



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO
REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GEOTEXTIL NO TEJIDO) Y
FIBRA DE VIDRIO PARA UN PAVIMENTO DE PRIMER ORDEN**

AUTOR: ARMIJOS OVIEDO, ISABEL IVETTE

DIRECTOR: ING. MORALES MUÑOZ, BYRON OMAR MSc.

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GEOTEXTIL NO TEJIDO) Y FIBRA DE VIDRIO PARA UN PAVIMENTO DE PRIMER ORDEN”** realizado por la señorita **ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de julio 2018



ING. BYRON OMAR MORALES MUÑOZ
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE**, con cédula de identidad N° 1723909733, declaro que este trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GEOTEXTIL NO TEJIDO) Y FIBRA DE VIDRIO PARA UN PAVIMENTO DE PRIMER ORDEN”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándose en citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 19 de julio 2018



ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE
C.C: 1723909733



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el Repositorio Institucional el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GEOTEXTIL NO TEJIDO) Y FIBRA DE VIDRIO PARA UN PAVIMENTO DE PRIMER ORDEN”** en forma total, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 19 de julio 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Armijos I', is written over a horizontal line.

ARMIJOS OVIEDO ISABEL IVETTE
C.C: 1723909733

DEDICATORIA

A mis padres, Emma y Galo por todo el amor, por formarme como una persona de bien y por enseñarme que todo por más difícil que parezca se lo puede lograr con esfuerzo y con confianza en Dios.

A mi hermana Diana, por ser una persona que a pesar de las dificultades siempre esta con esa energía positiva y cada día de mi vida la llena de alegría.

A mis tíos y tías, que desde pequeña me han brindado su apoyo y el amor incondicional.

Isabel Armijos

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza y permitirme culminar una etapa más en mi vida.

A mis padres, por el sacrificio y apoyo brindado para que pueda culminar una de mis metas.

A mi hermana, por ayudarme y brindarme su apoyo cuando lo necesité.

A Luis, por todo el apoyo, confianza, paciencia y cariño que me ha brindado durante estos años que ha formado parte de mi vida y durante la realización de este trabajo.

Al Ing. Haro, por los conocimientos impartidos, la paciencia y apoyo brindados durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Byron Morales, tutor de este proyecto de investigación agradezco la paciencia, consejos y conocimiento transmitido, los cuales me permitieron culminar este trabajo exitosamente.

A los docentes que conforman la carrera de Ingeniería Civil, por los conocimientos impartidos en clases los cuales han permitido formarnos como profesionales.

A todas las personas que directa o indirectamente aportaron en la realización de este trabajo de investigación.

A mis amigos/as y familiares que me han brindado su apoyo y han aportado momentos felices a mi vida.

Isabel Armijos

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPITULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
CAPITULO II.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Pavimentos.....	5
2.1.1 Clasificación de los pavimentos.....	5
2.1.2 Pavimentos flexibles.....	6
2.1.2.1 Estructura del pavimento flexible	7
2.1.2.2 Patologías en pavimentos flexibles	9
2.1.2.3 Evolución de los daños en una estructura de pavimento flexible	12
2.1.2.4 Mecanismos de daño del pavimento	13
2.2 Mezcla asfáltica en caliente (Método Marshall).....	16
2.2.1 Caracterización de los agregados.....	16
2.2.1.1 Análisis granulométrico para el agregado grueso y fino	16
2.2.1.2 Absorción y gravedad específica del agregado fino.....	17
2.2.1.3 Absorción y gravedad específica del agregado grueso.....	20
2.2.1.4 Resistencia a la abrasión del árido grueso	22
2.2.1.5 Ensayo de peladura.....	24
2.2.1.6 Equivalente de arena.....	25
2.2.2 Caracterización del asfalto.....	28
2.2.2.1 Ensayo de penetración.....	28
2.2.2.2 Punto de reblandecimiento.....	31

2.2.2.3 Índice de penetración.....	32
2.2.2.4 Gravedad específica del asfalto.....	33
2.2.2.5 Ductilidad.....	35
2.2.2.6 Punto de inflamación.....	36
2.2.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente	38
2.2.3.1 Estabilización granulométrica.....	38
2.2.3.2 Elaboración de briquetas.....	38
2.2.3.3 Gravedad específica Bulk (Gmb).....	41
2.2.3.4 Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall	44
2.2.3.5 Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	46
2.2.4 Gravedad específica del agregado.....	48
2.2.4.1 Gravedad específica neta de los agregados (Gsb).....	49
2.2.4.2 Gravedad específica aparente de los agregados (Gsa)	49
2.2.4.3 Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse).....	50
2.2.4.4 Verificación de gravedades específicas	50
2.2.5 Análisis volumétrico.....	51
2.2.5.1 Vacíos en el agregado mineral (VAM)	51
2.2.5.2 Vacíos de aire (Va).....	52
2.2.5.3 Vacíos llenos de asfalto (VFA).....	53
2.2.5.4 Contenido de asfalto	53
2.3 Diseño de la estructura del pavimento flexible.....	54
2.3.1 Método AASHTO 93	55
2.3.1.1 Ejes equivalentes	56
2.3.1.2 Confiabilidad (R).....	57
2.3.1.3 Desviación estándar del sistema (So).....	58
2.3.1.4 Criterios de comportamiento.....	58
2.3.1.5 Propiedades de los materiales	59
2.3.1.6 Características estructurales del pavimento	62
2.3.1.7 Diseño estructural del pavimento	63
2.3.2 Método Racional	64
2.3.2.1 Leyes del comportamiento.....	65
2.4 Rehabilitación de pavimentos flexibles.....	68
2.4.1 Diseño del refuerzo en pavimentos flexibles con el método AASHTO	69
2.4.1.1 Número estructural requerido para el tránsito futuro (SN_f).....	69
2.4.1.2 Número estructural del pavimento existente (SN_{ef})	70
2.4.1.3 Número estructural requerido para el refuerzo (SN_{ref}).....	71

2.4.1.4 Espesor de la capa de refuerzo (D_{ref})	71
2.5 Materiales de refuerzo	71
2.5.1 Geosintéticos.....	72
2.5.1.1 Funciones de los geosintéticos	72
2.5.1.2 Tipos de materiales geosintéticos.....	74
2.5.1.3 Geosintéticos para pavimentación y repavimentación	76
CAPITULO III	80
DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	80
3.1 Ensayos orientados al diseño Marshall	80
3.1.1 Obtención de la muestra de campo	80
3.1.2 Caracterización de los materiales componentes de la mezcla	81
3.1.2.1 Caracterización de los agregados	82
3.1.2.2 Caracterización del asfalto	91
3.1.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente (Método Marshall)	96
3.1.3.1 Estabilización granulométrica.....	96
3.1.3.2 Elaboración de briquetas.....	98
3.1.3.3 Gravedad específica Bulk (Gmb).....	99
3.1.3.4 Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall	100
3.1.3.5 Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	101
3.1.3.6 Gravedad específica del agregado.....	102
3.1.4 Fórmula maestra.....	108
CAPITULO IV	110
DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	110
4.1 Introducción.....	110
4.2 Diseño del pavimento mediante el método AASHTO 93	110
4.2.1 Ejes equivalentes	110
4.2.2 Confiabilidad.....	112
4.2.3 Desviación estándar del sistema	112
4.2.4 Índice de Serviciabilidad	112
4.2.5 Módulo resiliente y coeficiente estructural de capas	112
4.2.6 Drenaje	113
4.2.7 Diseño estructural del pavimento.....	113
4.3 Método Racional	115
4.3.1 Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles del pavimento.	115
4.3.2 Modelamiento de la estructura del pavimento en el programa Bisar 3.0 de la Shell	116
4.3.2.1 Cargas del sistema	117

4.3.2.2 Características de la estructura.....	117
4.3.2.3 Posición donde se desea calcular los parámetros.....	117
4.3.2.4 Resultado de parámetros calculados.....	118
4.3.2.5 Comparación de las sollicitaciones calculadas con las admisibles	118
CAPITULO V.....	120
ANÁLISIS DE LA POSICIÓN DEL REFUERZO PARA LA CARPETA ASFÁLTICA.....	120
5.1 Introducción.....	120
5.2 Propuestas de fibras de reforzamiento	120
5.2.1 Refuerzo con estera de fibra de vidrio y anhídrido polivinilico - bórax	122
5.2.1.1 Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio con anhídrido polivinilico -bórax	125
5.2.2 Refuerzo de estera de fibra de vidrio con isopreno	126
5.2.2.1 Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio con isopreno.....	128
5.3 Curva de comportamiento de la mezcla asfáltica reforzada y posición óptima del refuerzo	129
5.3.1 Sollicitaciones admisibles.....	129
5.3.2 Sollicitaciones de la carpeta asfáltica reforzada	129
5.3.3 Ubicación del refuerzo y curva de comportamiento	132
5.4 Ensayos mecánicos.....	133
5.4.1 Estabilidad y flujo	134
5.4.1.1 Geomalla de fibra de vidrio	134
5.4.1.2 Geotextil no tejido	135
5.4.1.3 Estera de fibra de vidrio y Anhídrido polivinilico - bórax	136
5.4.1.4 Estera de fibra de vidrio con isopreno	138
5.4.1.5 Resumen de resultados estabilidad y flujo.....	139
5.4.2 Ensayo de tracción indirecta	139
5.5 Desempeño de la carpeta asfáltica reforzada.....	142
CAPITULO VI	146
CASO DE APLICACIÓN: ANÁLISIS DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA AV. GENERAL RUMIÑAHUI, TRAMO ESPE - EL COLIBRÍ.....	146
6.1 Introducción.....	146
6.2 Descripción del tramo ESPE – El Colibrí	146
6.2.1 Entorno	147
6.3 Extracción de testigos.....	147
6.4 Análisis de las probetas extraídas	148
6.4.1 Ensayo de peladura.....	152
6.4.2 Estabilidad y flujo	155
6.4.3 Extracción cuantitativa de asfalto para pavimentos	156

6.4.3.1 Contenido de asfalto	157
6.4.3.2 Granulometría	158
6.5 Fallas en el tramo ESPE – El Colibrí	162
6.6 Diseño del refuerzo	164
6.6.1 Coeficientes estructurales adoptados según el estado del pavimento	164
6.6.2 Espesor de la capas del pavimento	165
6.6.3 Cálculo número estructural requerido y el espesor del refuerzo	165
6.7 Desempeño del pavimento rehabilitado con inclusión del refuerzo	166
CAPITULO VII	170
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
7.1 Conclusiones	170
7.2 Recomendaciones	175
BIBLIOGRAFÍA	176

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de fallas en pavimentos flexibles	11
Tabla 2 Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso	17
Tabla 3 Masa mínima de la muestra de ensayo	20
Tabla 4 Gradación de la muestra de ensayo	23
Tabla 5 Especificaciones para la carga	23
Tabla 6 Límites granulométricos según tamaño máximo nominal del agregado	38
Tabla 7 Densidad absoluta del agua y factores de conversión K para diferentes temperaturas	44
Tabla 8 Niveles recomendados de confiabilidad (R)	57
Tabla 9 Valores de ZR para diferentes grados de confiabilidad	57
Tabla 10 Desviación estándar (So)	58
Tabla 11 Serviciabilidad final (Pf)	58
Tabla 12 Características de drenaje del material de base y/o sub base granular	62
Tabla 13 Valores recomendados del coeficiente de ajuste (mi) para capas de base y sub base granulares	63
Tabla 14 Espesores mínimos de capas	64
Tabla 15 Coeficiente de Calage	66
Tabla 16 Valores del coeficiente estructural para capas de concreto asfáltico deterioradas	70
Tabla 17 Valores del coeficiente estructural para capas de base o subbase granular deterioradas	70
Tabla 18 Análisis granulométrico grava 3/4 pulgada	83
Tabla 19 Análisis granulométrico grava 1/2 pulgada	84
Tabla 20 Análisis granulométrico arena	85
Tabla 21 Resultados - gravedades específicas del agregado fino	86
Tabla 22 Resultados - gravedades específicas del agregado grueso	87
Tabla 23 Datos para el cálculo de resistencia a la abrasión del agregado grueso	88
Tabla 24 Resultados del ensayo equivalente de arena	90
Tabla 25 Resultados del ensayo de penetración	91
Tabla 26 Resultado del ensayo punto de Ablandamiento	92
Tabla 27 Resultado de la densidad y gravedad específica del asfalto	93
Tabla 28 Medida del punto de inflación	95
Tabla 29 Resumen de datos obtenidos en la caracterización del asfalto	95
Tabla 30 Porcentaje y peso de cada granulometría	96
Tabla 31 Estabilización granulométrica	97
Tabla 32 Resultados de la gravedad específica Bulk, densidad y porcentaje de agua absorbida	100
Tabla 33 Resultados de estabilidad y flujo Marshall	101
Tabla 34 Resultados de la Gravedad específica máxima	102
Tabla 35 Gravedad específica neta y porcentaje de cada tamaño de agregado	102
Tabla 36 Gravedad específica aparente para cada tamaño de agregado	103
Tabla 37 Cálculo de gravedad específica efectiva del agregado	104
Tabla 38 Propiedades de la mezcla asfáltica compactada – Mezcla patrón	105
Tabla 39 Verificación de las propiedades de la mezcla para 6.1% de asfalto respecto a la norma MTOP 2002 tabla 405.5.4	108
Tabla 40 Condición de aceptación de la mezcla en base a las gravedades específicas	108
Tabla 41 Fórmula maestra de la mezcla asfáltica patrón	109
Tabla 42 Cálculo de ejes equivalentes	111
Tabla 43 Cálculo - diseño de la estructura del pavimento flexible - método AASHTO 93	114
Tabla 44 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento	115
Tabla 45 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles del modelo estructural	115
Tabla 46 Características de las capas de la estructura del pavimento	116
Tabla 47 Cargas del modelo estructural	117

Tabla 48 <i>Características de las capas de la estructura del pavimento</i>	117
Tabla 49 <i>Posiciones para calcular los parámetros</i>	117
Tabla 50 <i>Esfuerzos, deformaciones y deflexiones calculados en el programa BISAR 3.0</i>	118
Tabla 51 <i>Comparación de las solicitaciones calculadas con las admisibles</i>	118
Tabla 52 <i>Dosificación lechada</i>	123
Tabla 53 <i>Tiempo de secado y temperatura</i>	124
Tabla 54 <i>Dosificación final de la membrana</i>	125
Tabla 55 <i>Módulo de elasticidad y desplazamiento máximo de la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax</i>	125
Tabla 56 <i>Módulo de elasticidad y desplazamiento máximo de la fibra de vidrio e isopreno</i>	128
Tabla 57 <i>Solicitaciones admisibles</i>	129
Tabla 58 <i>Características de las capas de la estructura del pavimento con refuerzo de la carpeta en distintas posiciones</i>	129
Tabla 59 <i>Solicitaciones en la carpeta asfáltica con refuerzo en diferentes posiciones</i>	131
Tabla 60 <i>Porcentaje de deformación radial a tracción de la carpeta respecto al admisible según la posición de refuerzo</i>	132
Tabla 61 <i>Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con geomalla de fibra de vidrio</i>	134
Tabla 62 <i>Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con geotextil no tejido</i>	135
Tabla 63 <i>Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax</i>	136
Tabla 64 <i>Resultados de estabilidad y flujo para probetas con refuerzo de fibra de vidrio con isopreno</i>	138
Tabla 65 <i>Resumen de resultados de estabilidad y flujo en la base de la carpeta</i>	139
Tabla 66 <i>Resultados - ensayo de tracción indirecta</i>	141
Tabla 67 <i>Espesor de la carpeta asfáltica según el refuerzo colocado</i>	142
Tabla 68 <i>Resultados - aumento del número de ejes equivalentes y tiempo de vida útil de carpeta reforzada</i>	144
Tabla 69 <i>Ubicación de los testigos extraídos</i>	148
Tabla 70 <i>Resultados de estabilidad y flujo de los testigos P₄ y P₉</i>	156
Tabla 71 <i>Contenido de asfalto capa asfáltica del tramo ESPE – El Colibrí</i>	157
Tabla 72 <i>Granulometría - testigo P₂ capa superior</i>	158
Tabla 73 <i>Granulometría - testigo P₅ capa superior</i>	159
Tabla 74 <i>Granulometría - testigo P₅ capa inferior</i>	160
Tabla 75 <i>Granulometría - testigo P₈ capa inferior</i>	161
Tabla 76 <i>Hoja de registro de falla del tramo ESPE – El Colibrí</i>	162
Tabla 77 <i>Porcentaje de falla transversal y piel de cocodrilo</i>	164
Tabla 78 <i>Coefficientes estructurales y de drenaje adoptados</i>	164
Tabla 79 <i>Espesor de las capas del pavimento existente</i>	165
Tabla 80 <i>Cálculo del número estructural y espesor del refuerzo</i>	165
Tabla 81 <i>Resultados del espesor de la carpeta de rehabilitación según el tipo de refuerzo colocado</i>	166
Tabla 82 <i>Resultados aumento de número de ejes equivalentes y tiempo de vida útil del pavimento rehabilitado con carpeta reforzada</i>	168

