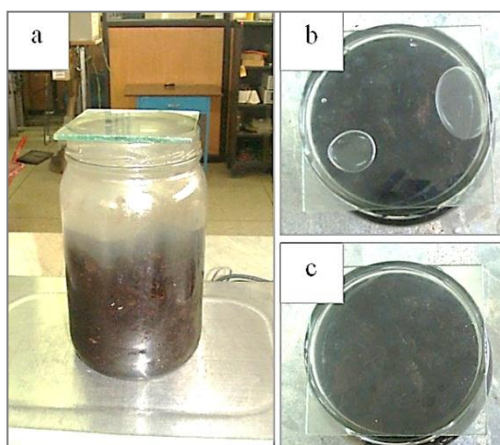
Fotografía 58. Peso de la muestra seca

Se vierte agua destilada ($25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) hasta que cubra la muestra y se la lleva a la bomba de extracción de aire por un período mínimo de tiempo de 15 minutos o hasta que la muestra no presente burbujas de aire (Fotografía 59a), se agita el conjunto cada 5 minutos para acelerar la expulsión de aire (Fotografía 59b).



Fotografía 59. Extracción de aire de la muestra cubierta de agua (a); conjunto agitado para acelerar la expulsión de aire (b)

Una vez terminado este período, se vierte agua hasta la marca de calibración, se coloca la placa de vidrio (Fotografía 60a) evitando la formación de burbujas de aire (Fotografías 60b y 60c), se seca con un paño absorbente el agua que pueda estar en las paredes exteriores del frasco y placa y se registra el valor del peso (E) del conjunto frasco, placa, muestra y agua a $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Fotografía 60. Peso del frasco, muestra, placa de vidrio y agua $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ (a); inclusión de aire (b); sin inclusión de aire (c)

Para este proyecto se realiza el ensayo para cada mezcla (uno por porcentaje), los valores no difieren considerablemente entre sí, puesto que el material pétreo y el

asfalto utilizado son los mismos, por lo tanto la absorción de asfalto se mantiene relativamente igual.

Cálculos.-

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

Donde:

Gmm: Gravedad específica teórica máxima RICE

C: Peso de la muestra seca, g

D: Peso del frasco lleno de agua + placa de vidrio, g

E: Peso del frasco + placa de vidrio + agua + muestra, g

5.4.1.6. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto se aplica el formato de análisis del Manual MS-2 del Instituto del Asfalto (expuesto en el Capítulo 6), en el intervienen los siguientes factores:

- 1.- Densidad Bulk de la mezcla compactada (*Gmb*)**, antes descrita.
- 2.- Gravedad específica teórica máxima RICE (*Gmm*)**, antes descrita.
- 3.- Gravedad específica Bulk de los agregados (*Gsb*)**, se considera el mismo valor tanto para la mezcla patrón como para las mezclas modificadas.

$$Gsb = \frac{P1 + P2 + Pn + Pf}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{Pn}{Gn} + \frac{Pf}{Gf}}$$

Donde:

Gsb: Gravedad específica Bulk del total de agregado

P1, P2, Pn, Pf: Porcentaje individual del peso del agregado, %

G1, G2, Gn, Gf: Gravedad específica Bulk individual del agregado

En la mezcla de material pétreo se obtienen los porcentajes individuales de cada tamaño de agregado.

Tabla 28.
Porcentajes de cada tamaño de agregado que intervienen en la mezcla

1/2 "	3/8"	N° 4	N°10	N°40	N°80	N°200	P N°200
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Pf
13,05	12,10	18,85	13,02	21,04	7,86	7,58	6,51

Las gravedades específicas Bulk expuestas a continuación son el resultado de la caracterización del agregado grueso y fino que se desarrollan en el literal 5.3.1.2 y 5.3.1.3 del presente capítulo.

Tabla 29.
Gravedades específicas Bulk de cada tamaño de agregado

1/2 "	3/8"	N° 4	N°10	N°40	N°80	N°200	P N°200
G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Gf
2,426	2,427	2,436	2,440	2,457	2,475	2,46	2,671

Por lo tanto, el resultado de esta gravedad específica es:

$$Gsb = 2,457$$

4.- Gravedad específica aparente de los agregados (Gsa), se considera el mismo valor tanto para la mezcla patrón como para las mezclas modificadas.

$$Gsa = \frac{P1 + P2 + Pn + Pf}{\frac{P1}{Ga1} + \frac{P2}{Ga2} + \frac{Pn}{Gan} + \frac{Pf}{Gaf}}$$

Donde:

Gsa: Gravedad específica aparente del total de agregado

P1, P2, Pn, Pf: Porcentaje individual del peso del agregado, %

Ga1, Ga2, Gan, Gaf: Gravedad específica aparente del agregado

Las gravedades específicas aparentes expuestas a continuación son el resultado de la caracterización del agregado grueso y fino que se desarrollan en el literal 5.3.1.2 y 5.3.1.3 del presente capítulo.

Tabla 30.

Gravedades específicas aparentes de cada tamaño de agregado

1/2 "	3/8"	N° 4	N°10	N°40	N°80	N°200	P N°200
Ga1	Ga2	Ga3	Ga4	Ga5	Ga6	Ga7	Gaf
2,604	2,607	2,613	2,615	2,665	2,713	2,791	2,671

Por lo tanto, el resultado de esta gravedad específica es:

$$Gsa = 2,646$$

5.- Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse), se calcula para cada porcentaje de asfalto.

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del total de agregado

Gmm: Gravedad específica teórica máxima RICE

Pmm: Porcentaje del peso total de la mezcla, %

Pb: Contenido de asfalto, en porcentaje, del peso de la mezcla, %

Gb: Gravedad específica del asfalto

Para la verificación de un buen diseño de las mezclas asfálticas se debe cumplir una condición muy importante entre los tres tipos de gravedades específicas antes mencionadas: $G_{sb} < G_{se} < G_{sa}$

6.- Vacíos de aire (V_a)

$$V_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

V_a: Vacíos de aire en la mezcla compactada, %

G_{mm}: Gravedad específica teórica máxima RICE

G_{mb}: Densidad Bulk de la mezcla compactada

7.- Vacíos en el agregado mineral (V_{AM})

$$V_{AM} = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

V_{AM}: Vacíos en el agregado mineral, %

G_{mb}: Densidad Bulk de la mezcla compactada,

G_{se}: Gravedad específica efectiva del total de agregado

P_s: Contenido de agregado en la mezcla, %

8.- Vacíos llenos de asfalto (V_{AF})

$$V_{AF} = 100 * \frac{V_{AM} - V_a}{V_{AM}}$$

Donde:

VAF: Vacíos llenos de asfalto, %

VAM: Vacíos en el agregado mineral, %

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, %

9.- Asfalto absorbido (Pba)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb$$

Donde:

Pba: Asfalto absorbido, %

Gse: Gravedad específica efectiva del total de agregad

Gsb: Gravedad específica Bulk del total de agregado

Gb: Gravedad específica del asfalto

10.- Contenido de asfalto efectivo en la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo en la mezcla, %

Pba: Asfalto absorbido, %

Ps: Contenido de agregado en la mezcla, %

Pb: Contenido de asfalto, en porcentaje, del peso de la mezcla, %

Adicionalmente se calcula la relación “polvo mineral – asfalto”, puesto que en una mezcla no se debe tratar de llenar los vacíos con un porcentaje excesivo de polvo mineral, en el volumen 3 del NEVI-12 en la tabla 405-5.9 de la sección 400 se define un rango de aceptación de 0,6 a 1,3 (valores adimensionales).

$$\frac{\%Pasante \#200}{Pbe}$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo en la mezcla, %

% ***Pasante #200***: Valor obtenido de los porcentajes de mezcla, 6,51% (Figura 14)

Una vez determinados todos estos factores se realiza seis curvas básicas para el análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica, las cuales se presentan en el Capítulo 6.

- 1.- % Asfalto vs Va
- 2.- % Asfalto vs Densidad Bulk
- 3.- % Asfalto vs Estabilidad
- 4.- % Asfalto vs Flujo
- 5.- % Asfalto vs VAM
- 6.- % Asfalto vs VAF

5.4.2. Mezcla asfáltica modificada

Una vez calculado el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla patrón, se procede a la modificación de la mezcla con las partículas de elastómero y con una combinación de partículas de elastómero y escarcha de RPET al 50 %.

El equipo y procedimientos para la elaboración de este tipo de mezclas es el mismo utilizado en la mezcla asfáltica normal.

Normas aplicadas, ASTM D 6927, ASTM D 2726, ASTM D 6928 y ASTM D 2041, descritas anteriormente.

Se explica a continuación la manera de introducción del material modificador a la mezcla.

5.4.2.1. Material: Partículas de elastómero pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.



Fotografía 61. Partículas de elastómero P N°10 - R N°40

La adición del elastómero a la mezcla normal se realiza por vía seca, es decir, se analiza el efecto que se produce al adicionar este material como parte de los agregados finos.

Los porcentajes de elastómero que se utilizan, en el presente proyecto de grado, se toman con respecto a los gramos de asfalto óptimo, sin embargo, se presenta en la Tabla 31 la equivalencia de porcentajes cuando se toma con respecto a los gramos de material pétreo.

Tabla 31.
Porcentajes de material modificador

Material modificador	Unidad	Porcentajes				
		E1	E2	E3	E4	E5
Respecto a los 1050g de agregados	(%)	0,34	0,67	1,01	1,34	1,68
	(g)	3,52	7,04	10,6	14,07	17,59
Respecto a los 70,35g de asfalto óptimo	(%)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
	(g)	3,52	7,04	10,6	14,07	17,59

La gravedad específica del elastómero utilizado es de 1,09, es bastante baja en comparación a la gravedad específica de los agregados que va en el rango de 2,426 a 2,671, es por esta razón que se debe tener en cuenta que, siendo la adición del elastómero en peso, el volumen requerido de material es alto y por lo tanto hace que aumente el volumen de la briqueta terminada.



Fotografía 62. Muestras con diferentes porcentajes de elastómero

El método, de introducción del elastómero, por vía seca procede de la siguiente manera: una vez pesado el material pétreo (1050g) se mezcla en frío con el porcentaje de elastómero definido (Fotografía 63), luego se calientan juntos en el horno hasta un rango de temperatura entre 150°C y 165°C (el elastómero es tratado como un árido más), posteriormente se añade los gramos de asfalto previamente calentado (% óptimo) y se mezcla rápidamente todos los materiales, dentro de los 3 a 5 minutos para que no se sobrecaliente el asfalto, hasta obtener una mezcla homogénea.



Fotografía 63. Agregados combinados con elastómero

Terminado el proceso de mezclado y moldeo, se obtiene las 15 briquetas de la mezcla modificada, 3 especímenes por cada porcentaje de material modificador.



Fotografía 64. Briquetas de la mezcla modificada con elastómero

Por la forma de las partículas del elastómero utilizado (Fotografía 61), se determinó que no es un material homogéneo, es por esto que el polvo de elastómero se incorpora con el cemento asfáltico aumentando su densidad y colaborando a que las demás partículas queden unidas entre sí, en cambio las partículas más alargadas pasan a formar parte del esqueleto granular de la mezcla, esto se puede verificar una vez ensayadas las briquetas como se puede observar en la siguiente fotografía:



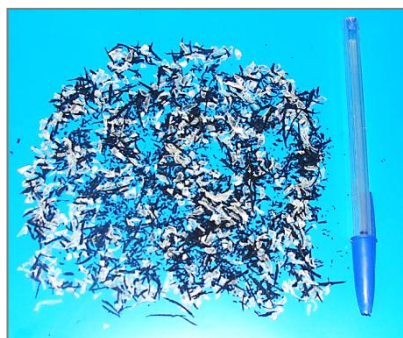
Fotografía 65. Partículas de material posterior a la disgregación de las briquetas

5.4.2.2. Determinación del porcentaje óptimo de elastómero

Para este análisis se considera la gravedad específica Bulk de los agregados (G_{sb}), y la gravedad específica aparente de los agregados (G_{sa}), las mismas empleadas para el análisis de la mezcla normal. Se sigue el mismo proceso del literal

5.4.1.6 del presente Capítulo, sin embargo la interpretación de resultados es diferente.

5.4.2.3. Material: 50% de partículas de elastómero y 50% de escarcha de RPET pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.



Fotografía 66. 50% elastómero y 50% RPET

A la combinación de 50% elastómero + 50% PET se denomina como “material 50E–50P” y su adición a la mezcla normal se realiza por vía seca.

Los porcentajes del material 50E-50P que se utilizan, se toman con respecto a los gramos de asfalto óptimo, sin embargo, en la Tabla 32 se expone la equivalencia de porcentajes cuando se toma con respecto a los gramos de material pétreo.

Tabla 32.
Porcentajes de material 50E-50P

Material modificador	Unidad	Porcentajes				
		EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
Respecto a los 1050g de agregados	(%)	0,34	0,67	1,01	1,34	1,68
	(g)	3,52	7,04	10,61	14,07	17,59
	50%	1,76	3,52	5,30	7,04	8,79
Respecto a los 70,35g de asfalto óptimo	(%)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
	(g)	3,52	7,04	10,55	14,07	17,59
	50%	1,76	3,52	5,28	7,04	8,79

La gravedad específica del elastómero utilizado es de 1,09 y de la escarcha de RPET es de 1,35, las dos gravedades específicas son muy inferiores a la de los agregados que va en el rango de 2,426 a 2,671, es por esta razón que se debe tener en cuenta que, siendo la adición en peso del material 50E-50P, el volumen requerido es alto y genera un aumento en el volumen de la briqueta.



Fotografía 67. Muestras con diferentes porcentajes de material 50E-50P

Se sigue el mismo procedimiento de adición del material 50E-50P por vía seca.

Por la forma de las partículas del material 50E-50P utilizado (Fotografía 66), el polvo de elastómero se incorpora con el cemento asfáltico y colabora a que las demás partículas queden unidas entre sí, en cambio las partículas más alargadas pasan a formar parte del esqueleto granular de la mezcla al igual que la escarcha de RPET.

5.4.2.4. Determinación del porcentaje óptimo de material 50E-50P

Para este análisis se toma en cuenta las mismas consideraciones para la gravedad específica Bulk de los agregados (G_{sb}), y la gravedad específica aparente de los agregados (G_{sa}), las mismas empleadas para el análisis de la mezcla normal. Se sigue el mismo proceso del literal 5.4.1.6 del presente Capítulo.

5.5. Ensayo de choque térmico

Una vez determinado el porcentaje óptimo de cada material modificador se realiza el ensayo de choque térmico, entre los tres tipos de mezclas asfálticas con el contenido de asfalto óptimo, la primera es la mezcla patrón sin modificadores, la segunda con el porcentaje óptimo de elastómero y la tercera con el porcentaje óptimo de material 50E-50P.

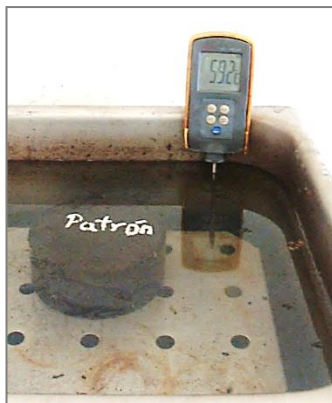


Fotografía 68. Tres diferentes tipos de mezclas

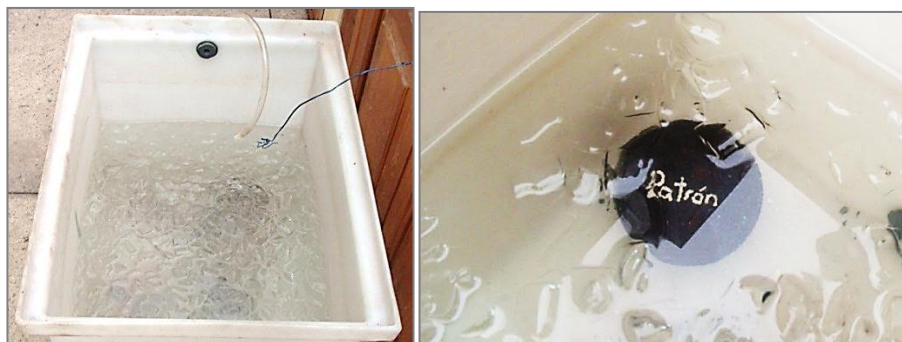
El objetivo principal de este ensayo es analizar la variación en la estabilidad y deformación de las mezclas al someterse a cambios bruscos de temperatura, se considera 60°C y 0°C. Las normas ASTM utilizadas para la elaboración de mezclas, densidad Bulk, ensayo de especímenes, gravedad específica teórica máxima son las antes descritas, incluyendo el método de introducción del material modificador.

Procedimiento.-

Se sumerge las briquetas en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante un período de tiempo entre 10 y 13 minutos (Fotografía 69), posterior a esto se las sumerge en baño de agua a 0°C por el mismo rango de tiempo (Fotografía 70), finalmente se regresan los especímenes al baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se los sumerge por el mismo período de tiempo. De esta manera se cumple con el tiempo designado por la Norma ASTM D 6927 de 30 a 40 minutos de saturación.



Fotografía 69. Baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$



Fotografía 70. Baño de agua a 0°C

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

6.1. Introducción

Inicialmente se analiza los resultados de una mezcla asfáltica en caliente diseñada mediante el Método Marshall, posteriormente se analiza los resultados de la segunda mezcla cuyo material modificador es el elastómero y lo propio se realiza para la tercera mezcla modificada con el 50% de elastómero y el 50% de PET. Luego de esto se compara los resultados obtenidos en las tres mezclas, para determinar cuál de ellas presenta las mejores propiedades. Al final, las tres mezclas se prueban con ensayo de choque térmico.

Para la corrección de la Estabilidad se utilizan los siguientes factores:

Tabla 33.
Factores de corrección para la Estabilidad.

Volumen cm ³	Espesor cm	Factor
457-470	5,71	1,19
471-482	5,87	1,14
483-495	6,03	1,09
496-508	6,19	1,04
509-522	6,35	1
523-535	6,51	0,96
536-546	6,67	0,93

Fuente: MS-2 Instituto del asfalto sexta edición, capítulo5, tabla 5.1

6.2. Diseño de la Mezcla Asfáltica Normal

Con el resultado de los ensayos descritos en el Capítulo 5 se obtienen las propiedades de la mezcla asfáltica normal:

Tabla 34.
Propiedades de una mezcla asfáltica compactada - mezcla patrón

Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Saturado Sup Seca	Peso sumergido	Volumen Briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	Gravedad específica teórica máxima medida	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
													Medida	Fac.C	Corregida	
#	Pmm	Pb	Ps	Pa	SSS	Psum	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F
	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm3)	(g/cm3)	---	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0.01")
1	100	5,0	95,0	1099,14	1101,01	585,95	515,06	2,130	2,309	7,76	17,55	55,79	1891	1	1891	10
2	100	5,0	95,0	1098,55	1100,35	584,34	516,01	2,130	2,309	7,76	17,55	55,79	1884	1	1884	10
3	100	5,0	95,0	1099,01	1100,61	587,62	512,99	2,140	2,309	7,33	17,16	57,32	1948	1	1948	11
						Promedio	514,69	2,133	2,309	7,61	17,42	56,30	1907		1907	10
1	100	5,5	94,5	1099,50	1100,98	594,34	506,64	2,170	2,298	5,57	16,44	66,15	2297	1,04	2389	11
2	100	5,5	94,5	1104,94	1109,56	597,60	511,96	2,160	2,298	6,00	16,83	64,34	2287	1	2287	12
3	100	5,5	94,5	1101,71	1103,69	594,88	508,81	2,170	2,298	5,57	16,44	66,15	2329	1	2329	10
						Promedio	509,14	2,167	2,298	5,71	16,57	65,54	2305		2335	11
1	100	6,0	94,0	1109,21	1112,85	604,54	508,31	2,180	2,300	5,22	16,50	68,37	3014	1,04	3135	14
2	100	6,0	94,0	1110,76	1112,24	604,64	507,60	2,190	2,300	4,79	16,12	70,31	3049	1,04	3170	12
3	100	6,0	94,0	1111,50	1113,67	602,16	511,51	2,170	2,300	5,66	16,89	66,51	2967	1	2967	11
						Promedio	509,14	2,180	2,300	5,22	16,50	68,40	3010		3091	12
1	100	6,5	93,5	1113,81	1116,40	613,52	502,88	2,210	2,297	3,81	15,81	75,90	2913	1,04	3030	11
2	100	6,5	93,5	1113,70	1117,77	610,10	507,67	2,190	2,297	4,68	16,57	71,76	2861	1,04	2975	13
3	100	6,5	93,5	1114,67	1121,80	616,15	505,65	2,200	2,297	4,24	16,19	73,78	2874	1,04	2989	10
						Promedio	505,40	2,200	2,297	4,24	16,19	73,81	2883		2998	11
1	100	7,0	93,0	1121,06	1127,34	618,00	509,34	2,200	2,297	4,23	16,63	74,60	3185	1,04	3312	12
2	100	7,0	93,0	1119,64	1124,64	615,73	508,91	2,200	2,297	4,23	16,63	74,60	3082	1,04	3205	14
3	100	7,0	93,0	1119,77	1122,05	618,89	503,16	2,230	2,297	2,92	15,50	81,16	3285	1,04	3417	11
						Promedio	507,14	2,210	2,297	3,79	16,26	76,78	3184		3311	12

Tabla 35.
Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla patrón

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de los agregados	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla	Relación polvo mineral - asfalto
Pb	Gse	Pba	Pbe	f/a
(%)	---	(%)	(%)	--
5,0	2,478	0,391	4,628	
5,0	2,478	0,391	4,628	
5,0	2,478	0,391	4,628	
Promedio	2,478	0,391	4,628	1,41
5,5	2,483	0,480	5,046	
5,5	2,483	0,480	5,046	
5,5	2,483	0,480	5,046	
Promedio	2,483	0,480	5,046	1,29
6,0	2,506	0,840	5,211	
6,0	2,506	0,840	5,211	
6,0	2,506	0,840	5,211	
Promedio	2,506	0,840	5,211	1,25
6,5	2,522	1,107	5,465	
6,5	2,522	1,107	5,465	
6,5	2,522	1,107	5,465	
Promedio	2,522	1,107	5,465	1,19
7,0	2,542	1,421	5,678	
7,0	2,542	1,421	5,678	
7,0	2,542	1,421	5,678	
Promedio	2,542	1,421	5,678	1,15
Promedio Total	2,506	0,848	5,206	

A pesar de que no existe un rango de verificación del porcentaje de asfalto absorbido, se debe tener en cuenta que debe ser positivo y cercano a 1%, este factor depende de la gravedad específica efectiva (Gse) y esta a su vez de la gravedad específica teórica máxima RICE (Gmm), por lo que es muy importante realizar con mucha precaución el ensayo ASTM D 2041. Si se tiene un valor de RICE muy pequeño, el porcentaje de asfalto absorbido puede dar negativo.

Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica en relación a las gravedades específicas:

Tabla 36.
Condición de aceptación en base a densidades específicas

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2,457	<	2,506	<	2,646

Los valores mínimos y máximos considerados para cada una de las propiedades de la mezcla asfáltica, en el presente proyecto, están determinadas en el volumen 3 de La Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 tabla 405-5.9 de la sección 400, para tráfico pesado.

El comportamiento de las mezclas se analiza en base a la línea de tendencia a la que mejor se ajusten los valores obtenidos (Tabla 37), en este caso se usa una línea de tendencia polinómica de orden 2, para todos los gráficos.

Tabla 37.
Resumen de datos

Asfalto	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF	Relación f/a
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%	--
5,0	2,13	1907	10,33	7,61	17,4	56,3	1,41
5,5	2,17	2335	11,00	5,71	16,6	65,5	1,29
6,0	2,18	3091	12,33	5,22	16,5	68,4	1,25
6,5	2,20	2998	11,33	4,24	16,2	73,8	1,19
7,0	2,21	3311	12,33	3,79	16,3	76,8	1,15

La determinación del porcentaje óptimo de asfalto se realiza, para este proyecto, al 4% de vacíos de aire en la mezcla compactada, que define un porcentaje del 6,7 % como se presenta en los siguientes gráficos:

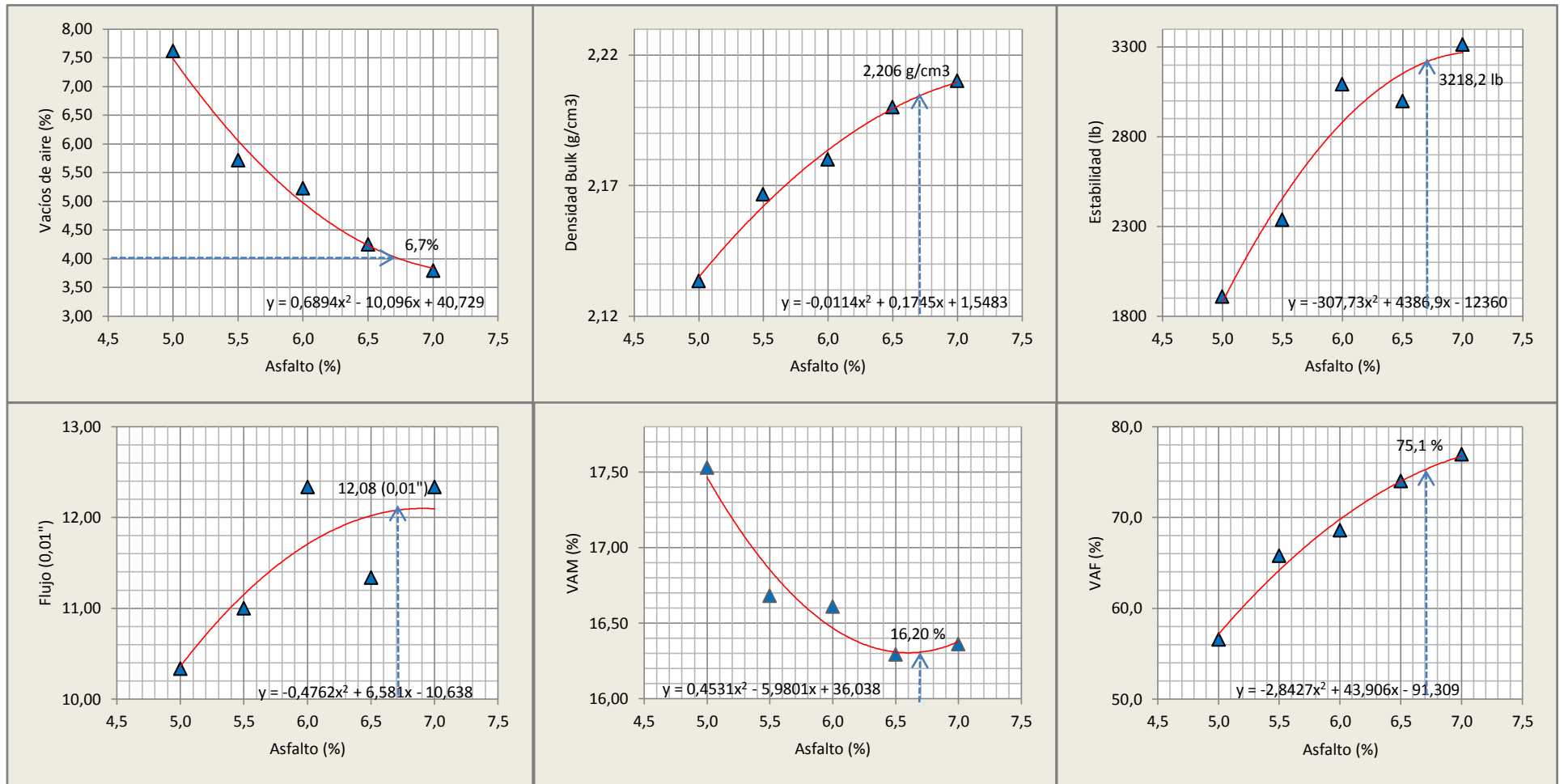


Gráfico 4. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón

En el Gráfico *Asfalto (%) vs Vacíos de aire (%)* el valor del porcentaje óptimo de asfalto que indica para 4% de vacíos de aire es relativamente alto, lo que indica que, el agregado posee vacíos que absorben el asfalto debido a su baja densidad.

Con el valor de 6,7 % como porcentaje óptimo de asfalto, se ingresa en cada una de las ecuaciones de las curvas de tendencia, obtenidas de la dispersión de datos para cada propiedad de la mezcla asfáltica.

La densidad Bulk crece a medida que aumenta el porcentaje de asfalto y a medida que disminuye el volumen de la briqueta, según el Instituto del asfalto debe fallar en un cierto punto cuando todos los poros del agregado estén llenos de asfalto.

En el Gráfico *Asfalto (%) vs VAF (%)* se determina un 75,1 % de vacíos llenos de asfalto, el cual se pasa en 0,1 % del rango máximo permitido, el valor se considera aceptable, pero se destaca que, el porcentaje de poros llenos de asfalto VAF obtenido justifica el alto porcentaje de contenido de asfalto calculado.

Adicionalmente se presenta la relación “polvo mineral/ asfalto” (f/a) (Gráfico 2); si bien es cierto que el polvo mineral (filler) llena los vacíos de aire en la mezcla, se debe tener en cuenta que un gran porcentaje de filler desestabiliza la mezcla y aumenta su fluencia. Se toma muy en cuenta el rango de aceptabilidad.

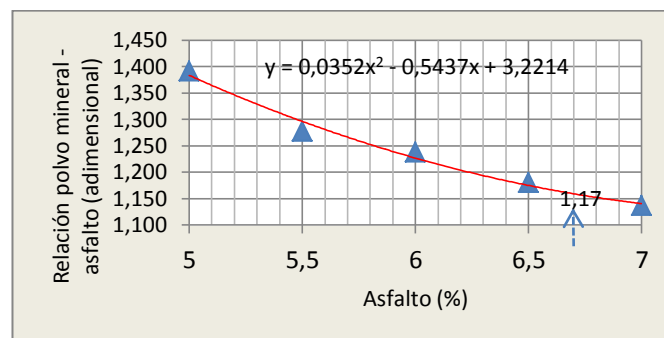


Gráfico 5. Porcentaje de asfalto (%) vs Relación f/a - mezcla patrón

Luego de determinar los valores de las propiedades de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto en base a las ecuaciones de las líneas de tendencia, se presenta el resumen de resultados:

Tabla 38.
Resumen de resultados – mezcla patrón

Asfalto	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF	Relación f/a
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%	--
6,7	2,206	3218,2	12,08	4	16,20	75,1	1,17
Valores de aceptación (NEVI-12 405-5.04, 2013)							
Mín	--	1800	8	3	14	65	0,6
Máx	--	--	14	5	--	75	1,3
Condición	--	cumple	cumple	cumple	cumple	se acepta	cumple

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto, se presenta la fórmula maestra en relación a la mezcla de agregados y en relación a la mezcla total:

Tabla 39.
Fórmula maestra con relación a la mezcla de agregados y a la mezcla total

No. Tamiz	Con relación a la mezcla de agregados 1050 g		Con relación a la mezcla total 1120,35 g		Definición
	Contenido (%)	Contenido (%)	Contenido (%)	Contenido (%)	
1/2"	13,05		12,23		Agregado grueso
3/8"	12,10	44,00	11,34	41,24	
No.4	18,85		17,67		
No.10	13,02		12,20		Agregado fino
No.40	21,04		19,72		
No.80	7,86	56,00	7,37	52,48	
No.200	7,58		7,10		
Filler	6,51		6,10		Asfalto
Asfalto	6,7	6,7	6,28	6,28	
Total (%)	106,7	106,7	100	100	

6.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica Modificada

6.3.1. Material: Partículas de elastómero pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.

Tabla 40.
Propiedades de una mezcla asfáltica compactada – mezcla modificada con elastómero

M	Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Saturado Sup Seca	Peso sumergido	Volumen Briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	Gravedad específica teórica máxima medida	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
														Medida	Fac. Cor.	Corregida	
	#	Pmm	Pb	Ps	Pa	SSS	Psum	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F
%		(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	---	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0.01")
5	1	100	6,7	93,3	1121,08	1125,36	610,51	514,85	2,177	2,291	4,97	17,22	71,13	3418	1	3418	15,5
	2	100	6,7	93,3	1120,10	1124,78	611,10	513,68	2,181	2,291	4,84	17,11	71,72	3178	1	3178	15,0
	3	100	6,7	93,3	1120,14	1124,90	610,14	514,76	2,176	2,291	5,03	17,28	70,86	3300	1	3300	16,5
	Promedio								514,43	2,178	2,291	4,9	17,20	71,24			3298,9
10	1	100	6,7	93,3	1124,49	1128,16	610,02	518,14	2,170	2,289	5,20	17,50	70,29	3298	1	3298	16,0
	2	100	6,7	93,3	1123,99	1127,76	608,20	519,56	2,163	2,289	5,50	17,76	69,03	3199	1	3199	16,0
	3	100	6,7	93,3	1123,78	1127,96	607,90	520,06	2,161	2,289	5,61	17,85	68,59	3408	1	3408	15,5
	Promedio								519,25	2,165	2,289	5,4	17,70	69,30			3301,6
15	1	100	6,7	93,3	1128,11	1132,74	609,23	523,51	2,155	2,293	6,03	18,08	66,66	3390	0,96	3255	19,0
	2	100	6,7	93,3	1127,99	1131,77	609,02	522,75	2,158	2,293	5,90	17,97	67,16	3158	0,96	3032	17,5
	3	100	6,7	93,3	1129,00	1133,10	610,92	522,18	2,162	2,293	5,71	17,81	67,91	3450	0,96	3312	18,0
	Promedio								522,81	2,158	2,293	5,9	17,95	67,25			3199,6
20	1	100	6,7	93,3	1131,45	1135,10	610,76	524,34	2,158	2,294	5,92	17,97	67,08	3360	0,96	3225	19,5
	2	100	6,7	93,3	1130,90	1135,34	609,16	526,18	2,149	2,294	6,29	18,29	65,62	3131	0,96	3006	21,0
	3	100	6,7	93,3	1131,02	1134,32	611,97	522,35	2,165	2,294	5,59	17,69	68,38	3573	0,96	3431	19,0
	Promedio								524,29	2,157	2,294	5,9	17,98	67,02			3220,5
25	1	100	6,7	93,3	1134,66	1138,23	611,00	527,23	2,152	2,288	5,94	18,19	67,35	3242	0,96	3112	20,0
	2	100	6,7	93,3	1133,14	1136,76	609,00	527,76	2,147	2,288	6,16	18,38	66,49	2947	0,96	2829	23,0
	3	100	6,7	93,3	1134,20	1138,65	608,12	530,53	2,138	2,288	6,56	18,73	64,97	3177	0,96	3050	22,5
	Promedio								528,51	2,146	2,288	6,2	18,43	66,27			2997,1

Tabla 41.
Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla modificada con elastómero

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de los agregados	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla
Pb	Gse	Pba	Pbe
(%)	---	(%)	(%)
6,7	2,523	1,111	5,664
6,7	2,523	1,111	5,664
6,7	2,523	1,111	5,664
Promedio	2,523	1,111	5,664
6,7	2,520	1,067	5,705
6,7	2,520	1,067	5,705
6,7	2,520	1,067	5,705
Promedio	2,520	1,067	5,705
6,7	2,525	1,146	5,631
6,7	2,525	1,146	5,631
6,7	2,525	1,146	5,631
Promedio	2,525	1,146	5,631
6,7	2,525	1,155	5,623
6,7	2,525	1,155	5,623
6,7	2,525	1,155	5,623
Promedio	2,525	1,155	5,623
6,7	2,518	1,040	5,729
6,7	2,518	1,040	5,729
6,7	2,518	1,040	5,729
Promedio	2,518	1,040	5,729
Promedio Total	2,522	1,104	5,670

Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica modificada en relación a las gravedades específicas:

Tabla 42.
Condición de aceptación en base a densidades específicas

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2,457	<	2,522	<	2,646

Para realizar las gráficas de relación para el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas compactadas, se obtiene un resumen de datos, basado en los resultados promedio de la Tabla 40.

Tabla 43.
Resumen de datos

Asfalto	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%
5,0	2,18	3299	16	4,9	17,2	71,2
10,0	2,16	3302	16	5,4	17,7	69,3
15,0	2,16	3200	18	5,9	18,0	67,2
20,0	2,16	3221	20	5,9	18,0	67,0
25,0	2,15	2997	22	6,2	18,4	66,3

La determinación del porcentaje óptimo de elastómero como material modificador se realiza tomando en cuenta la gráfica de estabilidad, se identifica el punto en el que existe un cambio de valor, no se utiliza el gráfico del porcentaje de vacíos puesto que los valores sobrepasan el límite máximo aceptable de 5%.

Analizando la curva de estabilidad se tiene el punto de cambio de valor a 3300,4 lb que corresponde a 7,5% de elastómero, como se puede observar en el Gráfico *Elastómero (%) vs Estabilidad (lb)*. A pesar de que la estabilidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de elastómero, todos los valores de estabilidad se encuentran sobre el rango mínimo permitido de 1800 lb.