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de cargas en un pavimento flexible y un pavimento rígido	6
Figura 2. Estructura del pavimento flexible	7
Figura 3. Evolución de los daños en la estructura del pavimento flexible.....	12
Figura 4. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica.....	14
Figura 5. Deformación debida al fallo de la Subrasante	15
Figura 6. a) Muestra sumergida en agua por 24 horas, b) Secado uniforme de la muestra para obtener condición SSS.....	18
Figura 7. Proceso de lavado del material a ser ensayado	21
Figura 8. Preparación de la solución floculante	26
Figura 9. a) Lectura de arcilla b) lectura de arena.....	27
Figura 10. Penetrómetro.....	29
Figura 11. Muestra para el ensayo	30
Figura 12. Esquema del ensayo de penetración.....	30
Figura 13. Equipo para ensayo de reblandecimiento	31
Figura 14. Picnómetro para ensayo de gravedad específica del asfalto.....	34
Figura 15. a) Molde y placa para el ensayo, b) Ductilímetro.....	35
Figura 16. Aparato copa abierta de Cleveland	37
Figura 17. Molde de compactación.....	39
Figura 18. Pedestal y martillo compactador.....	39
Figura 19. Extractor de muestra	41
Figura 20. Briquetas en el baño de agua a $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$	45
Figura 21. Colocación del deformímetro en la varilla guía.....	46
Figura 22. Recipiente y bomba de vacío para ensayo gravedad específica máxima.....	47
Figura 23. a) Disgregando las partículas de la mezcla, b) mezcla completamente disgregada.....	47
Figura 24. Ilustración de los vacíos permeables e impermeables en el agregado	49
Figura 25. VAM en una probeta de mezcla compactada	52
Figura 26. Valores del coeficiente estructural (a_3) para Sub-base.....	60
Figura 27. Valores del coeficiente estructural (a_2) para base granular	61
Figura 28. Valores del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta asfáltica	62
Figura 29. Esquema – diseño de refuerzo pavimentos flexibles	69
Figura 30. a) Pavimento sin refuerzo, b) pavimento con refuerzo	77
Figura 31. Agregado en planta asfáltica Naranjo - López	81
Figura 32. a) Mezcla asfáltica inicial con agregado de Pintag, b) mezcla asfáltica después de realizado el ensayo de peladura	82
Figura 33. a) mezcla asfáltica inicial con agregado del río Pita, b) mezcla asfáltica después de realizado el ensayo de peladura	82
Figura 34. Muestra árido grueso y fino seco	82
Figura 35. Curva granulométrica grava 3/4 pulgada	83
Figura 36. Curva granulométrica grava 1/2 pulgada	84
Figura 37. Curva granulométrica - arena	85
Figura 38. Procedimiento realizado para obtener la gravedad específica del árido fino	86
Figura 39. Procedimiento del ensayo: gravedad específica del árido grueso.....	87
Figura 40. Procedimiento de ensayo: resistencia a la abrasión del árido grueso	88
Figura 41. Elaboración de la mezcla asfáltica.....	89
Figura 42. Procedimiento ensayo de peladura.....	89
Figura 43. Comparación de la mezcla asfáltica antes y después de ser sometida al ensayo.....	89
Figura 44. Procedimiento ensayo equivalente de arena.....	90

Figura 45. a) muestras de asfalto b) muestras en baño de agua a 25 °C	91
Figura 46. Procedimiento de ensayo punto de ablandamiento	92
Figura 47. Procedimiento – ensayo gravedad específica del asfalto	93
Figura 48. a) Colocación del asfalto en el molde, b) preparación de probeta para el ensayo	94
Figura 49. Ensayo de ductilidad en proceso	94
Figura 50. Procedimiento de ensayo: punto de inflamación	95
Figura 51. Curva granulométrica estabilizada	97
Figura 52. Comparación de altura de briqueta conformada con 1200 gr y 1050 gr de agregado	98
Figura 53. Preparación de la mezcla asfáltica	98
Figura 54. Procedimiento para la elaboración de briquetas	99
Figura 55. Briquetas compactadas en proceso de enfriamiento	99
Figura 56. Procedimiento del ensayo: gravedad específica Bulk	100
Figura 57. Procedimiento del ensayo: flujo y estabilidad Marshall	100
Figura 58. Preparación de la muestra – ensayo gravedad específica máxima teórica	101
Figura 59. Procedimiento del ensayo: gravedad específica máxima teórica	101
Figura 60. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón	106
Figura 61. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón	107
Figura 62. Esquema de las paciones donde se analizó esfuerzos, deformaciones y deflexiones	116
Figura 63. Esquema - diseño final de la estructura del pavimento flexible	119
Figura 64. Fiberglass chopped strand mat	121
Figura 65. Membrana de anhídrido polivinilico - bórax	122
Figura 66. Estructura de la molécula de isopreno	122
Figura 67. Materiales para la fabricación del polímero	123
Figura 68. Lanzado de bórax y polímero de goma	124
Figura 69. a) Proceso de secado del refuerzo, b) Resultado final	125
Figura 70. Fuerza – desplazamiento (fibra de vidrio con bórax)	126
Figura 71. Materiales para la fabricación del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno	127
Figura 72. Colocación del isopreno en la estera de fibra de vidrio	127
Figura 73. a) Proceso de secado del refuerzo, b) Resultado final	128
Figura 74. Fuerza – desplazamiento (fibra de vidrio e isopreno)	128
Figura 75. Curva teórica del comportamiento de la mezcla asfáltica con el refuerzo en varias posiciones	132
Figura 76. Elaboración de probetas reforzadas	133
Figura 77. Probetas con refuerzo en la base	133
Figura 78. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de geomalla de fibra de vidrio respecto de la no reforzada	134
Figura 79. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de geomalla de fibra de vidrio respecto de la no reforzada	135
Figura 80. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de geotextil no tejido respecto de la no reforzada	135
Figura 81. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de geotextil no tejido respecto de la no reforzada	136
Figura 82. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con bórax respecto a la no reforzada	137
Figura 83. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con bórax respecto a la no reforzada	137
Figura 84. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno respecto de la no reforzada	138
Figura 85. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno respecto de la no reforzada	138
Figura 86. Proceso del ensayo: tracción indirecta	140

Figura 87. a) Probeta ensayada sin refuerzo, b) Probeta ensayada con refuerzo	140
Figura 88. Porcentaje de deformación vertical.....	141
Figura 89. Espesor de la carpeta asfáltica según el refuerzo colocado, (cm).....	143
Figura 90. Número de ejes equivalentes según el refuerzo colocado en la carpeta asfáltica.....	145
Figura 91. Vida útil del pavimento según el refuerzo de la carpeta asfáltica, (años).....	145
Figura 92. Tramo ESPE – EL Colibrí.....	146
Figura 93. Extracción de núcleos del tramo ESPE – El Colibrí.....	148
Figura 94. Testigos extraídos del tramo ESPE – El Colibrí.....	148
Figura 95. Capas de la carpeta asfáltica.....	149
Figura 96. Testigo P ₁	149
Figura 97. Testigo del P ₃ al P ₅	150
Figura 98. Testigo del P ₆ al P ₈	151
Figura 99. Testigo P ₉ y P ₁₀	152
Figura 100. Procedimiento del ensayo de peladura a testigos de la vía ESPE – El Colibrí.....	153
Figura 101. Resultado del ensayo realizado al testigo P ₁	153
Figura 102. Resultado del ensayo realizado al testigo P ₃	154
Figura 103. Resultado del ensayo realizado al testigo P ₇	154
Figura 104. Resultado del ensayo realizado al testigo P ₁₀	155
Figura 105. Procedimiento ensayo Estabilidad y flujo a los testigos P ₄ y P ₉	155
Figura 106. Preparación de la muestra – ensayo de extracción.....	156
Figura 107. Procedimiento – ensayo de extracción	157
Figura 108. Resultado – ensayo extracción (izq. Agregado capa inferior, der. Agregado capa superior)	157
Figura 109. Curva granulométrica - testigo P ₂ (capa superior).....	159
Figura 110. Curva granulométrica - testigo P ₅ (capa superior).....	160
Figura 111. Curva granulométrica - testigo P ₅ (capa inferior).....	161
Figura 112. Curva granulométrica - testigo P ₈ (capa inferior).....	162
Figura 113. Espesor de la carpeta de rehabilitación según el tipo refuerzo colocado (cm).....	166
Figura 114. izq. Número de ejes equivalentes según tipo de refuerzo; der. Tiempo de vida útil según tipo de refuerzo (años)	169
Figura 115. Curva teórica del comportamiento de la mezcla asfáltica con el refuerzo en varias posiciones	171

RESUMEN

En el país se puede observar que las carreteras se ven afectadas por la combinación de factores como el tránsito (mayor para el cual el pavimento fue diseñado) y el clima (gradiente térmico), etc. que las deterioran con rapidez, requiriendo un mayor presupuesto para mantener las vías en óptimas condiciones. La presente investigación tiene como objeto la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica reforzada con geosintéticos y fibra de vidrio para un pavimento de primer orden frente a las leyes de fatiga y patologías de falla, con la finalidad de encontrar alternativas que incrementen la durabilidad de las vías. Para el desarrollo de la investigación se diseñó la mezcla asfáltica cuyas propiedades mecánicas se usaron, junto con otros factores, para el diseño del pavimento mediante el método AASHTO 93 y posteriormente se analizó, con el método racional, el comportamiento del mismo bajo deformaciones, esfuerzos y deflexiones. Para determinar la posición óptima del refuerzo se construyó la curva teórica del comportamiento de la mezcla asfáltica reforzada mediante el análisis de las deformaciones y deflexiones cuando el refuerzo se encuentra en diferentes posiciones de la altura de la carpeta y en la base de la misma. El comportamiento de esta curva se comprobó con ensayos mecánicos Marshall y tracción indirecta. Se concluyó que la posición óptima del refuerzo es la base de la carpeta asfáltica y, genera una optimización en el espesor de hasta 1cm y un aumento en el tiempo de vida útil del pavimento de 1 a 2 años, dependiendo del tipo de refuerzo colocado.

PALABRAS CLAVE:

- **MEZCLA ASFÁLTICA**
- **REFUERZO**
- **FATIGA**
- **VIDA ÚTIL**
- **POSICIÓN ÓPTIMA**

ABSTRACT

In our country, roads are affected by the combination of factors like the traffic (higher than the one used on the design) and the weather (thermal gradient), etc.; this elements deteriorate the roads faster and results in the need of expend more economical resources in order to keep the roads in optimal conditions. The current investigation intend to assess the performance of the asphalt mixture reinforced with geosynthetics and fiber glass for a first order pavements faced with the fatigue laws and failure pathologies, with the aim of finding alternate options that increases the roads lifetime. In the research development, the asphalt mixture was designed, and its properties, with other factors, were employed to design the pavement structure using AASHTO 93 method. Subsequently, the performance of this structure was analyzed under deformations, strains, deflections, using the rational method. A theoretical behavior curve was constructed by analyzing the deformation and deflection of the structure with the reinforcement in different positions along the asphalt layer and its bottom so the mixture reinforcement optimum position could be found. The behavior of this curve was proved with mechanical tests (Marshall and indirect tensile). It was, therefore, concluded that the optimum position of the reinforcement is the bottom of the asphalt layer and it generates an optimization of its thickness for up to 1cm, Also, an increase of the pavement lifetime from 1 to 2 years depending on the type of the reinforcement.

KEY WORDS:

- **ASPHALT MIXTURE**
- **REINFORCEMENT**
- **THEORETICAL CURVE**
- **LIFETIME**
- **OPTIMUM POSITION**

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

Con el aumento de la densidad poblacional y la necesidad de trasladar productos de una región a otra para su comercialización las antiguas civilizaciones crearon rutas regulares, abriendo senderos dando con esto origen a las carreteras. Las primeras carreteras se construyeron en Mesopotamia hacia el año 3500 a.C, les siguieron los chinos que construyeron un sistema de carreteras (la Ruta de la Seda) en torno al siglo XI a.C, y finalmente se expandió hacia Europa, la cual se caracteriza por un alto desarrollo en la construcción de caminos pavimentados (Tránsito Uasd, 2012).

Con el avance de la tecnología y la necesidad de dar solución a problemas que se presentan en las carreteras, tales como el deterioro prematuro de las mismas, se han buscado alternativas de solución a estos problemas. Así lo plantea Ossa et al (2013) en la investigación “Evaluación del desempeño de una malla de fibra de vidrio en el refuerzo de pavimentos” donde menciona que existen varias causas para el agrietamiento de los pavimentos como son la fatiga, cambios climáticos, pérdida de capacidad de carga de la estructura del pavimento, entre otros. Generando deterioro prematuro de la carpeta asfáltica, entrada de agua a la estructura del pavimento y un alto costo de mantenimiento.

En la investigación antes mencionada se aplicaron ensayos de resistencia, módulo de resiliencia a tensión indirecta y pruebas de flexión a carpetas asfálticas sin refuerzo y reforzadas con malla de fibra de vidrio localizada al interior de la carpeta, con el fin de evaluar el comportamiento de la capa de rodadura frente a la aparición de grietas por fatiga. Ossa et al (2013) concluye que la construcción de carpetas asfálticas reforzadas con mallas de fibra de vidrio es adecuada para mejorar su desempeño ya que, dependiendo del tipo y las características de la malla utilizada, el potencial de agrietamiento por fatiga puede disminuir de manera importante, y se logra con ello un aumento en la vida útil del pavimento.

Las investigaciones anteriormente descritas sirven como guía para el presente proyecto, el cual expone una opción de reforzamiento por medio de la aplicación de geosintéticos y fibra de vidrio como alternativa de refuerzo en la carpeta asfáltica.

1.2 Planteamiento del problema

Los daños en los pavimentos son un problema que afecta a las vías en todo el mundo, por lo que en varios países se han realizado investigaciones orientadas al uso de geosintéticos con el fin de aumentar el periodo de vida útil de las carreteras mediante su aplicación. Pero estas, en su mayoría, se han enfocado principalmente a la estructura del pavimento y al recapeo de vías, es decir, al mantenimiento y reconstrucción de las mismas, mas no al reforzamiento de la carpeta asfáltica de un pavimento nuevo y las investigaciones existentes están expuestas desde el punto costo / beneficio.

A nivel nacional se cuenta con 10 000 Km de red vial Estatal (Subsecretaría de Infraestructura del Transporte, 2017), que en su mayoría está conformada por hormigón asfáltico, pero se ha visto afectada por la combinación de varios factores como el cambio climático brusco que se presenta en las regiones del país, el cual engloba las fuertes lluvias y el gradiente térmico que varía de los 4°C - 23°C en un mismo día, así también el aumento del flujo vehicular en los últimos años ha ocasionado que los pavimentos trabajen con una carga mayor a la diseñada. Todos estos factores han afectado a la estructura del pavimento, generando patologías prematuras como el agrietamiento y el ahuellamiento, por lo cual se ve la necesidad de un mantenimiento correctivo o preventivo dependiendo de la gravedad, implicando altos costos en este rubro.

Las grandes ciudades del país poseen también un considerable porcentaje de vías de hormigón asfáltico, las cuales se han visto afectadas por condiciones externas a las consideradas en el diseño. Como se puede observar en las vías destinadas al trolebús en la Ciudad de Quito, mismas que presentan signos de deformaciones permanentes y baches en la carpeta asfáltica como causa de los factores antes mencionados y el efecto de la temperatura de contacto que se genera entre el trolebús y el pavimento.

Estos factores tienden a aumentar la tasa de deterioro de la mezcla asfáltica que se genera por procesos cíclicos de deformación y depresiones longitudinales inducidas por las tensiones a las que está sometida la mezcla, lo que también produce inseguridad e incomodidad en los usuarios. Por esta razón, se hace indispensable plantear una alternativa de refuerzo para solucionar los problemas en los pavimentos de una forma sencilla y controlando costos.

1.3 Justificación

El desarrollo en el área vial es indispensable para el crecimiento del país, y así mismo, mantener las vías en condiciones óptimas tiene un costo muy alto y este costo aumenta con el paso del tiempo debido a que el pavimento diseñado para un periodo de vida útil y para brindar un servicio determinado se ve reducido en capacidad por factores que lo deterioran con mayor rapidez.

Es importante buscar métodos que aumenten la durabilidad de las vías. Y una alternativa sencilla es la tecnología de los geosintéticos, los cuales en la actualidad se han convertido en una opción para solucionar proyectos de ingeniería por su impacto positivo en lo económico, técnico y ambiental.

El presente proyecto muestra la alternativa de utilizar geosintéticos como refuerzo de la carpeta asfáltica, lo cual incrementará la resistencia a la fatiga, retardará aparición de fisuras y permitirá orientar los máximos esfuerzos de tensión hacia el refuerzo. Con esto se permitirá optimizar los presupuestos para la conservación vial y su mantenimiento, esto porque se incrementará la vida útil de los pavimentos evitando daños prematuros (deformaciones permanentes excesivas) de las calzadas por cargas impuestas por el tránsito, cambios climáticos, etc.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del hormigón asfáltico reforzado con geosintéticos (geotextil no tejido) y fibra de vidrio para un pavimento de primer orden, frente a las leyes de fatiga y patologías de falla, mediante un análisis experimental y analítico.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales que componen la mezcla asfáltica (agregados y ligante)
- Diseñar la mezcla asfáltica patrón.
- Determinar la posición del refuerzo al interior de la carpeta asfáltica.
- Elaborar probetas de mezclas asfálticas con refuerzo y sin refuerzo.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos de las muestras.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimentos

Los pavimentos son estructuras conformadas por capas superpuestas de materiales seleccionados, adecuadamente compactadas y colocadas sobre la subrasante, que reciben de forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada de tal manera que estas no superen la capacidad portante del suelo de fundación de la vía (subrasante).

Desde el punto de vista del usuario, el pavimento es una superficie que debe permitir la circulación del tráfico en condiciones de seguridad y comodidad bajo cualquier condición climática durante un tiempo prolongado.

2.1.1 Clasificación de los pavimentos

La clasificación de los pavimentos está fundamentada en la estructura de los mismos, la naturaleza de su capa más superficial (superficie de rodadura) y el modo en el que transmiten las cargas hacia el suelo de cimentación (subrasante). El tipo de pavimento a utilizarse dependerá del tránsito de diseño, la importancia de la vía y las características mecánicas de la subrasante.

Entre los diferentes tipos de pavimentos se tiene: pavimentos flexibles, pavimentos rígidos, pavimentos semirígidos y pavimentos articulados. Los pavimentos como solución a un proyecto vial, se clasifican en pavimentos transitorios (solución a corto plazo), pavimentos de bajo volumen de tránsito (solución a mediano plazo) y pavimentos de alto volumen de tránsito (solución a largo plazo), (Guiller, Thenoux, & Barrera, 2002).

2.1.2 Pavimentos flexibles

Son estructuras viales conformadas por una carpeta bituminosa apoyada sobre capas de menor rigidez (base y sub base), compuestas por materiales granulares no tratados soportados en la subrasante o terreno natural (Rondón & Reyes, 2015).

Se caracteriza por la capacidad que tiene la estructura para flexionarse y adaptarse a las cargas a las que está expuesta. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cortantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocará fisuras por fatiga por la repetición de las cargas de tráfico. Al mismo tiempo la repetición de las tensiones y deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento producirán la formación de hundimientos en la huella de rueda, cuando el tráfico tiende a ser canalizado, y la ondulación longitudinal de la superficie cuando la heterogeneidad del pavimento fuera significativa (Bardales & Cheng, 2013).

El pavimento flexible, está construido con materiales menos rígidos que el hormigón y transmite a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo, por lo cual, el pavimento flexible normalmente requiere más capas y mayores espesores para resistir la transmisión de cargas a la subrasante (Giordani & Leone, 2015).

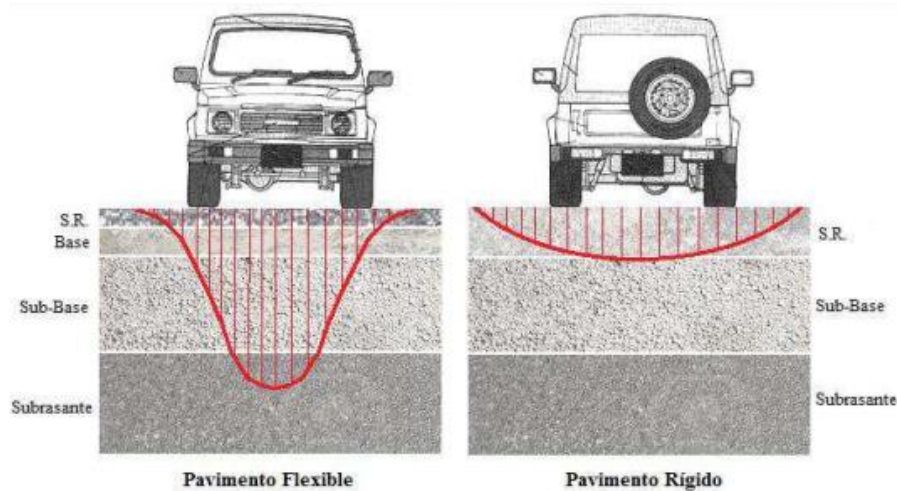


Figura 1. Distribución de cargas en un pavimento flexible y un pavimento rígido

Fuente: (Bardales & Cheng, 2013)

En el ámbito económico un pavimento flexible requiere de una inversión menor comparado con otros tipos de pavimentos pero a su vez genera mayores gastos durante el periodo de vida útil.

2.1.2.1 Estructura del pavimento flexible

El pavimento flexible está conformado por las siguientes capas:

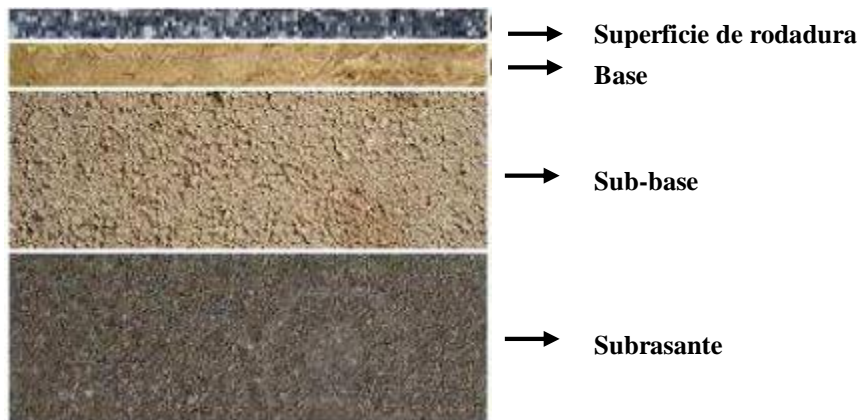


Figura 2. Estructura del pavimento flexible
Fuente: (Bardales & Cheng, 2013)

2.1.2.1.1 Carpeta asfáltica

Capa superior también conocida como superficie de rodamiento. Uniforme y resistente que soporta el tráfico vehicular. Está compuesta por una o varias capas asfálticas elaboradas con material pétreo seleccionado y producto asfáltico dependiendo del tipo de servicio que va a brindar (Forero, 2012).

Funciones:

- Reducir las tensiones verticales que la carga ejerce con el fin de controlar los fenómenos de fatiga y deformaciones.
- Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes no sufran pérdida de resistencia al corte por la saturación de los materiales que la conforman.
- Brindar comodidad y seguridad a los usuarios (serviciabilidad) independientemente de las condiciones climáticas.

2.1.2.1.2 Base

Capa intermedia de un pavimento comúnmente conformada con material granular (piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo). Existen otros tipos de bases constituidas por cemento portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada (Rodríguez, 2009, pág. 7) .

Funciones:

- Transmitir de forma uniforme y con intensidades adecuadas los esfuerzos producidos por las cargas hacia la sub base y subrasante.
- Eliminar el agua que se infiltra a través de la carpeta mediante drenajes laterales longitudinales e impedir la ascensión capilar del agua que provenga de niveles inferiores (Rodríguez, 2009).
- Contar con la suficiente rigidez para no deformarse por la repetición constante del tránsito (Jimenez, 2009).

2.1.2.1.3 Sub base

Capa inferior del pavimento ubicada bajo la base y sobre la subrasante, puede ser o no construida dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante (Jimenez, 2009). Constituida por un material con mayor capacidad de soporte (CBR) que el suelo compactado, y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

Funciones:

- Proporcionar una cimentación uniforme para una correcta compactación y colocación de la base.
- Poseer una capacidad drenante (carece de materiales finos)
- Controlar la ascensión capilar del agua.
- Generar una transición entre la subrasante y la estructura del pavimento.

- Absorber deformaciones perjudiciales en la subrasante por cambios volumétricos asociados a variaciones de la humedad impidiendo que se reflejen en la superficie del pavimento (Juárez & Rico, 2004, pág. 532).
- Transmitir los esfuerzos a la capa Subrasante en forma adecuada.

2.1.2.1.4 Subrasante

Es el suelo de cimentación del pavimento, formado por corte o relleno dependiendo de las características del suelo, compactado a una determinada profundidad con secciones y pendientes según la especificación del proyecto (Forero, 2012).

El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad (Coronado, 2002).

No debe contener vegetación y materia orgánica, de lo contrario, el material deberá reemplazarse por material adecuado para subrasante en el tramo correspondiente o considerar la estabilización de los suelos subyacentes (Coronado, 2002).

Funciones:

- Actuar como soporte de la estructura del pavimento (cimentación del pavimento).
- Soportar las cargas transmitidas por la sub base.

2.1.2.2 Patologías en pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles, a lo largo de su vida útil, se ven expuestos a solicitaciones generadas por factores como el cambio climático imprevisto (lluvias extraordinarias o calores extremos) y valores de tráfico superiores al tráfico de diseño. Estos factores generan fallas en el pavimento, mismas que disminuyen su capacidad estructural, la seguridad y comodidad del usuario.

Las fallas en el pavimento flexible son clasificadas en funcionales y estructurales. Para el primer caso, estas comprenden los defectos en la superficie de rodamiento por causa de fallas en la capa

asfáltica, y no guardan relación con problemas en la estructura del pavimento. La reparación de estas fallas se efectúa mediante la corrección de la rugosidad y regularidad de la carpeta de rodadura.

Por otra parte, la falla estructural comprende los defectos en la superficie de rodadura cuyo origen es una falla de una o más capas constitutivas del pavimento, las mismas que deben resistir las solicitaciones del tránsito y factores climáticos. La reparación va dirigida al refuerzo de la estructura existente mediante la colocación de una capa cuyo espesor debe ser calculado en función de los requerimientos de las cargas de tráfico de diseño para el período de tiempo previsto para la rehabilitación (Corros, Urbáez, & Corredor , 2008).

El pavimento es una estructura con cierta capacidad para absorber como energía elástica potencial el trabajo de deformación impuesto por cada carga circulante durante su vida útil; retirada la carga, dicha energía es la determinante de la recuperación elástica de las deformaciones producidas, la que será tanto más completa cuanto menor relajación de la energía elástica se ha producido durante el tiempo que ha actuado la carga (Montejo Fonseca, 2002). La falla de la estructura se deriva de dos causas fundamentales:

- Si la capacidad de absorber deformaciones es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada, se desarrollan deformaciones permanentes en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito y aún pueden provocar el colapso de la estructura (Montejo Fonseca, 2002).
- Si la capacidad de absorber deformaciones no es excedida pero las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento (Montejo Fonseca, 2002).

En la Tabla 1 se presentan los daños típicos que ocurren en pavimentos flexibles durante el proceso gradual de deterioro de los mismos.