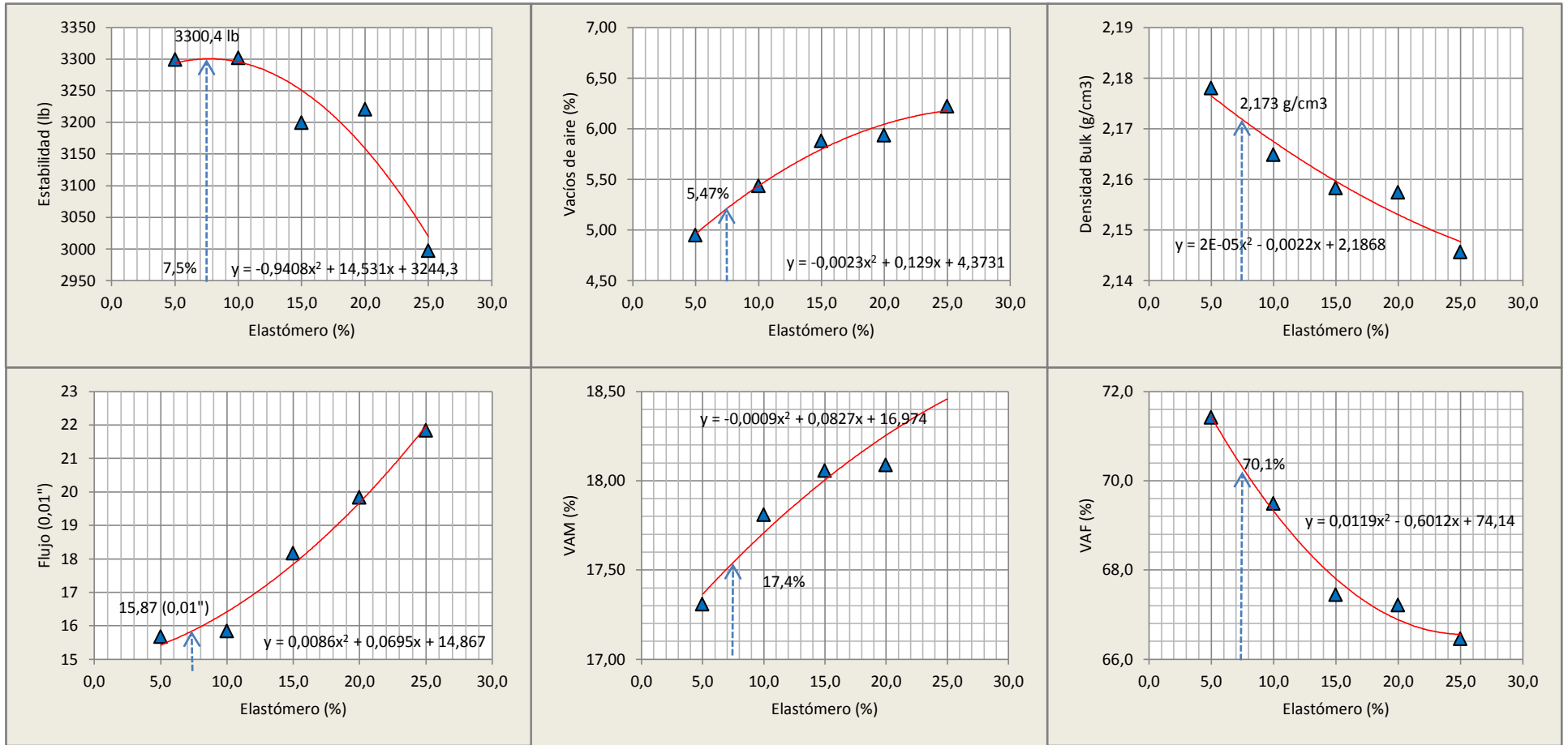


Gráfico 6. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – modificada con elastómero

Si bien es cierto que el 5,47% de vacíos está por encima del valor máximo permitido de 5%, hay que aclarar que la diferencia no es exagerada, apenas el 9,40% más. Para lograr obtener un porcentaje de vacíos máximo 5% al realizar el diseño se requiere utilizar el elastómero en cantidades menores al 5% de elastómero. Se puede observar que una mezcla asfáltica cambia su comportamiento con pequeños incrementos de elastómero. La densidad Bulk disminuye a medida que aumenta el porcentaje de elastómero, por otra parte el volumen de las briquetas aumenta con la adición del elastómero, se experimenta esponjamiento de hasta 5mm en la altura de la biqueta. El flujo se encuentra por encima del rango máximo permitido independientemente del porcentaje de elastómero utilizado, se presenta en forma ascendente, para el material óptimo de elastómero se tiene 15,87 (0,01'') que es 13,36% mayor al 14 (0,01'') de flujo permitido. Los vacíos en el agregado mineral cumplen con el valor mínimo permitido de 14%. Luego del análisis en las gráficas para determinar el comportamiento de la mezcla compactada con el 7,5% de elastómero se presenta un resumen de resultados:

Tabla 44.
Resumen de resultados – mezcla modificada con elastómero

Elastómero	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%
7,5	2,173	3300,4	15,87	5,47	17,4	70,1
Valores de aceptación (NEVI-12 405-5.04, 2013)						
Mín	--	1800	8	3	14	65
Máx	--	--	14	5	--	75
Condición	--	cumple	No cumple 13,36% más	No cumple 9,40% más	cumple	cumple

6.3.2. Material: 50% de partículas de elastómero y 50% de escarcha de RPET pasante del tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40.

Tabla 45.
Propiedades de la mezcla asfáltica compactada- mezcla modificada con material 50E-50P

Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Saturado Sup Seca	Peso sumergido	Volumen Briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	Gravedad específica teórica máxima medida	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo	
													Medida	Fac. Cor.	Corregida		
#	Pmm	Pb	Ps	Pa	SSS	Psum	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F	
%	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(---	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0.01")	
5	1	100	6,7	93,3	1120,13	1123,77	603,06	520,71	2,151	2,293	6,17	18,22	66,13	3599	1	3599	14,0
	2	100	6,7	93,3	1119,16	1124,04	604,17	519,87	2,153	2,293	6,10	18,16	66,40	3446	1	3446	14,5
	3	100	6,7	93,3	1119,44	1123,97	604,97	519,00	2,157	2,293	5,92	18,00	67,11	3523	1	3523	16,0
Promedio							519,86	2,154	2,293	6,1	18,13	66,54	3522,4		15		
10	1	100	6,7	93,3	1123,97	1127,56	607,23	520,33	2,160	2,292	5,76	17,88	67,76	3498	1	3498	15,5
	2	100	6,7	93,3	1123,97	1126,96	607,90	519,06	2,165	2,292	5,53	17,68	68,70	3401	1	3401	17,0
	3	100	6,7	93,3	1122,99	1128,01	606,34	521,67	2,153	2,292	6,09	18,16	66,48	3722	1	3722	15,5
Promedio							520,35	2,159	2,292	5,8	17,91	67,65	3540,4		16		
15	1	100	6,7	93,3	1127,43	1131,83	608,76	523,07	2,155	2,300	6,30	18,06	65,10	3551	0,96	3409	18,5
	2	100	6,7	93,3	1125,99	1130,31	610,11	520,20	2,165	2,300	5,91	17,71	66,65	3416	1	3416	16,0
	3	100	6,7	93,3	1126,90	1130,44	609,34	521,10	2,163	2,300	5,99	17,79	66,31	3701	1	3701	17,0
Promedio							521,46	2,161	2,300	6,1	17,85	66,02	3508,4		17		
20	1	100	6,7	93,3	1132,23	1136,04	608,17	527,87	2,145	2,298	6,66	18,46	63,95	3686	0,96	3538	17,0
	2	100	6,7	93,3	1130,54	1134,54	610,26	524,28	2,156	2,298	6,16	18,02	65,84	3372	0,96	3237	18,5
	3	100	6,7	93,3	1130,98	1135,40	607,34	528,06	2,142	2,298	6,79	18,58	63,44	3832	0,96	3679	16,5
Promedio							526,74	2,148	2,298	6,5	18,35	64,41	3484,9		17		
25	1	100	6,7	93,3	1135,01	1139,07	611,78	527,29	2,153	2,296	6,25	18,17	65,59	3599	0,96	3455	18,5
	2	100	6,7	93,3	1133,37	1138,70	612,25	526,45	2,153	2,296	6,24	18,16	65,64	3510	0,96	3370	20,5
	3	100	6,7	93,3	1132,19	1137,20	611,23	525,97	2,153	2,296	6,25	18,17	65,59	3490	0,96	3350	18,0
Promedio							526,57	2,153	2,296	6,2	18,17	65,61	3391,5		19		

Tabla 46.
Propiedades de una mezcla asfáltica compactada mezcla modificada con material 50E-50P

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de los agregados	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla
Pb	Gse	Pba	Pbe
(%)	---	(%)	(%)
6,7	2,524	1,137	5,639
6,7	2,524	1,137	5,639
6,7	2,524	1,137	5,639
Promedio	2,524	1,137	5,639
6,7	2,524	1,128	5,647
6,7	2,524	1,128	5,647
6,7	2,524	1,128	5,647
Promedio	2,524	1,128	5,647
6,7	2,534	1,295	5,491
6,7	2,534	1,295	5,491
6,7	2,534	1,295	5,491
Promedio	2,534	1,295	5,491
6,7	2,531	1,243	5,541
6,7	2,531	1,243	5,541
6,7	2,531	1,243	5,541
Promedio	2,531	1,243	5,541
6,7	2,529	1,208	5,573
6,7	2,529	1,208	5,573
6,7	2,529	1,208	5,573
Promedio	2,529	1,208	5,573
Promedio Total	2,528	1,202	5,578

Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica modificada en relación a las gravedades específicas:

Tabla 47.
Condición de aceptación en base a las gravedades específicas

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2,457	<	2,528	<	2,646

Para realizar las gráficas de relación para el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas compactadas, se obtiene el siguiente resumen de datos, basado en los resultados promedio de la Tabla 45.

Tabla 48.
Resumen de datos

Asfalto	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%
5,0	2,154	3522	15	6,1	18,1	66,5
10,0	2,159	3540	16	5,8	17,9	67,6
15,0	2,161	3508	17	6,1	17,9	66,0
20,0	2,148	3485	17	6,5	18,4	64,4
25,0	2,153	3392	19	6,3	18,2	65,6

La determinación del porcentaje óptimo de material 50E-50P, como material modificador, se realiza tomando en cuenta la gráfica de estabilidad, se identifica el punto en el que existe un cambio de valor, no se utiliza el gráfico del porcentaje de vacíos puesto que los valores sobrepasan el límite máximo aceptable de 5%.

Analizando la curva de estabilidad se tiene el punto de cambio de valor a 3536,6 lb que corresponde a 10% de elastómero, como se puede observar en el Gráfico *Material 50E-50P (%) vs Estabilidad (lb)*. A pesar que la estabilidad disminuye al aumentar el porcentaje de material modificador, todos los valores se encuentran por encima del límite mínimo permitido por la NEVI-12 de 1800lb.

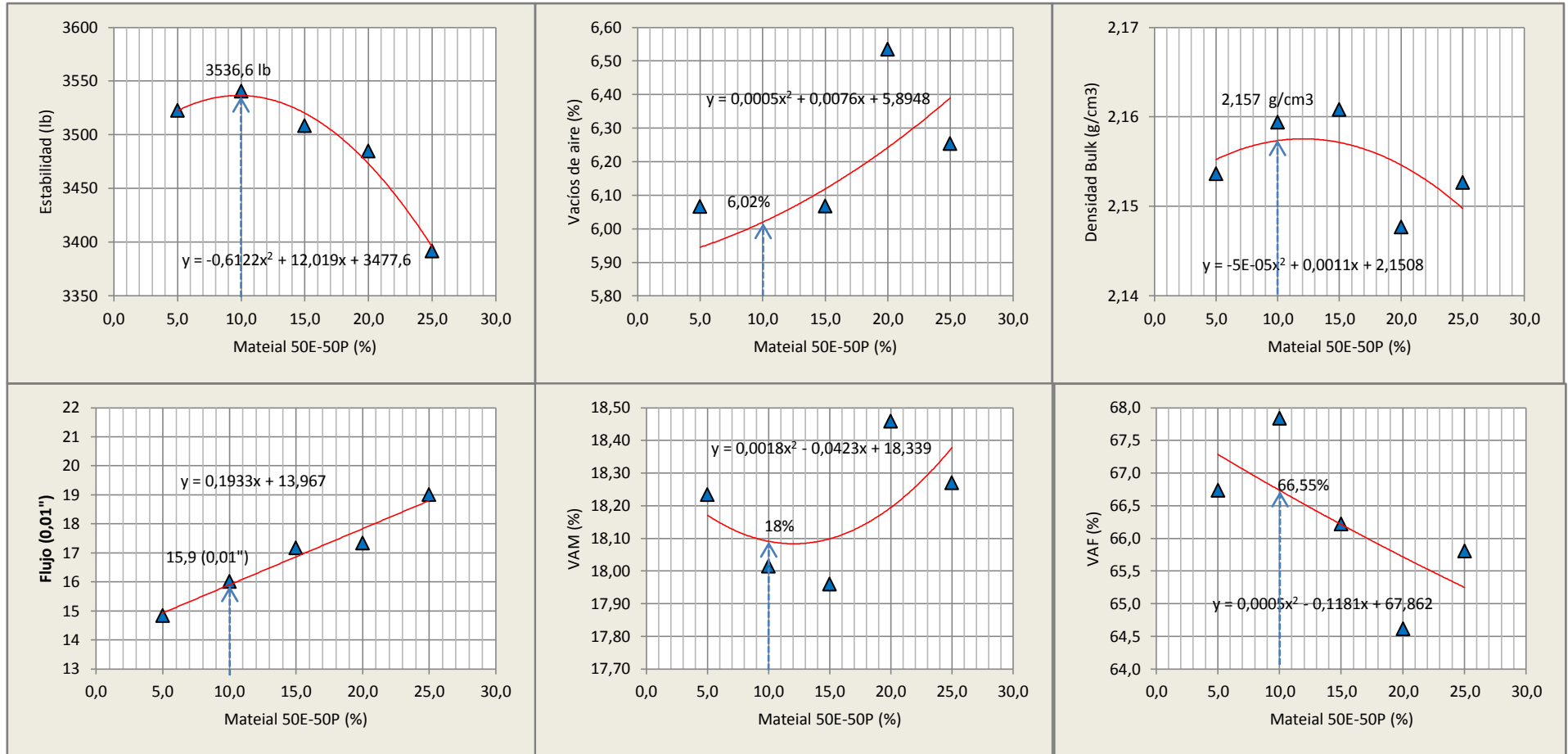


Gráfico 7. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – modificada con material 50E-50P

Si bien es cierto que el 6,02% de vacíos está por encima del valor máximo permitido de 5%, hay que aclarar que la diferencia es del 20,40% más.