Tabla 1
Tipos de fallas en pavimentos flexibles

TIPO	DEFINICIÓN	CLASIFICACIÓN
Deformaciones permanentes	Son distorsiones del perfil transversal y/o longitudinal del pavimento	Ahuellamiento
		Hundimiento
		Corrugación
		Corrimiento
		Hinchamiento
Fisuraciones o Agrietamientos	Son Fracturas o discontinuidades visibles en la superficie	Longitudinal
		Transversal
		En bloques
		Piel de cocodrilo
		Reflejadas
Desintegraciones	Es la Descomposición de la superficie de rodamiento del pavimento	En arco
		Desprendimiento o descubrimiento de agregados
		Peladuras
		Estrías longitudinales
		Baches
Otros modos de falla	Son daños originados por exudaciones o bien por efecto de la acumulación de trabajos de mantenimiento	Rotura de bordes
		Pulimiento de la superficie
		Exudación de asfalto
		Bombeo/exudación de agua
		Bacheo/repificaciones

Fuente: (MOPC, 2016)
Elaborado por: autor

2.1.2.3 Evolución de los daños en una estructura de pavimento flexible

El texto Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos (Higuera, 2015) presenta el proceso evolutivo de las fallas en pavimentos flexibles, el mismo que es descrito en la Figura 3:

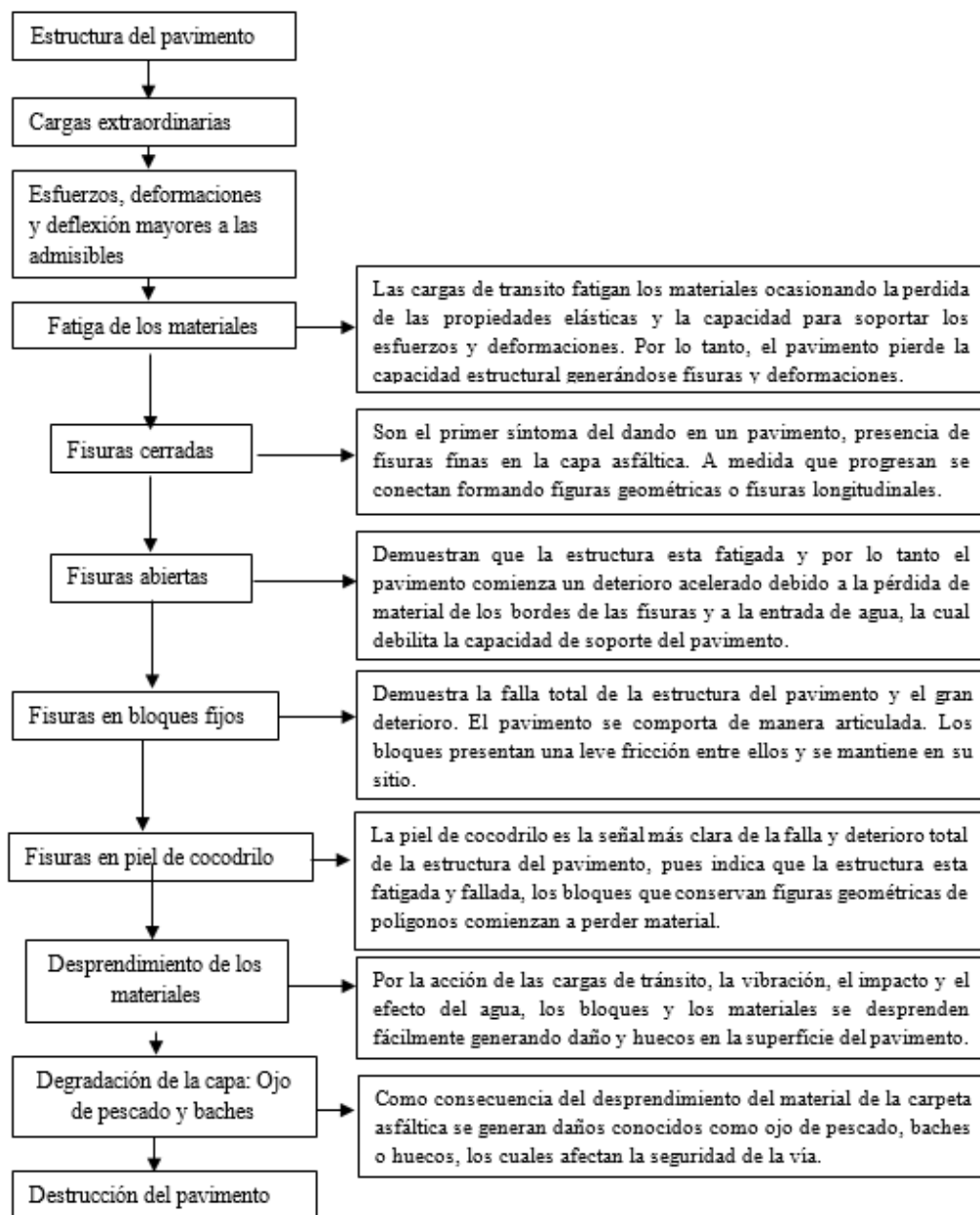


Figura 3. Evolución de los daños en la estructura del pavimento flexible
Fuente: (Higuera, 2015)

2.1.2.4 Mecanismos de daño del pavimento

Las metodologías mecanicistas y empíricas para diseño de pavimentos flexibles buscan controlar la fatiga y el exceso de deformación permanente en la dirección vertical (ahuellamiento), mecanismos principales de degradación del pavimento en servicio.

2.1.2.4.1 Ahuellamiento

El ahuellamiento (deformación permanente) es un tipo de falla del pavimento flexible provocada por tres factores como son la mezcla, carga (tráfico pesado y/o lento) y ambiente (temperatura, humedad y precipitación). Se lo puede identificar por medio de la depresión canalizada que se produce en la huella de circulación del tránsito y la longitud afectada es mayor de 6m (Thenoux & Carrillo, 2001).

2.1.2.4.1.1 Nivel de severidad

La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, midiendo ésta con una regla de 1.20 m de longitud, colocada transversalmente al eje de la calzada; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los valores determinados a intervalos de 6m, a lo largo de la misma (MOPC, 2016).

Se identifican tres niveles de severidad (bajo, medio y alto) según la siguiente guía:

- **B:** La profundidad promedio es de 6mm a 13mm.
- **M:** La profundidad promedio es de 13 mm a 25mm.
- **A:** La profundidad promedio es mayor de 25mm.

2.1.2.4.1.2 Medición

Se mide en metros cuadrados multiplicando su longitud por el ancho afectado por la huella. Se registran separadamente, según su severidad, las áreas totales medidas en la muestra o sección (MOPC, 2016).

2.1.2.4.1.3 Tipos de ahuellamiento

El ahuellamiento se puede presentar por deformaciones de la mezcla asfáltica o por deformaciones de capas subyacentes.

El ahuellamiento por deformaciones de la carpeta asfáltica es independiente al diseño estructural del pavimento y se presenta en los primeros 7 a 10 cm de mezcla asfáltica más cercanos a la superficie. Ocasionada por la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. Estas deformaciones corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula (Thenoux & Carrillo, 2001). Para identificar el ahuellamiento por deformación de la capa bituminosa se observa un descenso de la mezcla en coincidencia con la huella y un ascenso de la misma en los laterales de la huella de circulación (Morea, 2011). Se representa en la Figura 4.

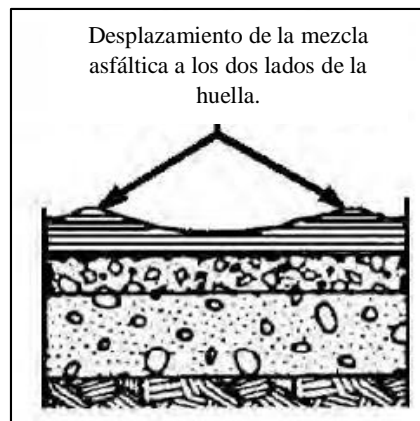


Figura 4. Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica
Fuente: (Morea, 2011)

El Ahuellamiento por deformación de capas subyacentes se genera por causas de tipo constructivo (mala compactación de las bases granulares) o por el diseño estructural (tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante). Para identificar el ahuellamiento por deformación de la subrasante se observará un descenso del nivel de la mezcla asfáltica coincidente con la huella de circulación (Morea, 2011), como se puede observar en la Figura 5.



Figura 5. Deformación debida al fallo de la Subrasante
Fuente: (Morea, 2011)

2.1.2.4.2 Agrietamientos por fatiga

El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio. Es un proceso de degeneración o falla de los pavimentos flexibles asociada principalmente a la repetición de cargas dinámicas que generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la carpeta asfáltica, ocasionando pérdida de rigidez y aparición de deformaciones plásticas a tracción, que a su vez conducen a la formación de micro fisuras (Rondón & Reyes, 2015).

Cuando el fenómeno de fatiga se da por cargas que generan flexión de la carpeta asfáltica, las macro fisuras se originan en el extremo inferior de esta (zona donde el esfuerzo a tensión es mayor), propagándose de manera ascendente hacia la superficie, donde se reflejan como fisuras en sentido longitudinal. Otra forma de ocurrencia del agrietamiento por cargas ocurre cuándo se generan esfuerzos y deformaciones de tensión muy altos en las zonas adyacentes a las llantas de los vehículos, estas deformaciones de tensión generan grietas que se propagan de arriba hacia abajo en la capa asfáltica (Rondón & Reyes, 2015).

Por otro parte, en el caso de la fatiga térmica, son los gradientes de temperatura los que generan cambios en los esfuerzos internos y si dichos esfuerzos son mayores a la resistencia de la mezcla se genera agrietamiento, el mismo que se observa por lo general en sentido transversal y se propaga desde la rasante hacia la fibra inferior de la capa asfáltica (Rondón & Reyes, 2015).

Existen dos fases de daño cuando se genera el fenómeno de agrietamiento por fatiga.

- **Primera fase.-** fase de iniciación. Aparece una red de microfisuras, extendiéndose de manera uniforme en la mezcla asfáltica, generando una disminución en la rigidez.
- **Segunda fase.-** fase de propagación. Se generan fisuras de mayor tamaño (macrofisuras) por la unión de las microfisuras que se propagan en la mezcla asfáltica.

La aparición y la velocidad de avance de cada fase de daño dependen principalmente de la rigidez de la carpeta asfáltica. En una mezcla asfáltica muy rígida la primera fase de daño es tardía, pero el avance de la segunda fase ocurre con mayor rapidez. En cambio, en una mezcla de baja rigidez la primera fase de daño por fatiga inicia rápidamente, la aparición y el avance de la segunda fase ocurren de manera más lenta (Rondón & Reyes, 2015).

2.2 Mezcla asfáltica en caliente (Método Marshall)

La mezcla asfáltica es la combinación de árido con distinta graduación y material ligante (asfalto) en proporciones exactas, que determinan las propiedades físicas de la mezcla terminada. La mezcla debe ser resistente a las condiciones climáticas y a las solicitaciones producidas por el tránsito vehicular.

2.2.1 Caracterización de los agregados

2.2.1.1 Análisis granulométrico para el agregado grueso y fino

El análisis granulométrico de los agregados grueso y fino se rige a la norma NTE INEN 696. El propósito de este ensayo es conocer la distribución del tamaño de partículas de los agregados mediante tamizado, verificando el cumplimiento de las especificaciones para mezclas de hormigón asfáltico. La norma presenta la cantidad mínima de material a utilizarse en el ensayo según el tamaño del agregado.

- **Árido fino:** El tamaño de la muestra de material seco debe ser mínimo 300 gr.
- **Árido grueso:** El tamaño de la muestra depende del tamaño máximo nominal del agregado según lo descrito en la Tabla 2.

Tabla 2

Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso

Tamaño nominal máximo, aberturas cuadradas, en mm (pulgadas)	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (Kg)
9.5 (3/8")	1
12.5 (1/2")	2
19 (3/4")	5
25	10
37.5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Fuente: (INEN 696, 2011)

Es importante verificar que el peso del material tamizado no difiera en más del 0.3% del peso inicial del material de no ser así se repite el ensayo.

2.2.1.2 Absorción y gravedad específica del agregado fino

El método de ensayo está regido bajo la norma NTE INEN 856, la cual permite obtener la densidad, densidad relativa y el porcentaje de absorción de una porción significativa de partículas de árido, proporcionando un valor promedio que representa al total de la muestra de árido fino.

La densidad relativa y la densidad relativa aparente hacen referencia al material sólido de partículas sin incluir los vacíos dentro de las mismas. La densidad relativa es una propiedad utilizada tanto en hormigón bituminoso como en hormigón portland para el cálculo del volumen que ocupan los áridos en la mezcla. Por otra parte, la absorción se utiliza para calcular el cambio que sufre el árido fino en su masa debido al agua absorbida por los poros de las partículas. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y las fórmulas de cálculo.

a) Preparación de la muestra

- La muestra debe ser lavada previamente para eliminar toda clase de impurezas.

- Secar en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante y posteriormente cubrir completamente la muestra con agua y dejar reposar por 24 horas ± 4 horas.
- Se retira el agua de la muestra cuidadosamente para no perder material y se extiende en una bandeja, removiendo continuamente para asegurar un secado uniforme hasta alcanzar la condición saturada superficialmente seca.

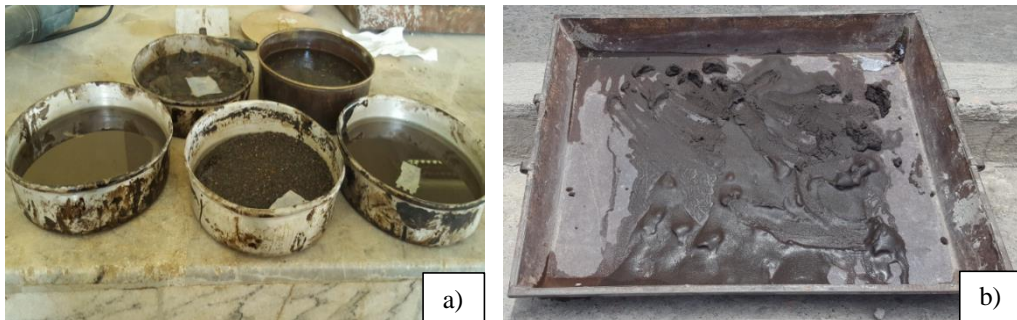


Figura 6. a) Muestra sumergida en agua por 24 horas, b) Secado uniforme de la muestra para obtener condición SSS

b) Procedimiento

- En el picnómetro se vierte una pequeña cantidad de agua e inmediatamente se introduce $500\text{ gr} \pm 10\text{ gr}$ de árido fino saturado con superficie seca, se cubre la muestra con agua destilada.
- Se lleva el picnómetro con la muestra a la bomba de vacío para eliminar las burbujas de aire, agitar el picnómetro ya sea de forma mecánica o manual.
- Cuando ya no exista burbujas de aire visibles se llena de agua destilada el picnómetro hasta la marca, se limpia, seca y se pesa; se toma la temperatura del agua a la cual se realiza el ensayo.
- Se retira el árido fino del picnómetro, se coloca en el horno a 110°C hasta alcanzar una masa constante y pesar.

c) Cálculos

A continuación se presenta las fórmulas descritas en la norma NTE INEN 856 para el cálculo de la gravedad específica (densidad relativa), gravedad específica aparente (densidad relativa aparente) y porcentaje de absorción mediante el método gravimétrico.

- Gravedad específica

$$SH = \frac{C}{(A + D - E)} \times \gamma \quad \text{Ec. 1}$$

- Gravedad específica aparente

$$\text{gravedad específica aparente} = \frac{C}{(C + D - E)} \times \gamma \quad \text{Ec. 2}$$

- Gravedad específica condición SSS

$$\text{gravedad específica (SSS)} = \frac{A}{(A + D - E)} \times \gamma \quad \text{Ec. 3}$$

- Porcentaje de absorción

$$\text{Absorcion, \%} = \frac{(A - C)}{C} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

A = masa de muestra saturada superficialmente seca.

C= masa de la muestra seca al horno, (g).

D = masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración, (g).

E = masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración, (g).

γ = peso específico del agua la temperatura de ensayo.

2.2.1.3 Absorción y gravedad específica del agregado grueso

La norma NTE INEN 857 establece el procedimiento para determinar la gravedad específica, absorción y densidad promedio de una porción grande de agregado con gradación mayor o igual a 4.75 mm (retenido en el tamiz #4), mediante el análisis de una muestra representativa con masa mínima según el tamaño máximo nominal del agregado a ser ensayado.

El presente ensayo determina la densidad, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos entre partículas a diferencia del ensayo aplicado a los áridos con gradación menor a 4.75 mm, en los cuales la masa unitaria o peso volumétrico incluye los vacíos entre partículas. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y las fórmulas de cálculo.

a) Preparación de la muestra

- Se tamiza el agregado, la cantidad necesaria hasta obtener el peso requerido por la norma según el tamaño máximo nominal descrito en la Tabla 3.

Tabla 3

Masa mínima de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal (mm)	Masa mínima de la muestra para ensayo (kg)
12.5 o menor	2
19	3
25	4
37.5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
125	75

Fuente: (INEN 857, 2010)

- Se lava el agregado para eliminar impurezas y se seca en el horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Cuando la muestra este fría se sumerge el material en agua a temperatura ambiente por un tiempo de 24 horas ± 4 horas.



Figura 7. Proceso de lavado del material a ser ensayado

b) Procedimiento

- Se retira el agua de la muestra y se deposita el agregado en un paño absorbente, se seca hasta eliminar la lámina de agua de la superficie, obteniendo la condición de saturado con superficie seca.

Nota: importante evitar la evaporación de agua de los poros del agregado.

- Se pesa el material con condición saturado superficie seca y a continuación se coloca el material en la cesta de alambre y se sumerge en el agua, tomar la medida cuando se estabilice.
- Se saca el material del agua y se deposita en una tara para secar en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante.

c) Cálculos

Se presenta las fórmulas descritas en la norma NTE INEN 857 para el cálculo de la gravedad específica (densidad relativa) del agregado grueso y el porcentaje de absorción.

- Gravedad específica (densidad relativa)

$$\text{gravedad específica} = \frac{C}{(A - B)} \times \gamma$$

Ec. 5

- Gravedad específica aparente

$$\text{gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A - B)} \times \gamma \quad \text{Ec. 6}$$

- Gravedad específica condición SSS

$$\text{gravedad específica (SSS)} = \frac{C}{(C - B)} \times \gamma \quad \text{Ec. 7}$$

- Porcentaje de absorción

$$\text{Absorcion, \%} = \frac{(A - C)}{C} \times 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

C = masa en el aire de la muestra seca al horno, (gr)

A= masa de la muestra con condición saturada con superficie seca, (gr)

B = masa aparente en agua de la muestra saturada, (gr)

γ = peso específico del agua la temperatura de ensayo.

2.2.1.4 Resistencia a la abrasión del árido grueso

El ensayo de resistencia a la abrasión basado en la norma INEN NTE 860 busca determinar el grado de resistencia o dureza que presenta el agregado frente a condiciones de roce continuo de las partículas con las esferas de acero. Factor importante para determinar si el material es apto para soportar la compactación durante la implementación de la obra de pavimentación y el comportamiento a lo largo de la vida útil de la misma.

El ensayo se aplica a agregados gruesos con gradaciones menores a 1 ½ pulgadas (37.5 mm), utilizando un número determinado de esferas de acero que dependen de la gradación de la muestra (ver Tabla 5). A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y las fórmulas de cálculo.

Tabla 4*Gradación de la muestra de ensayo*

Tamaño de la abertura de tamiz (mm)		Masa por tamaños indicada (gr) Gradación			
aberturas cuadradas		A	B	C	D
pasante de	retenido en				
37.5	25	1250 ± 25			
25	19	1250 ± 25			
19	12.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
12.5	9.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5	6.3			2500 ± 10	
6.3	4.75			2500 ± 10	
4.75	2.36				5000 ± 10
		5000 ± 10	1250 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: (INEN 860, 2011)

Tabla 5*Especificaciones para la carga*

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: (INEN 860, 2011)

a) Preparación de la muestra

- La cantidad de muestra necesaria para el ensayo determinada según el tamaño de agregado se presenta en Tabla 4.
- Se lava y se seca al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ hasta obtener una masa constante. Posteriormente pesar la combinación de gradaciones.

b) Procedimiento

- Se coloca la muestra dentro de la máquina de los ángeles junto con la carga (bolas de acero), se asegura y se gira la máquina 500 revoluciones a una velocidad entre 30 r/min y 33 r/min.
- Posteriormente se descarga el material y se tamiza la porción fina por medio del tamiz #12 (1.70mm), se lava el material retenido.

- Se seca al horno el material retenido a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ hasta obtener un peso constante.
- Pesarse el material y reportarse con aproximación de 1 gr.

c) Cálculos

Se presenta la fórmula para el cálculo del porcentaje de desgaste del agregado grueso, descrita en la norma NTE INEN 860.

$$D = \frac{B - C}{B} \times 100 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

D = Valor de la degradación, (%).

B = masa inicial de la muestra de ensayo, (gr).

C = masa de la muestra retenida en el tamiz #12, (gr).

2.2.1.5 Ensayo de peladura

El ensayo de peladura se realiza mediante el método establecido en la norma ASTM D 3625, el mismo que permite conocer en la mezcla suelta el porcentaje de pérdida de adherencia del agregado cubierto con asfalto sometido a la acción del agua hirviendo. La pérdida de adherencia por acción del agua es determinada únicamente de forma visual. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra y el procedimiento del ensayo.

a) Preparación de la muestra

- Se prepara la mezcla de agregado y asfalto, la misma que debe cumplir con el procedimiento descrito en la norma ASTM D 6926.

Nota: controlar que la mezcla asfáltica mantenga una temperatura no menor a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ni superior al punto de ebullición del agua antes de ser ensayada.

b) Procedimiento

- En un recipiente resistente al calor se coloca agua y se lleva a la cocina hasta que alcance el punto de ebullición. Posteriormente se coloca 250gr de mezcla asfáltica en el recipiente con agua y se espera hasta que vuelva a hervir, a partir de ahí se espera un tiempo de 10 min±15 segundos.

Nota: evitar la manipulación excesiva del material.

- Pasado los diez minutos se retira la muestra de la cocina y se procede a retirar la película que se forma en la superficie del agua para evitar que se vuelva a pegar en el agregado. Se deja enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se coloca la mezcla en un papel.
- Se compara la mezcla inicial con la mezcla posterior al ensayo y se determina visualmente el porcentaje de desprendimiento del asfalto del agregado (superior a 95% o inferior a 95%).

2.2.1.6 Equivalente de arena

La norma ASTM D 2419 presenta el método para realizar el ensayo de equivalente de arena, cuyo objetivo es determinar la proporción relativa de material arcilloso y finos presentes en el agregado fino, material componente de la mezcla asfáltica. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra y el procedimiento del ensayo.

a) Preparación de la muestra

- Se obtiene 1500 gr de material que pase el tamiz #4 (4.75 mm), posteriormente se desmenuza los terrones formados en el agregado fino y se remueve la cubierta de finos que se adhiere al agregado grueso, añadiéndolo a la muestra.
- Posteriormente, se humedece el material con la finalidad de no perder finos durante el proceso de cuarteo.

Nota: tomar en cuenta que el material debe mantener la condición de flujo libre.

- La cantidad de muestra de arena necesaria para el ensayo se mide mediante el recipiente de medición (aprox. 50gr).

b) Procedimiento

- Se prepara la solución floculante, para esto se vierte cloruro de calcio (cantidad igual a un recipiente de medición) en un galón de agua destilada ver Figura 8.



Figura 8. Preparación de la solución floculante

- Con ayuda del embudo se coloca la solución floculante en la probeta graduada hasta una altura de 101.5 ± 2.54 mm. Posteriormente, se vierte la muestra de arena en la probeta con la solución floculante y se golpea el fondo de la probeta con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y que la muestra se remoje completamente. Dejar en reposo por 10 ± 1 minuto.
- Al culminar el periodo de humedecimiento, se tapa la probeta con el tapón y se agita una vez para que el material del fondo se suelte. Inmediatamente se coloca la probeta en posición horizontal y se agita vigorosamente con un movimiento lineal horizontal de extremo a extremo por 90 ciclos de aproximadamente 30 segundos, usando un movimiento de 229 ± 25 mm.
- Posteriormente se coloca la probeta verticalmente en la mesa de trabajo y se remueve el tapón.

c) Proceso de irrigación

- Con la probeta en posición vertical se coloca el tubo irrigador en la parte superior de la probeta, y utilizando el dispositivo sifonado, se afloja la pinza de la manguera, lavando el material de las paredes de la probeta hasta llegar al fondo de la misma atravesando el material. Esto impulsa hacia arriba el material fino que se encuentra en el fondo de la probeta y le pone en suspensión sobre las partículas gruesas.
- Se continúa lavando los finos hasta que la probeta se llene a una altura de 382 mm, se retira el tubo irrigador.
- Se deja la probeta con el contenido en reposo por 20 minutos \pm 15 segundos (periodo de sedimentación).
- Al terminar el periodo de sedimentación, se lee y anota el nivel de la parte superior de la suspensión arcillosa, denominado “lectura de arcilla”.

Nota: se forma una línea clara de demarcación; el tiempo total de sedimentación no debe exceder los 30 minutos.

- Para tomar la lectura de la arena se introduce dentro de la probeta el conjunto del disco, varilla y el sobrepeso, bajando el mismo suavemente hasta que llegue sobre la arena. Cuando el conjunto toque la arena se toma la medida.



Figura 9. a) Lectura de arcilla b) lectura de arena

d) Cálculos

Para el cálculo del equivalente de arena se utiliza la fórmula descrita a continuación.

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} \times 100 \quad \text{Ec. 10}$$

Nota: si el equivalente de arena no es un número entero, el resultado se expresa redondeando la fracción al número inmediato superior.

2.2.2 Caracterización del asfalto

2.2.2.1 Ensayo de penetración

El ensayo de penetración está basado en la norma INEN NTE 917, la cual, permite conocer el grado de dureza del material bituminoso mediante la medición en décimas de milímetro de la distancia que una aguja normada penetra verticalmente una muestra bajo condiciones determinadas de tiempo, carga y temperatura. Cuando no se especifica otras condiciones el ensayo se realiza a 25 °C con 100 gr de peso en un tiempo de 5 segundos.

El Instituto del Asfalto ha clasificado al cemento asfáltico para pavimentación en cuatro categorías según el grado de penetración: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300 siendo el de menor penetración el de mayor dureza. Adicionalmente se tiene especificaciones para un cemento asfáltico con penetraciones comprendidas entre 40-50 utilizado para aplicaciones industriales. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y la forma de cálculo.

a) Preparación de la muestra

- Se calienta el asfalto hasta que fluya, controlando que la temperatura no sobrepase los 90°C por encima del punto de reblandecimiento para evitar sobrecalentamiento.
- Se llena dos recipientes con muestra (asfalto), evitando la inclusión de burbujas de aire durante el vertido y se deja enfriar a temperatura ambiente por 60 a 90 minutos.

Nota: tener precaución de proteger las muestras del polvo.

- Posteriormente se colocan las muestras y el plato de transferencia en el baño de agua a 25°C durante 60 a 90 minutos.

b) Procedimiento

- Primero se verifica que el vástago del penetrómetro esté completamente limpio de material extraño o agua (importante después de cada ensayo limpiar la aguja con un disolvente adecuado).
- Se coloca sobre la aguja una carga de 50 gr para que la carga total incluido los accesorios sea de $100 \text{ gr} \pm 0.1 \text{ gr}$.



Figura 10. Penetrómetro

- Cuando el equipo se encuentre listo y ya ha pasado el tiempo de preparación de la muestra, se saca la misma del baño de agua en el recipiente de transferencia lleno de agua y se coloca en la plataforma del penetrómetro. Se ajusta la aguja hasta que toque la superficie de la muestra sin penetrarla y se encera el indicador de lectura.



Figura 11. Muestra para el ensayo

- Soltar la aguja en un tiempo de 5 segundos, ajustar el instrumento para medir la distancia penetrada en décimas de milímetro (ver Figura 12).

Nota: Realizar mínimo 3 penetraciones en la muestra en puntos distanciados 10 mm de la cara del recipiente y entre ellos. Es importante tomar en cuenta que la diferencia entre los valores no debe ser mayor que 4, para penetraciones entre 50 a 149.

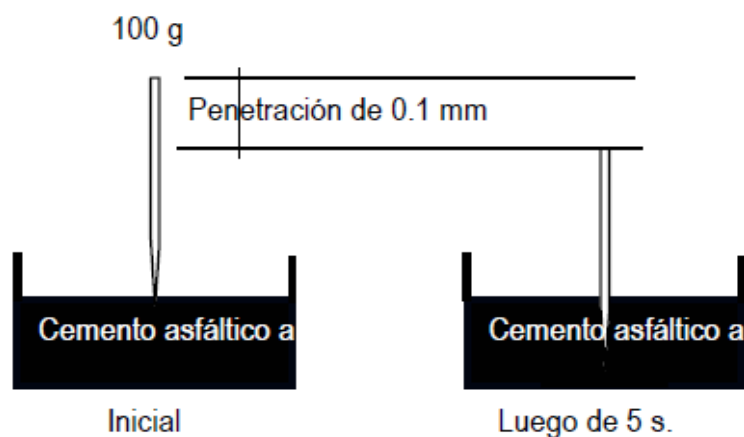


Figura 12. Esquema del ensayo de penetración
Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006)

c) Cálculo

Para el cálculo del valor de penetración del asfalto se obtiene un promedio de las penetraciones realizadas a las muestras.

2.2.2.2 Punto de reblandecimiento

El ensayo de punto de ablandamiento se lo realiza mediante la aplicación del ensayo de anillo y bola basado en la norma NTE INEN 920 en materiales bituminosos que posean el punto de ablandamiento entre temperaturas de 30 y 200 °C. El objetivo es determinar la temperatura a la cual el material bituminoso es lo suficientemente blando para que llegue a un estado de fluidez. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y la forma cálculo.



Figura 13. Equipo para ensayo de reblandecimiento

a) Preparación de la muestra

Nota: Antes de realizar el ensayo se debe ajustar la intensidad de llama del mechero para que el líquido aumente la temperatura 5°C por minuto.

- Se calienta el material bituminoso hasta que adquiera fluidez, controlando que no se produzca sobrecalentamientos locales.
- Se vierte el asfalto en los anillos de latón previamente engrasados y calentados aproximadamente hasta una temperatura igual a la del punto de fluidez, se deja enfriar por 30 minutos, cuando la muestra este fría se engrasa con una espátula caliente.

b) Procedimiento

- Se ensambla el equipo, colocando el termómetro, los anillos con la muestra y la guía para centrar las bolas en posición y posteriormente se llena el matraz de vidrio con agua a temperatura de 5°C, se mantiene esta temperatura durante un tiempo de 15 minutos.
- Se coloca las esferas ajustadas a la misma temperatura, a continuación se calienta el equipo, elevando la temperatura de forma constante (5°C por minuto).
- Anotar la temperatura para cada esfera en el momento en que la esfera con muestra toca la placa inferior, se debe tomar en cuenta que la diferencia entre los dos valores no debe exceder el 1°C.

c) Cálculo

Para el cálculo del punto de reblandecimiento se realiza un promedio entre los valores de temperatura tomados de la esfera 1 y esfera 2.

2.2.2.3 Índice de penetración

El cálculo del índice de penetración de un material bituminoso está basado en la norma INV E 724, el mismo que permite conocer el grado de susceptibilidad térmica, es decir, que tan propenso es el material a cambiar las propiedades reológicas por el aumento o disminución de la temperatura.

La norma INV E 724, (2007) presenta la clasificación del asfalto según el índice de penetración en tres categorías que son:

- **IP > +1:** Material bituminoso con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad.
- **IP < -1:** Materiales bituminosos que poseen un comportamiento algo viscoso y una mayor susceptibilidad a la temperatura.
- **IP entre +1 y -1:** Materiales que poseen características intermedias a los anteriormente descritos, perteneciendo a esta clasificación la mayoría de los materiales bituminosos utilizados para la construcción de carreteras.