La densidad Bulk disminuye a medida que aumenta el porcentaje de elastómero, por otra parte el volumen de las briquetas aumenta con la adición del elastómero, se experimenta esponjamiento.

El flujo se encuentra por encima del rango máximo permitido independientemente del porcentaje de elastómero utilizado, se presenta en forma ascendente, para el material óptimo de elastómero se tiene 15,90 (0,01”) que es 13,57% mayor al 14 (0,01”) de flujo permitido.

Los vacíos en el agregado mineral cumplen con el valor mínimo permitido de 14%. Luego del análisis en las gráficas para determinar el comportamiento de la mezcla compactada con el 10% de material 50E-50P se presenta un resumen de resultados:

Tabla 49.

Resumen de resultados – mezcla modificada con material 50E-50P

50E-50P	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
%	g/cm ³	lb	0,01”	%	%	%
10	2,157	3536,6	15,9	6,02	18	66,55
Valores de aceptación (NEVI-12 405-5.04, 2013)						
Mín	--	1800	8	3	14	65
Máx	--	--	14	5	--	75
Condición	--	cumple	No cumple	No cumple	cumple	cumple
			13,57% más	20,40% más		

6.4. Análisis comparativo de resultados de los tres tipos de mezclas asfálticas.

Para este análisis se toma como base los datos finales obtenidos en cada una de las propiedades de la mezcla asfáltica normal (mezcla patrón) y se analiza las variaciones con respecto a los porcentajes de material modificador utilizado. Para este análisis no se utiliza las líneas de tendencia.

Tabla 50.
Propiedades de la mezcla patrón

Asfalto	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
%	g/cm ³	lb	0,01''	%	%	%
6,7	2,206	3218,2	12,08	4	16,20	75,1

6.4.1. Relación - Vacíos de aire

Vacíos (%) - adición de Elastómero		Vacíos (%) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	4,0	0	4,0
5	4,9	5	6,1
10	5,4	10	5,8
15	5,9	15	6,1
20	5,9	20	6,5
25	6,2	25	6,3

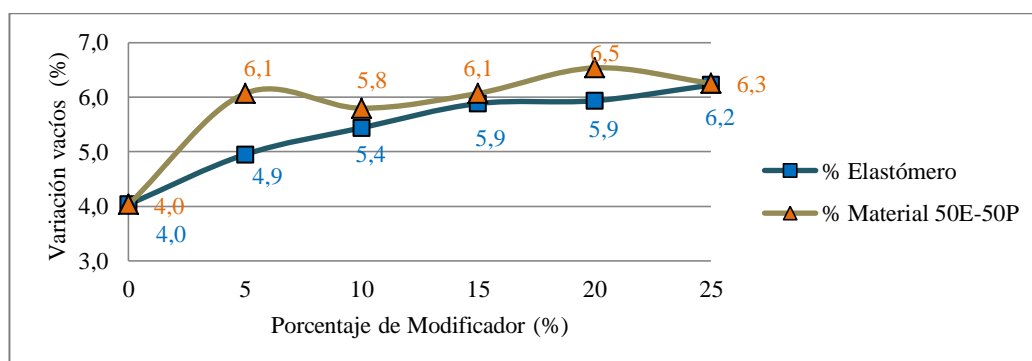


Gráfico 8. Variación de vacíos

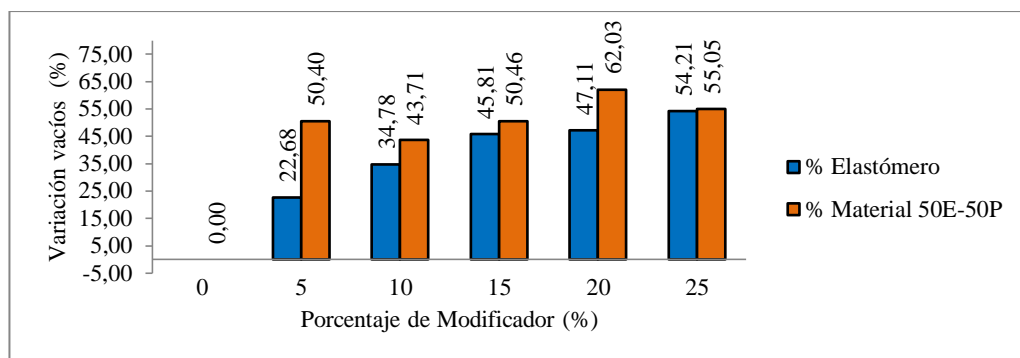


Gráfico 9. Variación porcentual de vacíos

Con relación a la mezcla patrón, en las dos mezclas modificadas se incrementa el porcentaje de vacíos, superando límite máximo permitido de 5%, sin embargo la mezcla modificada con elastómero presenta mejores resultados.

6.4.2. Relación – Densidad Bulk

Densidad Bulk (g/cm ³) -adición de Elastómero		Densidad Bulk (g/cm ³) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	2,206	0	2,206
5	2,178	5	2,154
10	2,165	10	2,159
15	2,158	15	2,161
20	2,157	20	2,148
25	2,146	25	2,153

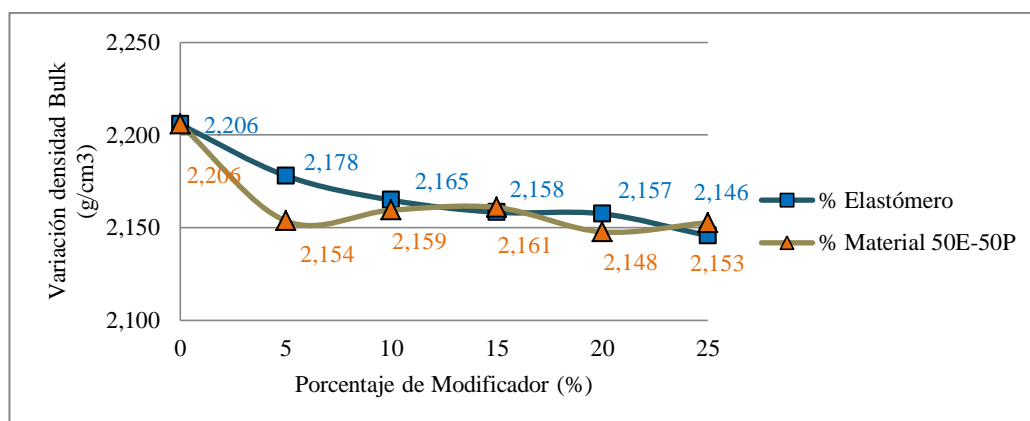


Gráfico 10. Variación de Densidad Bulk

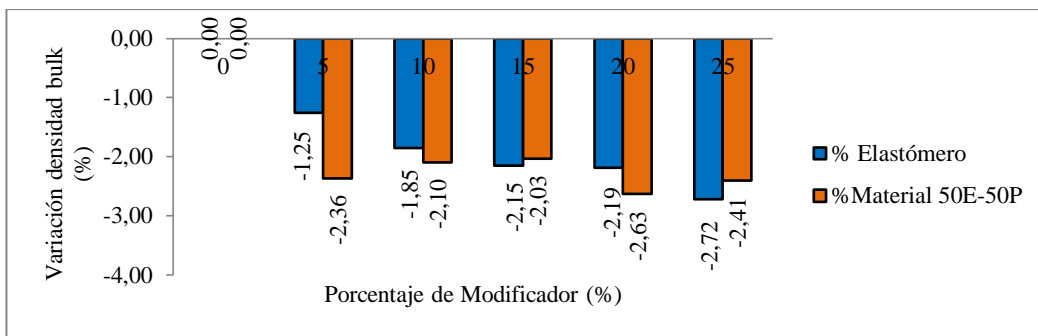


Gráfico 11. Variación porcentual de densidad Bulk

Las dos mezclas modificadas disminuyen la densidad Bulk debido al esponjamiento que experimentan. La mezcla modificada con elastómero presenta mejores resultados al 5%, 10%, y 20% de adición de material y la mezcla modificada con material 50E-50P presenta mejores resultados al 15% y 25%.

6.4.3. Relación – Estabilidad

Estabilidad (lb) - adición de Elastómero		Estabilidad (lb) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	3218,2	0	3218,2
5	3298,9	5	3522,4
10	3301,6	10	3540,4
15	3199,6	15	3508,4
20	3220,5	20	3484,9
25	2997,1	25	3391,5

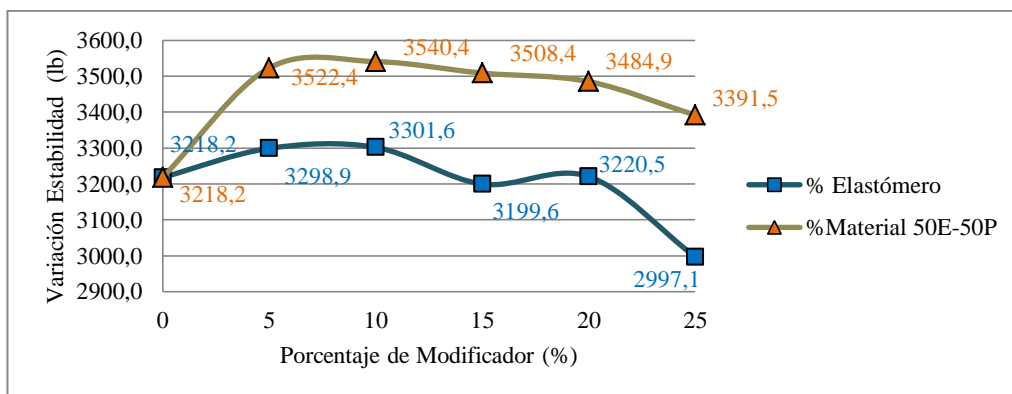


Gráfico 12. Variación de Estabilidad

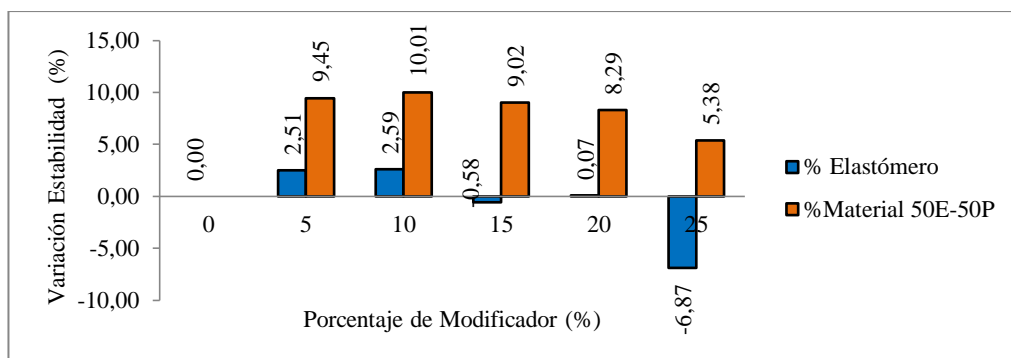


Gráfico 13. Variación porcentual de Estabilidad

La mezcla modificada con material 50E-50P presenta en todos los porcentajes de adición un incremento en la estabilidad respecto a la mezcla patrón, por otra parte la mezcla modificada con elastómero presenta incrementos en 5% y 10% de adición y en el 25% un considerable decremento de estabilidad.

6.4.4. Relación – Flujo

Flujo (0,01") - adición de Elastómero		Flujo (0,01") - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	12,08	0	12,08
5	15,7	5	14,8
10	15,8	10	16,0
15	18,2	15	17,2
20	19,8	20	17,3
25	21,8	25	19,0

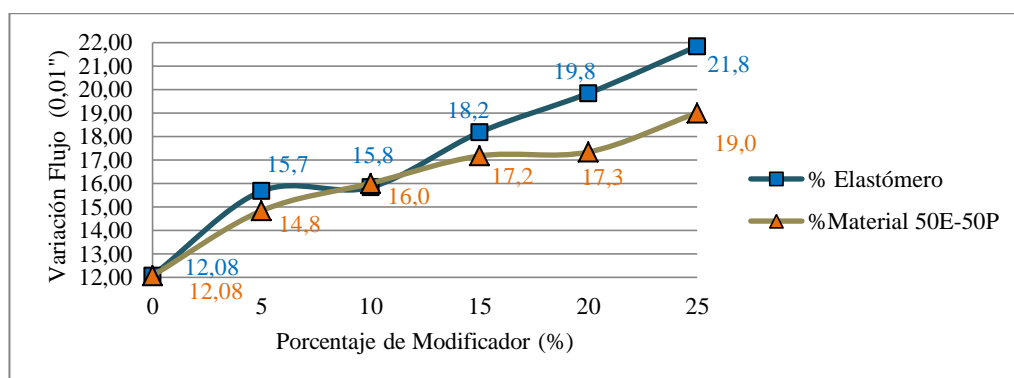


Gráfico 14. Variación de Flujo

En las dos mezclas modificadas se incrementa el flujo debido a la adición del elastómero y material 50E-50P, que hace la mezcla más plástica. Sin embargo los mejores resultados los presenta la mezcla modificada con material 50E-50P.

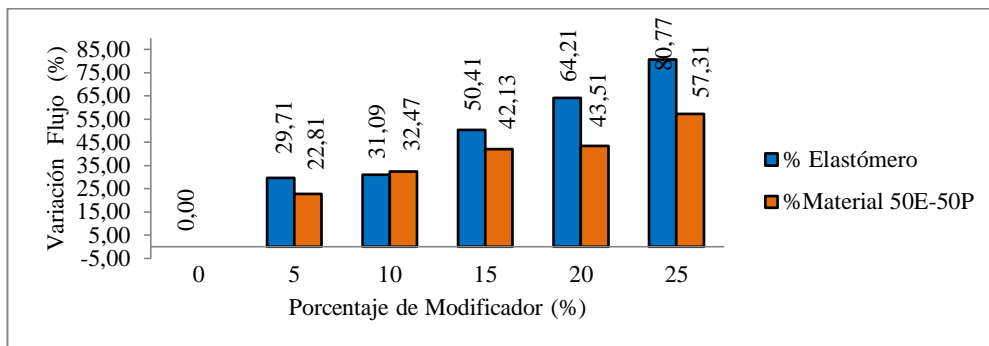


Gráfico 15. Variación porcentual de Flujo

6.4.5. Relación – VAM

VAM (%) - adición de Elastómero		VAM (%) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	16,20	0	16,20
5	17,31	5	18,23
10	17,81	10	18,01
15	18,06	15	17,96
20	18,09	20	18,46
25	18,53	25	18,27

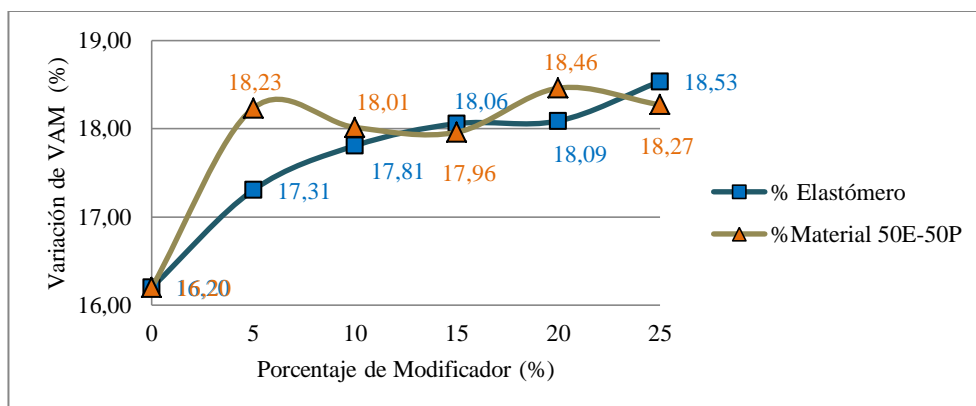


Gráfico 16. Variación de VAM

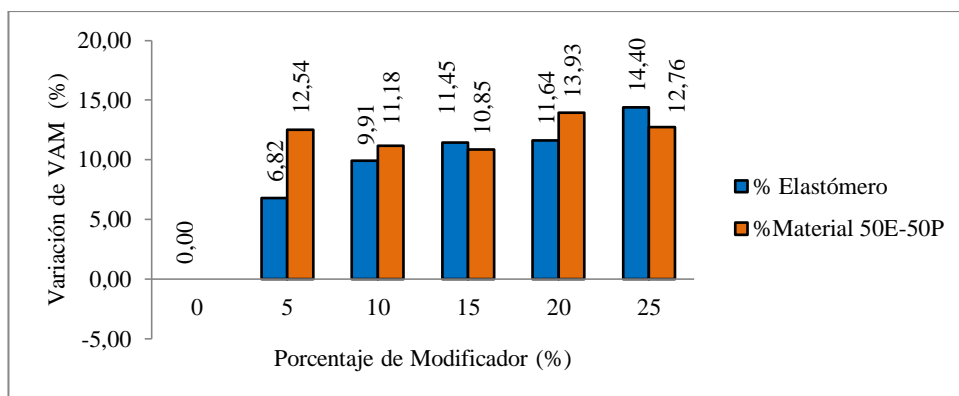


Gráfico 17. Variación porcentual de VAM

Las dos mezclas modificadas cumplen con el límite mínimo de 14%, el comportamiento de las dos mezclas a lo largo de los diferentes porcentajes de adición de material modificador es aceptable.

6.4.6. Relación – VAF

VAF (%) - adición de Elastómero		VAF (%) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	75,1	0,0	75,1
5	71,41	5	66,74
10	69,48	10	67,84
15	67,44	15	66,22
20	67,21	20	64,61
25	66,46	25	65,80

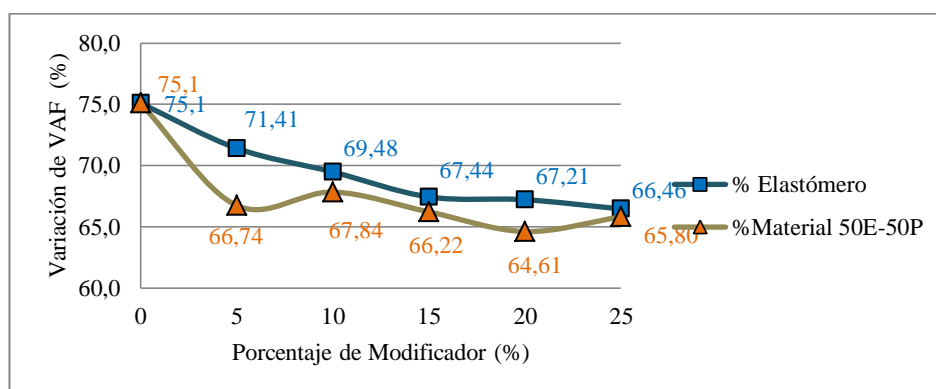


Gráfico 18. Variación de VAF

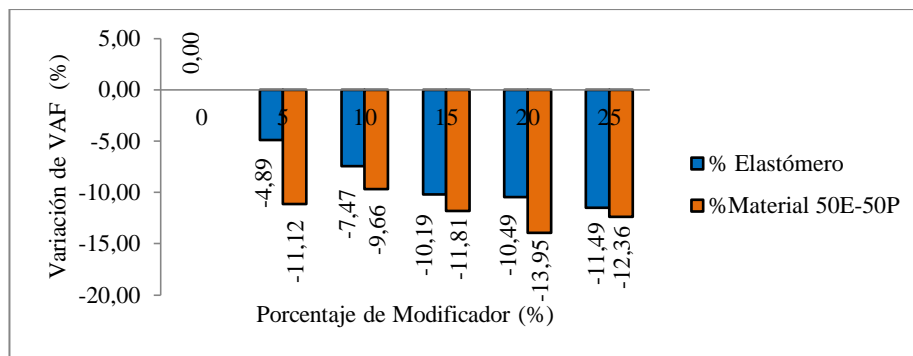


Gráfico 19. Variación porcentual de VAF

En las dos mezclas modificadas se disminuye el porcentaje de vacíos llenos de asfalto respecto al 75,1% de la mezcla patrón, todos se encuentran dentro del rango de 65% a 75%, excepto la mezcla modificada con el 20% de material 50E-50P.

6.4.7. Relación – Volúmenes

Volumen (cm3) - adición de Elastómero		Volumen (cm3) - adición de material 50E-50P	
% Elastómero	Promedio final	% 50E-50P	Promedio final
0	506,43	0	506,43
5	514,43	5	519,86
10	519,25	10	520,35
15	522,81	15	521,46
20	524,29	20	526,74
25	528,51	25	526,57

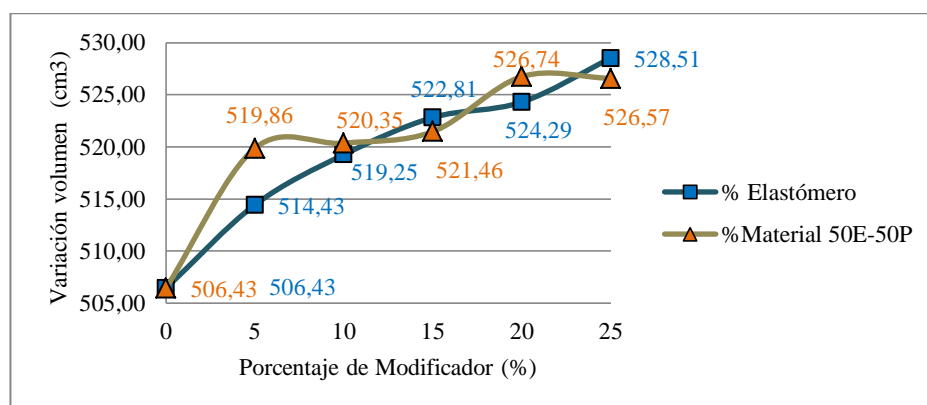


Gráfico 20. Variación de volúmenes

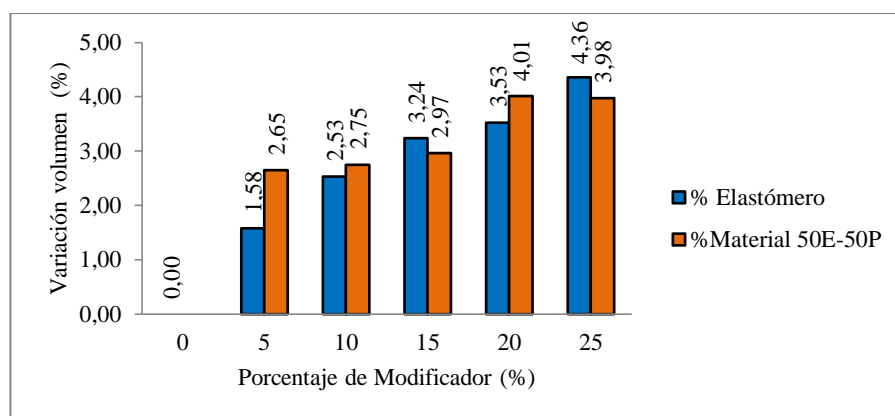


Gráfico 21. Variación porcentual de volúmenes

Se observa que los especímenes de mezclas asfálticas modificadas, con los dos tipos de material utilizados, poseen mayor volumen, debido al esponjamiento experimentado por la adición de materiales plásticos a las mezclas.

6.5. Análisis comparativo de resultados entre los porcentajes óptimos de los materiales modificadores y la mezcla patrón.

Para este análisis se toma como base los datos obtenidos en cada una de las propiedades de la mezcla asfáltica normal (mezcla patrón) y los datos de las propiedades de las mezclas modificadas, obtenidos a partir de la determinación del porcentaje óptimo de material modificador. Así se tiene:

Tabla 51.
Propiedades de los tres tipos de mezclas asfálticas

Tipo de mezcla	Asfalto	Modificador	Bulk	Estabilidad	Flujo	Va	VAM	VAF
--	%	%	g/cm ³	lb	0,01"	%	%	%
Mezcla patrón	6,7	0	2,206	3218,2	12,08	4,00	16,2	75,1
Elastómero	6,7	7,5	2,173	3300,4	15,87	5,47	17,4	70,1
50E-50P	6,7	10	2,157	3536,6	15,9	6,02	18,0	66,5

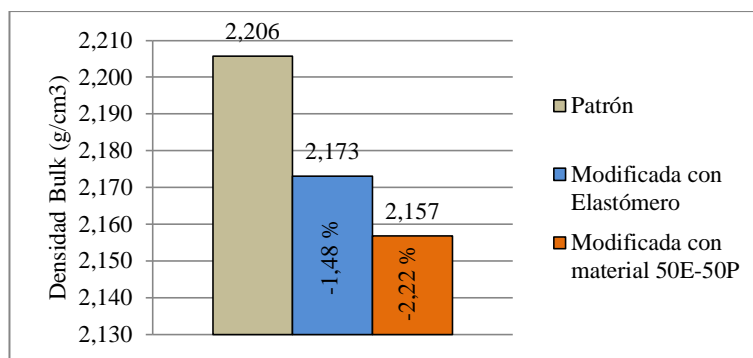


Gráfico 22. Variación de Densidad Bulk

Al aumentar el volumen de las briquetas, por esponjamiento, disminuye la densidad Bulk, sin embargo la mezcla que presenta menos disminución de densidad bulk es la mezcla modificada con elastómero 7,5% de contenido.