Para el cálculo del índice de penetración se aplica las fórmulas Ec. 11 y Ec. 12, siendo necesario los valores de la penetración en condiciones normales 25°C, 100 gr y 5 segundos y el punto de ablandamiento del material bituminoso.

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log P}{t_{RaB} - 25} \right] \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

t_{RaB} = punto de ablandamiento en grados Celsius

P = penetración en 0.1 mm a 25° C

$$IP = \frac{20 - 10 \times A}{A + 1} \quad \text{Ec. 12}$$

2.2.2.4 Gravedad específica del asfalto

La gravedad específica es la relación que existe entre el peso de un volumen de material bituminoso determinado y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, generalmente 25°C. Todos los líquidos sufren modificaciones en el volumen cuando existen cambios de temperatura (calor - expansión, frío - contracción) de tal manera que, la gravedad específica permite realizar correcciones en el volumen del material bituminoso cuando este se encuentra a una temperatura diferente de 25 °C y permite también la conversión de unidades entre masa y volumen.

En la norma ASTM D70 se describe el método del picnómetro para la determinación de la gravedad específica y densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, procedimiento y la fórmula de cálculo.



Figura 14. Picnómetro para ensayo de gravedad específica del asfalto

a) Preparación de la muestra

- Calentar el asfalto hasta que fluya, controlando que no exista sobrecalentamiento local (no se debe elevar la temperatura a más de 56 °C por encima del punto de ablandamiento).

b) Procedimiento

- Pesarse el picnómetro limpio y seco incluido el tapón. Posteriormente se llena el picnómetro con agua, se coloca el tapón, se limpia, se seca y se toma el peso.
- En el picnómetro limpio y seco previamente calentado se vierte la muestra, llenando tres cuartos de su capacidad.

Nota: al momento de verter el asfalto es importante tener cuidado de no manchar las paredes del picnómetro por encima del nivel final y evitar la inclusión de burbujas de aire.

- Se deja enfriar el picnómetro con la muestra por 40 minutos hasta que alcance una temperatura ambiente, posteriormente se coloca el tapón y se pesa.
- Pasado los 40 minutos se llena el picnómetro que contiene asfalto con agua a la temperatura de ensayo, se coloca el tapón, se limpia, se seca y se pesa.

c) Cálculo

La norma presenta las siguientes fórmulas para el cálculo de la densidad del asfalto.

$$\rho = \text{gravedad específica} \times \gamma_a \quad \text{Ec. 13}$$

$$\rho = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} \times \gamma_a \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

a: peso del picnómetro seco con tapón más agua

b: peso picnómetro con tapón más agua destilada

c: peso picnómetro con tapón más asfalto

d: peso picnómetro con tapón más agua destilada y asfalto

γ_a : densidad del agua a temperatura de ensayo

2.2.2.5 Ductilidad

La ductilidad es la capacidad de un material para admitir grandes deformaciones mecánicas y en el asfalto es una característica importante debido a que los asfaltos con mejor ductilidad poseen mejores propiedades aglomerantes, pero si la ductilidad es elevada son susceptibles a los cambios de temperatura.

El ensayo de ductilidad se basa en el método descrito en la norma INEN 916. Este método permite medir la distancia que se alarga la muestra a una velocidad de 50 ± 2.5 mm por minuto y temperatura de $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ hasta que se produzca la ruptura. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, y el procedimiento del ensayo.

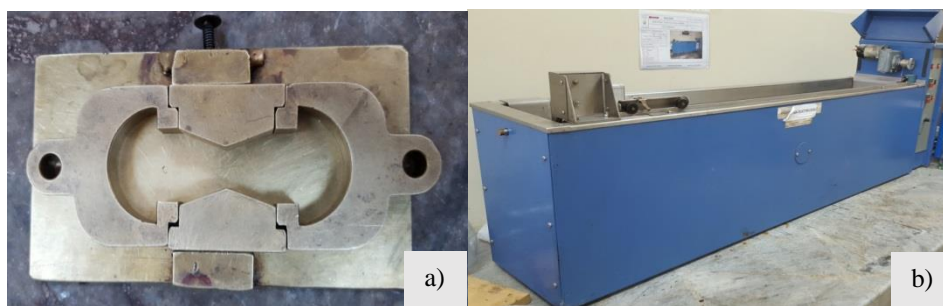


Figura 15. a) Molde y placa para el ensayo, b) Ductilímetro

a) Preparación de la muestra

- Se coloca las piezas del molde en la placa, las mismas que deben estar previamente engrasadas para evitar adherencias de la muestra.
- Se calienta el asfalto hasta que fluya, controlando que no exista sobrecalentamiento local. Posteriormente se vierte el asfalto en forma de chorro fino en los moldes precalentados.
Nota: controlar que no se muevan las piezas del sitio y evitar inclusión de burbujas de aire.
- Se deja enfriar las muestras a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos protegiéndolas del polvo; pasado este tiempo con una espátula caliente se engrasa la probeta.
- Se introduce la placa y el molde con la probeta en el baño de agua durante 85 a 95 minutos, pasado este tiempo se retiran la placa y las piezas laterales.

b) Procedimiento:

- Se colocan los anillos del molde en los ganchos sujetadores fijo y móvil del Ductilímetro y a continuación la máquina los separa hasta cuando se produzca la rotura.
- Se mide la distancia a la que se produjo la rotura obteniendo la ductilidad en centímetros.

2.2.2.6 Punto de inflamación

El ensayo estándar para punto de inflamación y fuego mediante la copa abierta de Cleveland se basa en la norma ASTM D92, el mismo que determina la temperatura más baja a la cual los vapores desprendidos del asfalto presentan un destello de flama bajo condiciones especificadas, denominándose, punto de inflamación. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, equipo y el procedimiento.



Figura 16. Aparato copa abierta de Cleveland

a) Preparación del equipo

- Se coloca el aparato de la copa abierta de Cleveland en una superficie firme y recta y verifica que la copa de Cleveland se encuentre sin residuos de ensayos anteriores.

Nota: Importante que el lugar donde se vaya a realizar el ensayo no presente corrientes de aire y sea un lugar con poca luz de tal manera que sea fácil identificar el punto de inflamación.

b) Preparación de la muestra

- Se calienta el asfalto hasta que llegue a un estado de fluidez, posteriormente se llena la copa de Cleveland con la muestra de asfalto hasta la marca especificada, controlando que no se generen burbujas de aire en la superficie de la muestra.

c) Procedimiento

- Se coloca la copa con la muestra en el soporte y se aplica calor, verificando que la temperatura de la muestra suba a una velocidad de 14 a 17 °C por minuto.
- Cuando la temperatura llegue a 28°C por debajo del punto de inflamación esperado se disminuye la intensidad de la llama para que la velocidad de aumento de la temperatura sea

de 5 °C a 6°C por minuto y se pasa el aplicador de flama por encima de la muestra en intervalos de temperatura de 2°C hasta observar una llama en cualquier punto de la superficie de la muestra.

- Registrar el punto de inflación observado.

Nota: No confundir la verdadera llama con el halo azulado de la llama de ensayo

2.2.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente

2.2.3.1 Estabilización granulométrica

Para la aplicación del método Marshall en el diseño de mezclas asfálticas en caliente es indispensable trabajar con una adecuada granulometría para garantizar costo y calidad. La gradación óptima del material pétreo depende de dos parámetros que son el tamaño máximo nominal y las líneas de control superior e inferior. Las líneas de control son los puntos de paso obligado para la curva granulométrica los mismos que se encuentran descritos en la Tabla 6.

Tabla 6

Límites granulométricos según tamaño máximo nominal del agregado

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4mm)	100			
¾ " (19,0 mm)	90-100	100		
½"(12,5mm)		90-100	100	
3/8 " (9,51 mm)	56-80		90-100	100
No. 4 (4,76 mm)	35-65	44-74	55-85	80-100
No. 8 (2.36 mm)	23-49	28-58	32-67	65-100
No. 16(1,18 mm)				40-80
No. 30(0,6 mm)				25-65
No. 50(0,30mm)	5-19	5-21	7-23	7-40
No. 100(0,15 mm)				3-20
No. 200(0,075 mm)	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: (MTOF 001F, 2002, pág. IV95)

2.2.3.2 Elaboración de briquetas

Para la elaboración de briquetas se sigue el procedimiento presentado en la norma ASTM D 6926. Los especímenes cilíndricos tendrán dimensiones estándar de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5mm (2 ½") de altura, elaboradas con la curva granulométrica estabilizada y cinco porcentajes

de asfalto que van del 5% al 7% con incrementos de 0.5% entre ellos. La finalidad es generar puntos suficientes en las curvas de análisis los que permitan identificar el porcentaje de asfalto óptimo. Para cada porcentaje se elaboran al menos tres especímenes. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra y el procedimiento de elaboración.



Figura 17. Molde de compactación



Figura 18. Pedestal y martillo compactador

a) Preparación

- Se verifica que el agregado se encuentre limpio y posteriormente se coloca en el horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante.

- Cuando el material pétreo se encuentra completamente seco se pesa porciones de aproximadamente 1200 gr cada probeta (15 briquetas en total) y se coloca en el horno hasta que alcance una temperatura de 28°C por encima de la temperatura de mezcla (150°C-165°C).
- Se saca del horno la porción de agregado para una briketa, se realiza un pequeño cráter en el centro, donde posteriormente se coloca el asfalto según el porcentaje necesario.
Nota: verificar que la temperatura del asfalto y el agregado se encuentre dentro de los rangos de la temperatura de compactación (140°C – 150°C).
- Inmediatamente se empieza a mezclar los materiales hasta conseguir una mezcla homogénea, controlando la temperatura de mezclado. Simultáneamente a la elaboración de la mezcla se debe preparar tanto el molde de compactación como el martillo compactador y calentar a una temperatura entre 93° C y 150°C.

b) Procedimiento

- Se ubica el molde en el sujetador del pedestal de compactación y en el interior se coloca papel filtro previamente aceitado.
- A continuación se coloca la muestra y vigorosamente con una espátula caliente se golpea la mezcla (15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el centro) y se coloca otro papel filtro.
- Se procede a compactar la muestra con el martillo compactador dando un número determinado de golpes según lo establecido para el tipo de tráfico para el cual se diseña la mezcla.
- Se retira el collarín y se da la vuelta a la probeta, compactando con el mismo número de golpes.
- Finalizada la compactación se retira la placa base y el collarín; se deja enfriar la muestra completamente para posteriormente ser extraída del molde.
- Se identifica la muestra con el porcentaje de asfalto y el número de muestra.

2.2.3.3 Gravedad específica Bulk (Gmb)

La norma ASTM D2726 / INV E 733 presenta un método para determinar la gravedad específica Bulk y la densidad en mezclas asfálticas compactadas. Para la aplicación de esta norma se emplea especímenes compactados conformados con granulometría densa o que el porcentaje de absorción de agua respecto al volumen sea menor al 2%, determinado mediante la Ec. 19 posteriormente descrita.

La gravedad específica Bulk es la relación entre el peso en el aire de un volumen de material determinado y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura generalmente 25°C. Se utiliza para determinar el porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compactada.

A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y la fórmula de cálculo.

a) Preparación de la muestra

- Se extrae los especímenes de los moldes mediante el uso del extractor de muestras, se debe evitar pandeos, deformaciones o agrietamientos de las muestras al momento de la extracción, por lo cual es importante dejar enfriar completamente antes de la extracción.



Figura 19. Extractor de muestra

- Se limpian las probetas hasta que estén libres de materiales extraños y no se produzcan desprendimientos de mezcla de las mismas.

b) Procedimiento

- Se pesa la briqueta para determinar la masa en el aire del espécimen seco.
- Posteriormente se sumerge la briqueta en el agua, se toma la temperatura del agua, si es 25°C se espera 4 minutos ± 1 minuto para tomar el peso, pero, si la temperatura varía en más de 2°C, el espécimen se debe sumergir entre 10 y 15 minutos antes de tomar el peso.
- Pasado el tiempo necesario para la toma del peso sumergido se extrae la briqueta del agua y con una franela húmeda se seca la superficie del espécimen y se pesa, obteniendo la masa en el aire del espécimen saturado con superficie seca.

c) Cálculo

Para el cálculo de la gravedad específica Bulk la norma INV E 733 presenta las siguientes formulas:

- Gravedad específica Bulk (ensayo realizado a 25°C)

$$\text{gravedad específica bulk} = \frac{A}{(B - C)} \quad \text{Ec. 15}$$

- Gravedad específica Bulk a 25°C calculada a partir de la gravedad específica Bulk del espécimen medido a cualquier otra temperatura:

Si la temperatura del agua difiere de 25°C en menos de 3°C se aplica la fórmula Ec. 16. Para una diferencia de temperatura mayor a 3°C, se deberá hacer corrección de la masa del agua desalojada de acuerdo a la ecuación Ec. 17.

$$\text{gravedad específica bulk} = \frac{A}{(B - C)} \times K \quad \text{Ec. 16}$$

$$\text{corrección} = \Delta T \times K_s \times (B - C) \quad \text{Ec. 17}$$

$$\text{gravedad específica bulk} = \frac{A}{(B - C) + \Delta T \times K_s \times (B - C)} \times K \quad \text{Ec. 18}$$

- Porcentaje de agua absorbida

$$\% \text{ de agua absorbida por volumen} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

A: Masa del espécimen seco en el aire, (gr)

B-C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C

B: Masa en el aire del espécimen saturado con superficie seca, (gr)

C: Masa del espécimen en el agua, (gr)

K: Coeficiente para corrección por temperatura (ver Tabla 7)

ΔT : 25°C menos la temperatura del baño de agua

K_s : 6×10^{-5} ml/ml/°C coeficiente promedio de expansión térmica cúbica del concreto asfáltico.

Tabla 7

Densidad absoluta del agua y factores de conversión K para diferentes temperaturas

Temperatura, (°C)	Densidad absoluta del agua	Factor de Corrección K
10	0.999728	1.002661
11	0.999634	1.002567
12	0.999526	1.002458
13	0.999406	1.002338
14	0.999273	1.002204
15	0.999129	1.002060
16	0.998972	1.001903
17	0.998804	1.001734
18	0.998625	1.001555
19	0.998435	1.001364
20	0.998234	1.001162
21	0.998022	1.000950
22	0.997801	1.000728
23	0.997569	1.000495
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1.000000
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

Fuente: (INV E 733, 2007, pág. 7)

2.2.3.4 Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall

El objetivo de la norma ASTM D 6927 es determinar la estabilidad y el flujo Marshall. La estabilidad Marshall es la carga máxima en libras requerida para que se produzca la falla del espécimen después de aplicar una carga de prueba a una deformación constante de 5cm/min. Por otra parte el flujo es la deformación que experimenta el espécimen desde el inicio de aplicación de la carga de prueba hasta cuando el espécimen falla. El ensayo Marshall se aplica a especímenes cilíndricos constituidos con asfalto y granulometría menor o igual a 1”.

A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra y el procedimiento del ensayo.

a) Preparación de la muestra

- Se introduce las briquetas en el baño de agua a $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de tiempo de 30 a 40 minutos.
- **Nota:** El intervalo de ingreso de las briquetas al agua será de 1 minuto.



Figura 20. Briquetas en el baño de agua a $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$

- Se limpian tanto las guías como la superficie interior de las mordazas y se calienta en el horno hasta que alcance una temperatura entre 21.1°C y 37.8°C . Aceitar las varillas guías para que la mordaza superior se deslice fácilmente.

b) Procedimiento

- Transcurrido el tiempo de saturación de la briqueta, se retira del baño de agua, se seca y se coloca centrada en la mordaza inferior e inmediatamente se monta la mordaza superior. Se coloca el conjunto de las mordazas y la briqueta en la prensa.
- Colocar el deformímetro en la varilla guía como se muestra en la Figura 21 y encerar tanto el deformímetro como el marcador de estabilidad.