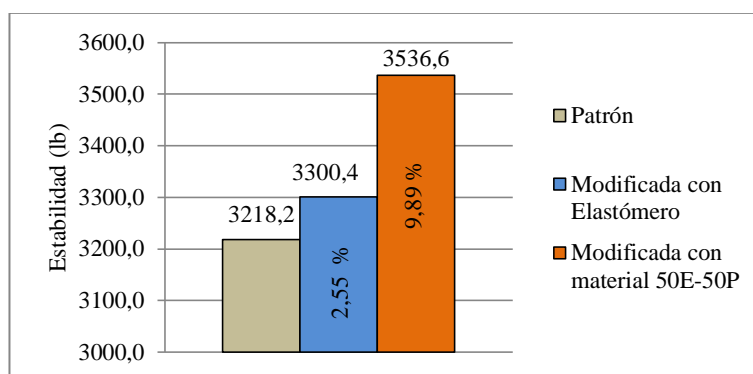


Gráfico 23. Variación de Estabilidad

El mayor incremento de Estabilidad se da en la mezcla modificada con material 50E-50P.

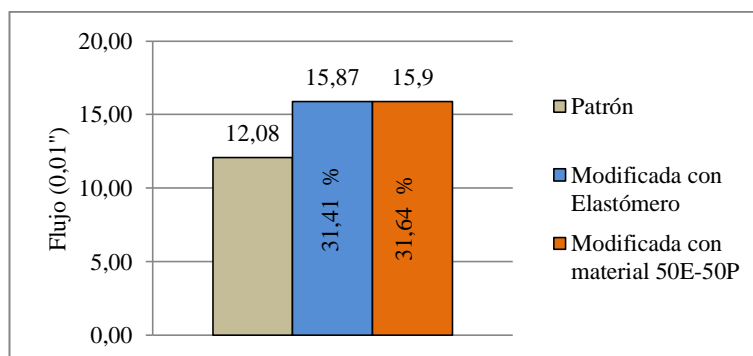


Gráfico 24. Variación de Flujo

El incremento de flujo en las mezclas modificadas es prácticamente el mismo.

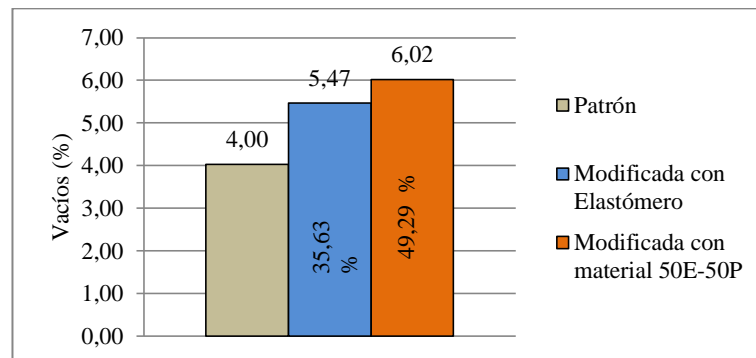


Gráfico 25. Variación de Vacíos

El incremento de vacíos se da en las dos mezclas asfálticas modificadas, debido al aumento del volumen de las briquetas y la disminución de la Densidad Bulk, mezcla modificada que presenta el menor incremento de vacíos es la modificada con elastómero.

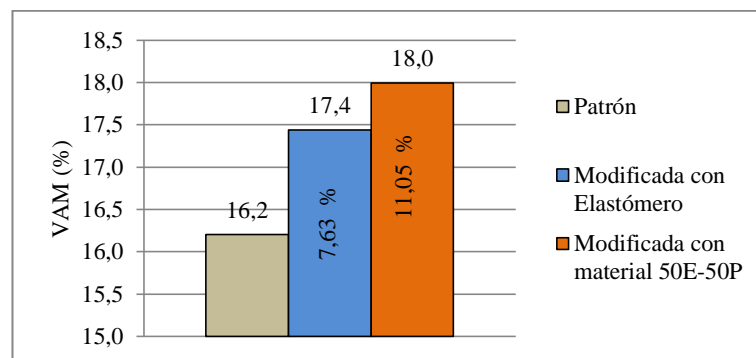


Gráfico 26. Variación de VAM

Con relación al porcentaje de vacíos en el agregado mineral, los incrementos que se presentan en las dos mezclas cumplen con el límite mínimo de 14%, sin embargo la mezcla modificada con elastómero presenta menos vacíos en el agregado mineral, lo cual es muy favorable en el comportamiento de la mezcla.

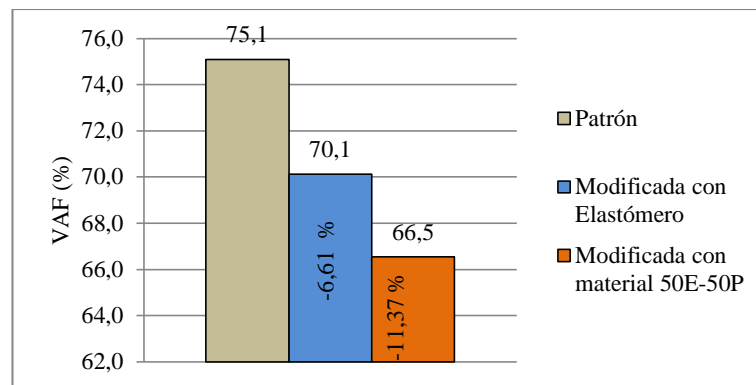


Gráfico 27. Variación de VAF

A pesar que en los dos tipos de mezclas modificadas se presenta una disminución en el porcentaje de vacíos llenos de asfalto, aún se encuentran dentro del rango de 65% - 75%, esta disminución se debe a que el material modificador es introducido a la mezcla como un agregado fino y crea más vacíos para ser llenados de asfalto. La mezcla que presenta los mejores resultados es la mezcla modificada con elastómero que tiene más porcentaje de VAF.

6.6. Análisis de resultados del ensayo - Choque Térmico

Las mezclas utilizadas en este ensayo son: Mezcla asfáltica normal (mezcla patrón); Mezcla asfáltica modificada con 7,5% de elastómero; Mezcla asfáltica modificada con 10% de material 50E-50P. Se presentan las propiedades de mezclas:

Tabla 52.
Propiedades de mezclas asfálticas compactadas- choque térmico

	Briquet a	Mezcl a total	Contenid o de asfalto en la mezcla	Contenid o de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Saturad o Sup Seca	Peso sumergid o	Volumen Briquet a	Densida d Bulk de la mezcla	Gravedad específic a teórica máxima medida	Vacío s de aire	Vacío en el agregad o mineral	Vacío s llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
														Medid a	Fac. Cor.	Corregid a	
														Em	Fc	Ec	
#	Pmm	Pb	Ps	Pa	SSS	Psum	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F	
	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm3)	(g/cm3)	(---)	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0.01")	
Mezcla patrón	1	100	6,7	93,3	1117,0 1	1120,11	613,11	507,00	2,203	2,296	4,04	16,24	75,11	3067,5	1,04	3190	14,0
	2	100	6,7	93,3	1115,5 7	1119,02	609,32	509,70	2,189	2,296	4,67	16,80	72,17	2912,4	1	2912	11,5
	3	100	6,7	93,3	1117,8 9	1122,17	611,00	511,17	2,187	2,296	4,75	16,86	71,83	3287,0	1,04	3419	15,0
								Promedio	509,290	2,193	2,296	4,5	16,63	73,04			3173,7
Modificada con elastómero	1	100	6,7	93,3	1122,2 2	1125,83	604,23	521,60	2,151	2,290	6,05	18,21	66,79	3084,0	1	3084	18,5
	2	100	6,7	93,3	1121,9 8	1124,72	605,12	519,60	2,159	2,290	5,71	17,91	68,14	2906,6	1	2907	17,5
	3	100	6,7	93,3	1120,3 4	1124,56	607,34	517,22	2,166	2,290	5,41	17,65	69,35	3375,0	1	3375	17,0
								Promedio	519,473	2,159	2,290	5,7	17,93	68,09			3121,9
Modificada con 50E-50P	1	100	6,7	93,3	1123,4 0	1126,75	607,91	518,84	2,165	2,293	5,57	17,69	68,49	3216,4	1	3216	16,5
	2	100	6,7	93,3	1124,0 2	1128,11	605,34	522,77	2,150	2,293	6,23	18,26	65,88	3327,3	1	3327	15,5
	3	100	6,7	93,3	1122,7 0	1126,34	608,23	518,11	2,167	2,293	5,50	17,62	68,80	3112,1	1	3112	17,0
								Promedio	519,907	2,161	2,293	5,8	17,86	67,72			3218,6

Con este ensayo se determina la variación de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas luego de ser sometidas a cambios bruscos de temperatura. Los resultados de Estabilidad y Flujo de los tres tipos de mezclas asfálticas, antes y después del ensayo de choque térmico son los siguientes:

Tabla 53.

Datos de estabilidad y flujo antes y después del choque térmico

Tipo de mezcla	Asfalto	Modificador	Antes del choque térmico		Posterior al choque térmico	
			Estabilidad	Flujo	Estabilidad	Flujo
--	%	%	lb	0,01"	lb	0,01"
1 Mezcla patrón	6,7	0	3218,2	12,08	3173,7	13,5
2 Elastómero	6,7	7,5	3300,4	15,87	3121,9	17,7
3 50E-50P	6,7	10	3536,6	15,9	3218,6	16,3

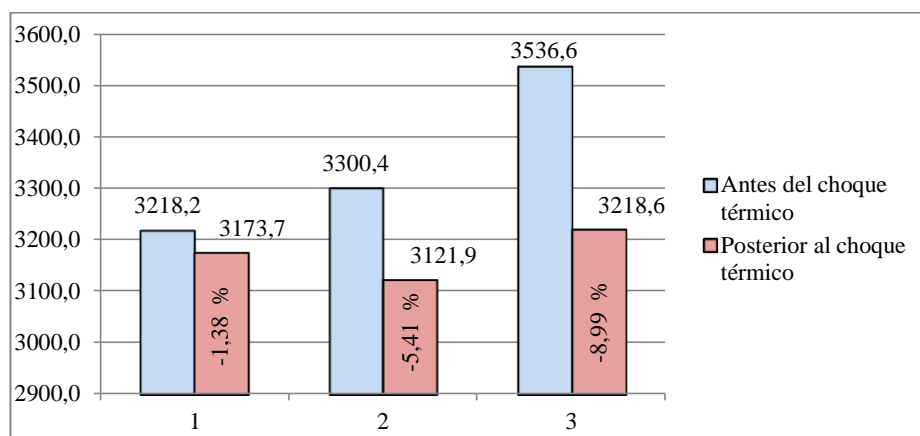


Gráfico 28. Variación de Estabilidad (lb) antes y después del choque térmico

Los tres tipos de mezcla experimentan disminución en la Estabilidad luego de ser sometidas a cambios bruscos de temperatura, sin embargo todas las mezclas mantienen la estabilidad por encima del límite mínimo de 1800 lb.

El mejor resultado se presenta en la mezcla asfáltica modificada con elastómero, cuya estabilidad decrece en menor porcentaje.

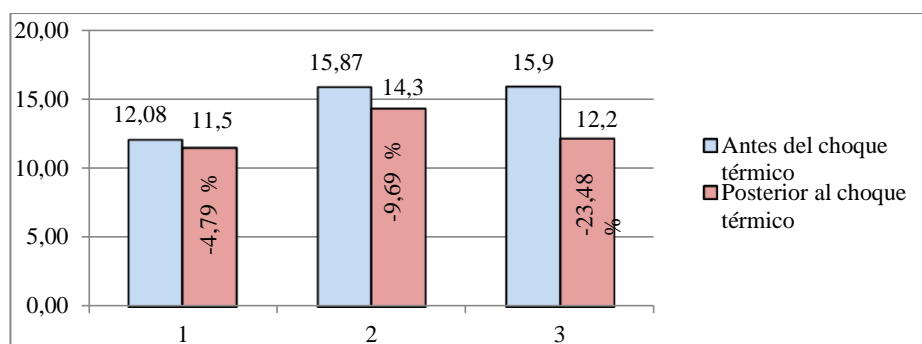


Gráfico 29. Variación de Flujo (0,01") antes y después del choque térmico

En esta propiedad, las mezclas experimentan una disminución del flujo, lo que indica que se produce un endurecimiento al someterlas a choque térmico. La mezcla con mejor resultado es la que contiene material 50E-50P. Finalmente basándose en lo expuesto en el literal 6.5 “Análisis comparativo de resultados entre los porcentajes óptimos de los materiales modificadores y la mezcla patrón”, se tiene lo siguiente:

Tabla 54.

Resultados finales, mezcla modificada con elastómero respecto a la mezcla modificada con 50E-50P

Propiedad	Mezclas a comparar		Análisis	
	1.- Modificada con elastómero	2.- Modificada con material 50E-50P	Mezcla 1 con respecto a la 2 (%)	Observación
Densidad Bulk (g/cm ³)	2,173	2,157	0,74	Mejora la densidad Bulk
Estabilidad (lb)	3300,4	3536,6	-7,16	Tiene menos riesgo ha convertirse en una mezcla rígida
Flujo (0,01")	15,87	15,9	-0,19	Se consideran prácticamente iguales
Vacíos (%)	5,47	6,02	-10,05	Mejora en el porcentaje de vacíos, sin embargo sobrepasa el límite máximo
VAM (%)	17,4	18	-3,45	Conviene valores bajos para garantizar un espesor durable de la película de asfalto
VAF (%)	70,1	66,5	5,45	Conviene valores altos para evitar que se generen más vacíos de aire
Choque Térmico	En la mezcla modificada con elastómero la estabilidad, luego del choque térmico baja en un 5,41%, en cambio la mezcla modificada con 50P-50E baja en 8,89%, por otra parte, la primera mezcla baja en flujo 9,69% y la segunda en 23,48%.			

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Con los datos expuestos en la Tabla 64 se determina que la mezcla con mejores resultados obtenidos en este proyecto de grado es la mezcla asfáltica modificada con el 7,5 % de partículas de elastómero (pasante del tamiz No. 10 y retenido en el tamiz No. 40).

Los materiales, elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno PET, pueden ser usados en la modificación de mezclas asfálticas, como modificadores en lugar de polímeros ya existentes en el mercado, de esta manera se genera una alternativa de aplicación de desechos no biodegradables que contribuya a la conservación del ambiente.

La baja densidad de los materiales modificadores es el principal factor que genera una variación considerable en las propiedades volumétricas de la mezcla, como en el porcentaje de vacíos que es uno de los factores más importantes y a medida que se incrementa el porcentaje de elastómero, los vacíos aumentan.

Comparando la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos de la mezcla modificada con elastómero con la mezcla resultante del proyecto de grado “Diseño de un pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico AC-20” realizado por los señores Huertas Javier y Cazar Daniel, esta mezcla es la modificada con escarcha de PET pasante del tamiz No.10 o retenida en el tamiz No.40. Esta comparación es posible, puesto que las dos mezclas

se realizan con la faja granulométrica de la Mezcla Asfáltica Normal MAC-2 de la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12. Se tiene entonces:

Mary Elizabeth Revelo Corella			Javier Huertas y Daniel Cazar		
Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno reciclados con ligante asfáltico AC-20			Diseño de un pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico AC-20		
Mezcla modificada con elastómero pasante del tamiz No.10 y retenido en el tamiz No.40			Mezcla modificada con escarcha de PET pasante del tamiz No.10 y retenido en el tamiz No.40		
Mezcla "A"			Mezcla "B"		
Estabilidad	Flujo	Vacíos de aire	Estabilidad	Flujo	Vacíos de aire
lb	0,01"	%	lb	0,01"	%
3300,4	15,87	5,47	2750	22	4
Observaciones:					
<ul style="list-style-type: none"> - No se usa el mismo agregado ni el mismo cemento asfáltico para los dos tipos de mezcla. - En Estabilidad: la mezcla "A" supera en 20.01% a la mezcla "B" - En flujo: la mezcla "B" sobrepasa en 38.63% a la mezcla "A" - En vacíos de aire: La mezcla "A" sobrepasa en 36.75% a la mezcla "B" 					

7.2. Recomendaciones

Por el flujo resultante en los dos tipos de mezclas: modificada con elastómero igual a 15,87 (0,01") y modificada con 50% del elastómero y 50% de RPET igual a 15,9 (0,01"), los cuales sobrepasan el límite superior de 14 décimas de pulgada, se recomienda que sea utilizadas en vías de tráfico liviano en donde el rango de variación del flujo es de 8 a 16 décimas de pulgada. (NEVI-12 405-5.04, 2013).

La mezcla modificada con elastómero se puede aplicar para capa de rodadura a pesar de su porcentaje de vacíos del 5,47% cuando el límite superior permitido es de

5% de vacíos, puesto que en obra puede mejorarse la compactación de la mezcla, así aumentas la densidad Bulk de la mezcla compactada y disminuyen los vacíos, esto se puede lograr incrementando la carga de compactación.

Se recomienda utilizar máximo el 5% de elastómero, debido a los elevados valores de flujo y porcentajes de vacíos que se obtiene con el incremento gradual de porcentaje de material modificador en la mezcla.

Debido a que cierta proporción de las partículas de elastómero es polvo, este influye en el aumento del flujo, por lo que se recomienda usar un material homogéneo, para tener un análisis más exacto del comportamiento de la mezcla.

Se recomienda aplicar los ensayos de rueda cargada para el análisis dinámico de las mezclas asfálticas modificadas diseñadas en este proyecto, puesto que si bien es cierto, el flujo no aumenta en gran porcentaje para los óptimos obtenidos de elastómero y material 50E-50P, hay que comprobar que no genera un ahuellamiento considerable a corto plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Amarillo. (13 de 2 de 2012). *Plastisoil: el novedoso pavimento fabricado con PET procedente de botellas*. Obtenido de Amarillo, verde y azul:
<http://www.amarilloverdeyazul.com/2012/02/plastisoil-el-novedoso-pavimento-fabricado-con-plastico-pet-procedente-de-botellas/>
- Cazar Daniel. Huertas Javier. (2014). *Diseño de un pavimento pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico AC-20*. Quito: s.e.
- Comunitat Valenciana. (15 de Abril de 2012). *La UPV desarrolla un aislante acústico con neumáticos reciclados para viviendas*. Obtenido de Noticias Comunitat Valenciana: <http://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2012/04/15/upv-desarrolla-aislante-acustico-neumaticos-reciclados-viviendas/897378.html>
- Coxworth, B. (30 de Noviembre de 2010). *Plastisoil to Displace Concrete*. Obtenido de Terra Forming Terra: <http://globalwarming-arclein.blogspot.com/2010/11/plastisoil-to-displace-concrete.html>
- Diario ABCV. (28 de Febrero de 2014). *Elastómeros, Termoplásticos*. Obtenido de Diario ABCV: <http://diarioabcv.blogspot.com/2014/02/elastomeros-termplasticos.html>
- Diseño de mezclas. (s.f de s.f de s.f). *Tesis disiseño de mezclas*. Obtenido de Tesis disiseño de mezclas,:
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf
- ENKADOR. (s.f de s.f de s.f). *Proyecto Reciclaje PET*. Obtenido de Proyecto Reciclaje PET:
[file:///C:/Users/admin/Downloads/Presentacion%207Reciclaje%20PETENKADOR%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/Presentacion%207Reciclaje%20PETENKADOR%20(3).pdf)
- Equipo de redacción de terra.org. (8 de Febrero de 2011). *Impermeabilización ecológica de una terraza*. Obtenido de Terra ecología práctica:
<http://www.terra.org/categorias/articulos/impermeabilizacion-ecologica-de-una-terraza>
- Equipo editorial de construcción.vilssa. (4 de Mayo de 2013). *Ladrillos de plástico reciclado*. Obtenido de Edificae Vilssa: <http://www.construccion-y-reformas.vilssa.com/articulos/ladrillos-de-plastico-reciclado>

- Expreso. (11 de Septiembre de 2011). *ADOQUINES CON NEUMÁTICOS OTRA IDEA DE NEGOCIOS 'VERDE'*. Obtenido de SEMANA:
<http://www.semana.ec/ediciones/2011/09/11/actualidad/actualidad/adoquines-con-neumaticos-otra-idea-de-negocios-verde/>
- Grupo Ibercal. (s.f de s.f de s.f). *Nuestros desarrollos*. Obtenido de Grupo Ibercal:
<http://www.grupoibercal.com/es/content/nuestros-desarrollos>
- Grupo innovador del caucho. (18 de Marzo de 2011). *Grupo innovador del caucho*. Obtenido de Grupo innovador del caucho Cia. Ltda.: <http://giccuenca-ecuador.blogspot.com/>
- Guillermo Castro. (s.f de Diciembre de 2007). *REUTILIZACION, RECICLADO Y DISPOSICIÓN FINAL DEL CAUCHO*. Obtenido de REUTILIZACION, RECICLADO Y DISPOSICIÓN FINAL DEL CAUCHO:
http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Numatico.pdf
- HOY, Q. (27 de Octubre de 2012). *Ecuador marca récord Guinness por reciclaje de botellas de plástico*. Obtenido de HOY, Quito:
<http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/ecuador-marca-record-guinness-por-reciclaje-de-botellas-de-plastico-565155.html>
- Instituto de Asfalto. (1997). Métodos de diseño de mezclas. En Miembros del Instituto del Asfalto, *Métodos de diseño de mezclas* (6 ed., pág. 43). Lexington, Kentucky: d.e.
- Instituto del Asfalto. (1997). Métodos de diseño de mezclas. En M. d. Asfalto, *Métodos de diseño de mezclas* (6 ed., pág. 5). Lexington, Kentucky: d.e.
- Instituto del Asfalto. (1997). Métodos de diseño de mezclas. En M. d. Asfalto, *Métodos de diseño de mezclas* (6 ed., pág. 12). Lexington, Kentucky: d.e.
- Instituto del Asfalto. (1997). Métodos de diseño de mezclas. En Miembros del Instituto del Asfalto, *Métodos de diiseño de mezclas* (6 ed., pág. 60). Lexington, Kentucky: d.e.
- Instituto mexicano del transporte. (24 de Octubre de 2006). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Obtenido de Instituto mexicano del transporte,,:
<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>
- Jaime Plaza. Coord. de Sociedad. (4 de Noviembre de 2009). *Basura plástica amenaza al planeta*. Obtenido de EL COMERCIO.COM:
<http://www.elcomercio.com/actualidad/basura-plastica-amenaza-al-planeta.html>

- Luna Morocho Patricio. (s.f de Septiembre de 2013). *Estudio de la aplicación potencial de compuestos obtenidos con residuos de caucho reciclado provenientes de continental tire andina como materiales estructurales*. Obtenido de Repositorio, Universidad Técnica Salesiana:
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5150/1/UPS-CT002730.pdf>
- MAE Comunicado. (25 de Octubre de 2012). *Comunicados*. Obtenido de Ministerio del Ambiente,,:
<http://www.ambiente.gob.ec/author/administrador/page/8/?lang=zh>
- Manual de Gestión Integral. (s.f de s.f de s.f). *Plásticos*. Obtenido de Manual de Gestión Integral:
http://www.cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_3.2_plasticos.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2 de Agosto de 2013). *La Gestión Integral de Neumáticos Usados optimiza recursos para el manejo seguro de desechos*. Obtenido de Ministerio del Ambiente: <http://www.ambiente.gob.ec/la-gestion-integral-de-neumaticos-usados-optimiza-recursos-para-el-manejo-seguro-de-desechos/>
- MOP, O. F. (s.f de s.f de 2002). *Ministerio de Obras Públicas y Comunicación*. Obtenido de Ministerio de Obras Públicas y Comunicación:
http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf
- NEVI-12. (s.f de s.f de 2013). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador*. Obtenido de NEVI-12: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf
- NEVI-12 405-5.04. (s.f de s.f de 2013). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas*. Obtenido de Ministerio de Transporte y Obras Públicas:
http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf
- Noticias de Internet. (13 de Septiembre de 2012). *Las islas de plástico*. Obtenido de Ciencia: <http://e-ciencia.com/blog/divulgacion/las-islas-de-plastico/>
- Plástico. (12 de Julio de 2013). *Codificación del plástico*. Obtenido de Plástico:
<http://plasticoreciclar.blogspot.com/2013/07/codificacion-del-plastico.html>
- Plásticos de Ingeniería. (20 de Marzo de 2013). *Plásticos de Ingeniería*. Obtenido de Industrias JQ:
<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>

Programa de Gobierno 2013-2017. (3 de Enero de 2013). *Revolución Ecológica*.

Obtenido de Propuestas para el Socialismo del Buen Vivir:

<http://programagobiernopais.wordpress.com/2013/01/03/revolucion-ecologica/>

Recypet. (s.f de s.f de s.f). *Recypet Continental*. Obtenido de Quienes somos:

<http://www.recypet.com.ec/quienes-somos/>

Renovallanta Ecuador. (16 de Marzo de 2013). Renovallanta. *Renovallanta*. Quito, Pichincha, Ecuador: d.e.

Reyes Lizcano Freddy. (s.d de Mayo de 2011). *Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible*. Obtenido de Infraestructura Vial digital:

http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=225