Figura 21. Colocación del deformímetro en la varilla guía

- Se aplica la carga hasta que ocurra la falla en la briqueta, inmediatamente se retira el deformímetro, se registra la medida expresada en mm y de igual manera el valor de estabilidad (resistencia máxima) expresada en libras.

Nota: El ensayo completo (desde que la briqueta sale del agua hasta cuando se produce la falla) se debe realizar en un tiempo no mayor a 30 segundos.

c) Resultado

Se registra el valor del flujo Marshall en mm y la estabilidad (resistencia máxima) en libras a la misma que, se deberá hacer una corrección del valor registrado mediante la multiplicación del mismo por el factor dado en la tabla 1 de la norma ASTM D6927 si la altura de la probeta es diferente a 63.5mm.

2.2.3.5 Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

La norma ASTM D 2041 presenta el método para determinar la gravedad específica máxima en mezclas asfálticas en caliente no compactadas. La gravedad específica máxima permite el cálculo de los vacíos de aire de una mezcla compactada. A continuación se presenta de manera resumida la preparación de la muestra, el procedimiento y la fórmula de cálculo.



Figura 22. Recipiente y bomba de vacío para ensayo gravedad específica máxima

a) Preparación de muestra

- Después de realizar el ensayo de estabilidad y flujo, se coloca la briqueta ensayada en el horno a una temperatura constante de $135^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por un tiempo mínimo de 2 horas con la finalidad de que guarde relación con el procedimiento de diseño de la mezcla inicial.
- Disgregar la muestra, cuidando de que no se fracturen las partículas que conforman la mezcla.

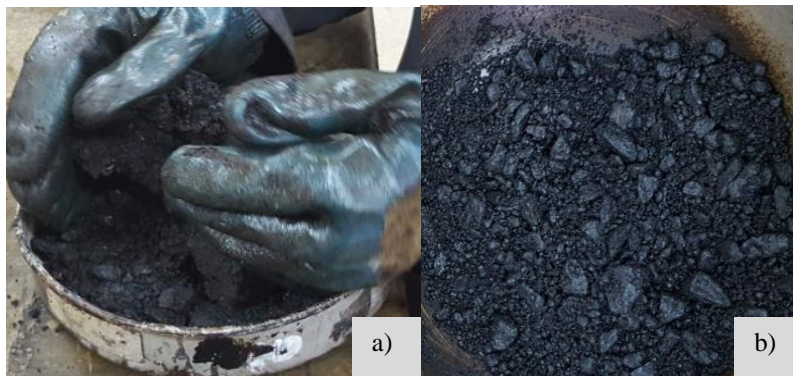


Figura 23. a) Disgregando las partículas de la mezcla, b) mezcla completamente disgregada

b) Procedimiento

- En el recipiente limpio y seco previamente encerado se coloca la muestra fría a temperatura ambiente y se pesa.

- Inmediatamente se coloca agua hasta cubrir completamente toda la muestra y con la bomba de vacío se procede a extraer las burbujas de aire atrapadas en la muestra durante un tiempo de 15 minutos \pm 2 minutos; durante el proceso de extracción de vacíos se debe agitar vigorosamente el recipiente en intervalos de 2 minutos.
- Transcurrido el tiempo de extracción de aire se suelta el vacío y se procede a llenar el recipiente con agua, se enrasa y se pesa.
- Tomar la temperatura del agua a la cual se realiza el ensayo.

c) Cálculo

La norma ASTM D 2041 presenta la siguiente fórmula para el cálculo de la gravedad específica máxima de las mezclas no compactadas.

- Pesando en el aire

$$\text{gravedad específica máxima teórica, } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{A}{(A + D - E)} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

A = masa en el aire de la muestra seca en el horno, g.

D = masa del recipiente lleno con agua a 25° C (77° F), g, y

E = masa del recipiente lleno con agua y muestra a 25° C (77° F), g.

2.2.4 Gravedad específica del agregado

El agregado mineral al ser un material poroso es capaz de absorber asfalto y agua a un grado variable, el cociente de absorción varía con cada agregado. Debido a estas consideraciones existen tres maneras diferentes de medir la gravedad específica de los agregados las cuales son la gravedad específica neta, efectiva y aparente (Instituto Mexicano del transporte, 2004).

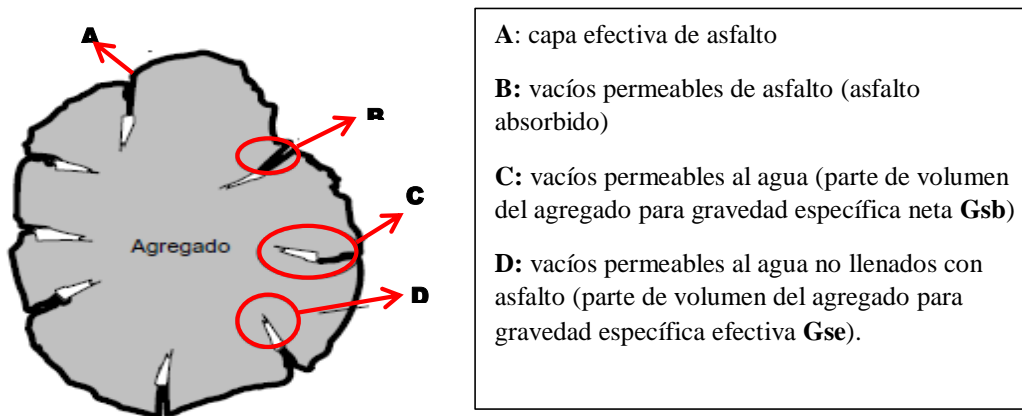


Figura 24. Ilustración de los vacíos permeables e impermeables en el agregado
Fuente: (Instituto Mexicano del transporte, 2004)

2.2.4.1 Gravedad específica neta de los agregados (G_{sb})

Es la relación entre el peso seco en el aire de una unidad de volumen de agregado en el cual se incluyen los vacíos tanto permeables como impermeables, y la masa de igual volumen de agua, los dos medidos a la misma temperatura (ver Figura 24). Cada gradación de material pétreo tiene una gravedad específica diferente, por lo cual, se calcula la gravedad específica neta del agregado total mediante la siguiente ecuación.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{g_1} + \frac{P_2}{g_2} + \dots + \frac{P_n}{g_n}} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

G_{sb} : gravedad específica neta del agregado total

P_1, P_2, \dots, P_n : porcentajes individuales por masa de agregado

g_1, g_2, \dots, g_n : gravedad específica neta individual del agregado

2.2.4.2 Gravedad específica aparente de los agregados (G_{sa})

Relación entre la masa al aire de una unidad de volumen de un material impermeable y la masa de agua de igual volumen, medidos a la misma temperatura (ver Figura 24). La gravedad específica aparente del agregado total se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

G_{sa} : gravedad específica aparente del agregado total

P_1, P_2, \dots, P_n : porcentajes individuales por masa de agregado

G_1, G_2, \dots, G_n : gravedad específica aparente individual del agregado

2.2.4.3 Gravedad específica efectiva de los agregados (G_{se})

Es la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado incluido los vacíos permeables no llenos de asfalto y los impermeables (se excluye los vacíos permeables al asfalto), y la masa de igual volumen de agua, los dos medidos a la misma temperatura (ver Figura 24). La gravedad específica efectiva se calcula para cada porcentaje de agregado mediante la Ec. 23.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado

P_b : Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo (porcentaje respecto al peso total de la mezcla).

G_b : Gravedad específica del asfalto

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica (RICE)

2.2.4.4 Verificación de gravedades específicas

El volumen de asfalto absorbido por lo agregados es casi invariablemente menor que el volumen de agua absorbida, por lo tanto, es importante verificar que el valor de la gravedad específica efectiva (G_{se}) del agregado este entre la gravedad específica neta (G_{sb}) y la gravedad específica aparente (G_{sa}) (Instituto Mexicano del transporte, 2004).

$$G_{sb} < G_{se} < G_{sa} \quad \text{Ec. 24}$$

2.2.5 Análisis volumétrico

La mezcla asfáltica está compuesta por la combinación de proporciones exactas de asfalto y agregados, que determinan tanto las propiedades físicas como el desempeño de la misma como pavimento terminado. Para determinar el desempeño de la mezcla se analiza los parámetros volumétricos, enfocados principalmente a cuatro características de la mezcla y la influencia que tienen en el comportamiento de la misma. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire
- Vacíos del agregado mineral
- Contenido de asfalto.

2.2.5.1 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

El vacío intergranular que existe entre las partículas de agregado mineral en una mezcla compactada (incluyendo vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo) se denomina vacíos del agregado mineral (VAM), expresado como porcentaje del volumen total del espécimen (Cáceres, 2007).

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto (Instituto del asfalto, 1982). En la Figura 25 se presenta la ilustración de los vacíos del agregado mineral (VAM).

Existen valores mínimos recomendados por el MTOP para VAM, los mismos que se encuentran establecidos en el libro MTOP-001F-2002. Los vacíos del agregado mineral se pueden calcular mediante la gravedad específica neta del agregado (G_{sb}) y expresado como volumen de la mezcla asfáltica mediante la siguiente expresión:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

V_a: vacíos de aire en la mezcla compactada (porcentaje del volumen total)

G_{mm}: gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica (RICE)

G_{mb}: gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada

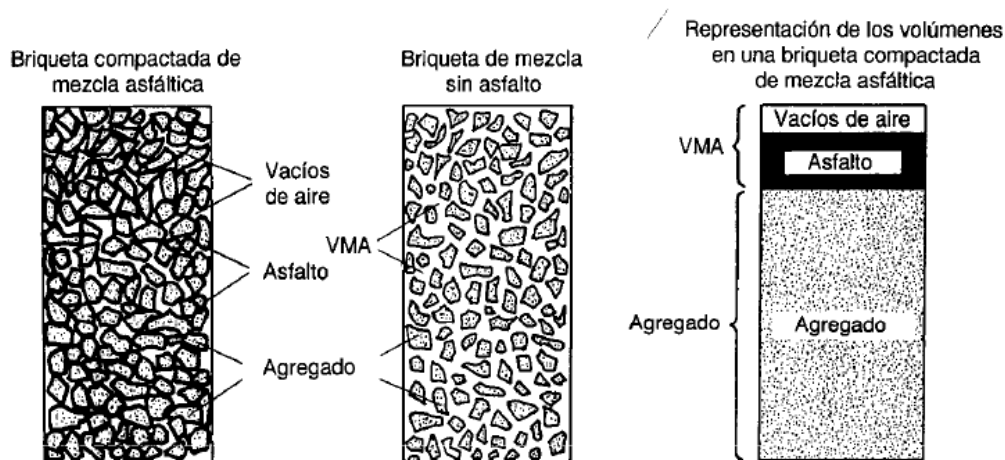


Figura 25. VAM en una probeta de mezcla compactada

Fuente: (Instituto del asfalto, 1982)

2.2.5.2 Vacíos de aire (V_a)

Los vacíos de aire son pequeños espacios de aire que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional (Instituto del asfalto, 1982).

Se calcula a partir de la densidad Bulk de la probeta compactada y de la gravedad específica teórica de la mezcla, sin incluir los vacíos. Se expresa de la siguiente manera.

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada (porcentaje del volumen total)

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica (RICE)

G_{mb} : Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada

La durabilidad del pavimento depende del contenido de vacíos de la mezcla asfáltica. Cuando menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad; cuando el contenido de vacíos es demasiado alto genera pasajes a través de la mezcla, los mismos que permiten la entrada del agua y el aire, causando deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto (Instituto del asfalto, 1982). Por las razones anteriormente descritas el porcentaje permitido de vacíos para capas de rodadura está entre 3% y 5%, como se establece en la MTOP-001F-2002 tabla 405.5.4.

2.2.5.3 Vacíos llenos de asfalto (VFA)

La fracción de vacíos entre agregados minerales que contienen ligante asfáltico se denomina vacíos llenos de asfalto los cuales se expresan como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales (VAM), no se incluye el asfalto absorbido. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} \times 100 \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

VFA: Vacíos llenos de asfalto (porcentaje del VAM)

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada (porcentaje del volumen total)

VAM: Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen total)

2.2.5.4 Contenido de asfalto

Las proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla se establece usando los criterios dictados por el método seleccionado (Instituto del asfalto, 1982, pág. 60).

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. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas con agregados más grandes exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total (Instituto del asfalto, 1982).

La capacidad de absorción del agregado usado 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 puedan cubrir las partículas con una película delgada de asfalto. Se tiene dos tipos de asfalto, el absorbido y el no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto (Instituto del asfalto, 1982).

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir cualidades deseadas en la mezcla. El contenido de asfalto efectivo es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto (Instituto del asfalto, 1982).

2.3 Diseño de la estructura del pavimento flexible

El diseño del pavimento busca determinar una estructura óptima que, tomando en cuenta las características de la subrasante, el volumen de tránsito, clima y propiedades mecánicas de los materiales, brinde un servicio adecuado durante su periodo de vida útil. Se establece un espesor mínimo para cada capa, capaz de soportar las cargas impuestas por el tránsito y a su vez reducir los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior.

Las metodologías para el diseño de pavimentos flexibles son empíricas y analíticas o racionales, las cuales buscan controlar la fatiga y el exceso de deformación permanente. La metodología empírica correlaciona el comportamiento del pavimento in situ con las cargas del tránsito, condiciones ambientales, tipo de suelo y calidad de materiales, factores que causan los mecanismos de degradación. A diferencia de los métodos empíricos, los analíticos tienen en cuenta factores como el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento e influyen en el comportamiento del mismo (Rondon & Reyes, 2007).

2.3.1 Método AASHTO 93

El método AASHTO se desarrolló a partir de la construcción de una pista de prueba en el año de 1956 en el estado de Illinois Estados Unidos, de la cual se obtuvo datos fundamentales, que sirvieron de referencia para métodos de diseño posteriores.

El Método de diseño de la AASHO introdujo el concepto de falla funcional de un pavimento, en oposición a los métodos tradicionales a la fecha que se fundamentaban exclusivamente en los conceptos de falla estructural (Corredor, 2008). La falla funcional depende de dos parámetros como la serviciabilidad y el comportamiento del pavimento.

En el año de 1972, se presenta la primera “guía provisional para el diseño de pavimentos” y en los años 1986 y 1993 se modifica la metodología introduciendo el procedimiento de la teoría elástica multicapa y cambios importantes sucedidos en diferentes áreas de diseño como son (Corredor, 2008):

- Incorporación de un "Factor de Confiabilidad"
- Sustitución del Valor Soporte del Suelo (S_i), por el Módulo Resiliente
- Empleo de los módulos resiliente para la determinación de los coeficientes estructurales.
- Modificación de la ecuación de diseño para tomar en cuenta cómo influye en el comportamiento del pavimento la calidad del drenaje.

El método permite calcular los espesores de las capas de pavimento en función del número estructural, y los coeficientes estructurales, de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento, la ecuación AASHTO 93 queda de la siguiente manera:

$$\log_{10} Wt_{18} = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10} M_R - 8.07$$

Ec. 28

Dónde:

W_{18} : número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2T

Z_R : Desviación estándar normal

S_o : Error estándar combinado de la predicción del tránsito y del comportamiento.

ΔPSI : Diferencia entre P_t y P_o

M_R : Módulo resiliente

SN : Número estructural

A continuación se describen las variables necesarias para el diseño basado en la guía AASHTO 93.

2.3.1.1 Ejes equivalentes

Existe gran variedad en las características de los vehículos que transitan por una vía, los cuales generan un amplio espectro de ejes de carga y gama de esfuerzos. Por lo tanto se toma como carga patrón un eje de 8.2 toneladas. La cantidad de repeticiones del eje patrón en un periodo determinado se lo denomina carga equivalente (ESAL "Equivalent simple axial load) y se determina mediante la siguiente fórmula.

$$W_{18} = TPD \times \frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \times FC \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

TPD: Tránsito promedio diario inicial

A: Porcentaje estimado de vehículos pesados (buses y camiones)

B: Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño

r: Tasa anual de crecimiento del tránsito

n: Periodo de diseño

FC: Factor camión

2.3.1.2 Confiabilidad (R)

La confiabilidad es el grado de seguridad sobre el correcto funcionamiento del diseño durante todo el periodo de vida útil. A medida que la confiabilidad aumenta se disminuye la probabilidad de falla, es decir, que aumenta el factor de seguridad lo que ocasiona que los espesores de las capas sean mayores. En la Tabla 8 se presenta los valores de confiabilidad que recomienda el método de diseño.

Tabla 8
Niveles recomendados de confiabilidad (R)

Función de la carretera	Urbana	Rural
Corredores arteriales(malla esencial)	85-99.9	80-99.9
Colectores(autopistas RI-RII, clase I-II)	80-99	75-95
otros	50-80	50-80

Fuente: (AASHTO, 1993)

El porcentaje de confiabilidad es representado en la ecuación de diseño AASHTO 93 mediante el valor del fractil de la ley normal centrada (Zr). Los valores de Zr se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9
Valores de ZR para diferentes grados de confiabilidad

Confiabilidad (R)	valor de ZR
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
90	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054

→
CONTINÚA

99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.1.3 Desviación estándar del sistema (S_o)

Es necesario determinar el error normal combinado (S_o), el cual tiene en cuenta el error o desviación del diseño, la variación de las propiedades de los materiales, la variación de las propiedades de la subrasante, la variación en la estimación del tránsito, la variación de las condiciones climáticas y la variación en la calidad de la construcción (Rondón & Reyes, 2015).

Tabla 10

Desviación estándar (S_o)

Proyecto de pavimento	S_o	
	flexible	rígido
Construcción nueva	0.45	0.35

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.1.4 Criterios de comportamiento

2.3.1.4.1 Índice de Serviciabilidad (Δ PSI)

Este índice tiene en cuenta el estado inicial y final de serviciabilidad del pavimento. Se evalúa de manera cuantitativa asignando un valor entre 0 y 5, siendo 5 el mayor valor, el cual representa a un pavimento en perfecto estado de serviciabilidad. El valor inicial (P_o) para pavimentos, oscila entre 4.0 y 4.2 (buen estado de la vía) mientras que el índice de servicio final (P_f), el cual representa el índice más bajo que puede ser tolerado por el usuario antes de que sea necesario una rehabilitación o refuerzo del pavimento, oscila entre 1.5 y 2.5 (Rondón & Reyes, 2015). Los valores de serviciabilidad final recomendados por el método se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Serviciabilidad final (P_f)

Función de la carretera	Serviciabilidad final (P_f)
Corredores arteriales(malla esencial)	2.5
Colectores (autopistas RI-RII, clase I-II)	2.0
otros	2.0

Fuente: (MOP, 2001)

A continuación se presenta la fórmula para calcular el índice de serviciabilidad.

$$\Delta PSI = P_o - P_f \quad \text{Ec. 30}$$

Dónde:

P_o : índice de servicio inicial

P_f : índice de servicio final

2.3.1.5 Propiedades de los materiales

2.3.1.5.1 Módulo resiliente

El módulo resiliente es la relación que existe entre esfuerzo y deformación de los materiales, representando las propiedades elásticas del suelo al ser sometido a ciclos de cargas. Este módulo se determina mediante la aplicación de equipos especiales de difícil acceso, por tal razón la guía AASHTO 93 presenta una fórmula de cálculo, la cual relaciona el valor del CBR para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante y ábacos para la base (Figura 26), sub base (Figura 27) y hormigón asfáltico (Figura 28).

El módulo resiliente para el dimensionamiento de las capas de la estructura se transforma a coeficientes estructurales de capas (a_i). Los coeficientes miden la capacidad relativa de una unidad de espesor de una determinada capa para funcionar como componente estructural del pavimento (Rondón & Reyes, 2015).

- Subrasante

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.61} \quad \text{Ec. 31}$$

- Sub base

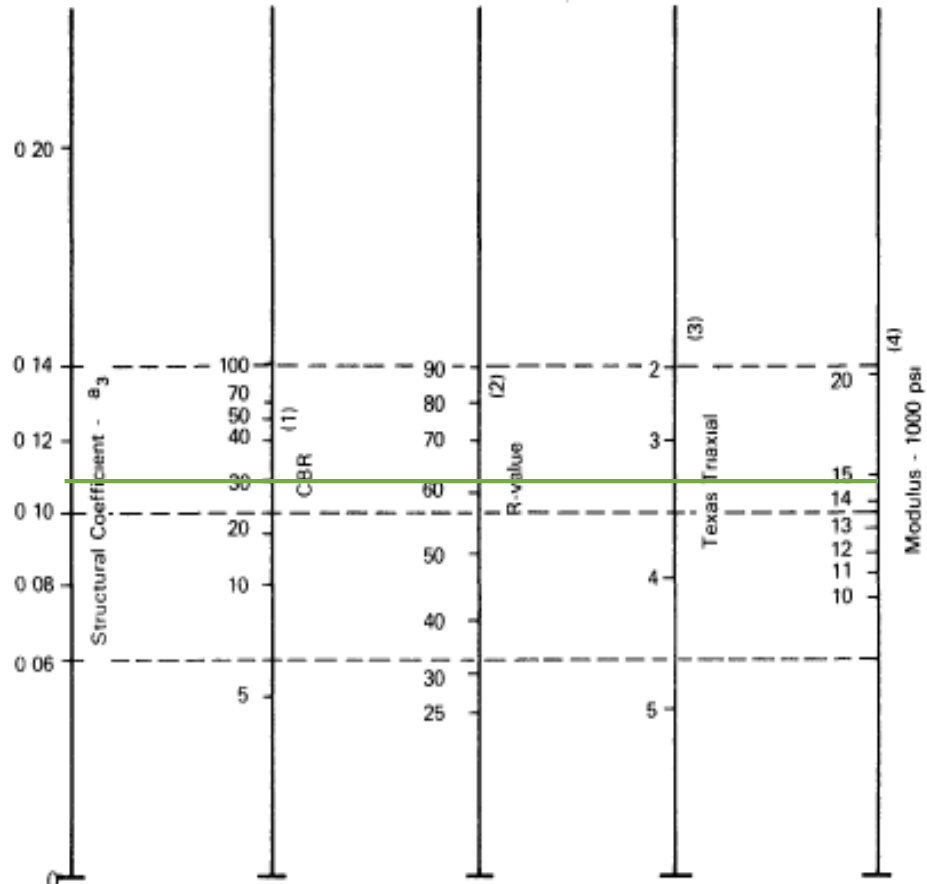


Figura 26. Valores del coeficiente estructural (a_3) para Sub-base
Fuente: (AASHTO, 1993)

- Base

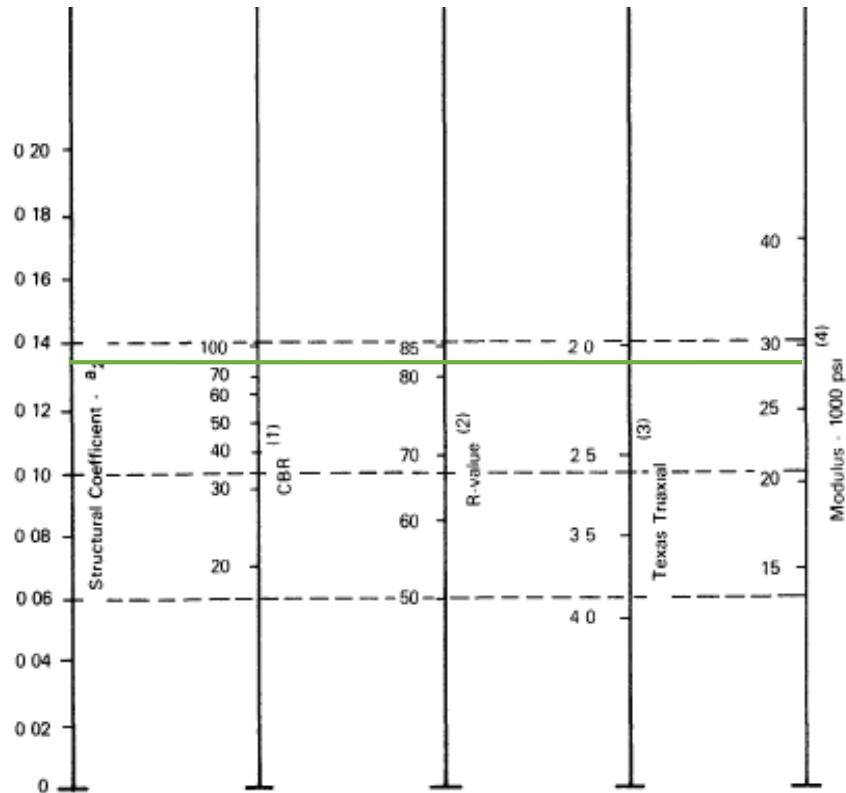


Figura 27. Valores del coeficiente estructural (a_2) para base granular
Fuente: (AASHTO, 1993)

- Carpeta asfáltica

Para obtener el valor del coeficiente estructural para la carpeta asfáltica mediante el monograma presentado en la Figura 28, es necesario conocer el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica, por lo cual, la guía AASHTO 93 presenta la siguiente fórmula de cálculo:

$$E_1 = 860 \times \frac{EM}{FL} \times 10^{0.035(30-T)} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

E_1 : Módulo elástico de la capa asfáltica (MPa)

EM: Estabilidad Marshall (KN)

FL: Flujo o deformación Marshall (mm)

T: Temperatura de cálculo (°C)

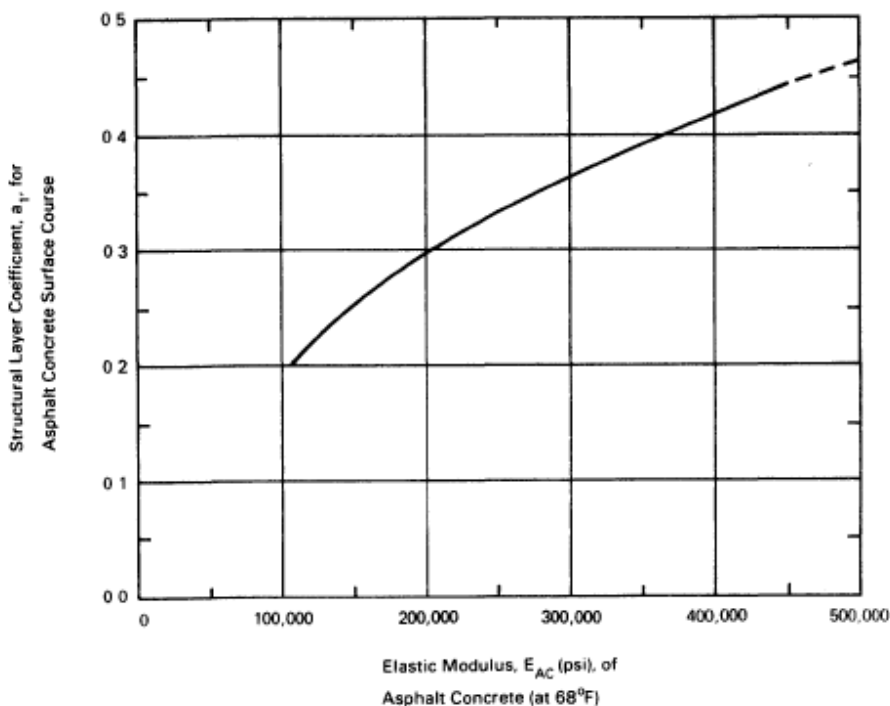


Figura 28. Valores del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta asfáltica
Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.1.6 Características estructurales del pavimento

2.3.1.6.1 Drenaje

El método (AASHTO, 1993) toma en consideración la calidad de drenaje para el diseño de la estructura del pavimento mediante el ajuste de los coeficientes estructurales por medio del factor de modificación de capa (mi). Este factor depende del nivel de drenaje y el tiempo en el año durante el cual se espera que el pavimento este normalmente expuesto a niveles de humedad cercano a la saturación (ver Tabla 13).

Tabla 12

Características de drenaje del material de base y/o sub base granular

Calidad de drenaje	Término para la remoción de agua
excelente	2 horas
bueno	1 día
regular	1 semana

→
CONTINÚA

pobre	1 mes
muy pobre	(El agua no drena)

Fuente: (AASHTO, 1993)

Tabla 13

Valores recomendados del coeficiente de ajuste (*mi*) para capas de base y sub base granulares

Calidad de drenaje	Porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80
pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.1.7 Diseño estructural del pavimento

2.3.1.7.1 Número estructural (SN)

El número estructural se calcula utilizando la ecuación básica de diseño (ver Ec. 28), mediante un proceso iterativo, dando valores al término SN, hasta obtener el valor de Wt18 igual.

2.3.1.7.2 Espesores de capas del pavimento flexible

Los espesores de las capas que componen el pavimento flexible se calculan mediante las fórmulas (Ec. 33 - Ec. 35), los mismos que deben cumplir con los espesores mínimos establecidos en la guía AASHTO 93 (ver Tabla 14)

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad \text{capa asfáltica} \quad \text{Ec. 33}$$

$$h_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_1 \times m_2} \quad \text{base granular} \quad \text{Ec. 34}$$

$$h_3 = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a_3 \times m_3} \quad \text{sub base granular} \quad \text{Ec. 35}$$

Tabla 14*Espesores mínimos de capas*

No. de ejes equivalentes (millones)	Espesores mínimos en pulgadas	
	concreto asfáltico	base granular
<0.05	1.0 o TSD	4.0
0.05-0.15	2.0	4.0
0.15-0.50	2.5	4.0
0.50-2.00	3.0	6.0
2.00-7.00	3.5	6.0
>7.00	4.0	6.0

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.2 Método Racional

La metodología racional determina los esfuerzos y deformaciones en las interfaces de las capas de la estructura del pavimento y la influencia en el comportamiento del mismo. El método se basa en la teoría de la elasticidad, leyes de comportamiento y toma como hipótesis los siguientes enunciados:

- El pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal
- Las propiedades en cualquier punto de la capa son las mismas
- Se desarrolla fricción en la interface entre capas.
- Todas las capas se consideran infinitas en sentido longitudinal
- Cada capa tiene su espesor, excepto la última que se considera infinita

Para el cálculo es necesario elegir el módulo de poisson, módulo de elasticidad y el espesor de cada capa del pavimento flexible, de manera que mediante un programa computacional se calcule la deformación radial a tracción en la capa asfáltica, la deformación vertical de compresión sobre la capa subrasante y el control de la deflexión vertical presente en la superficie del pavimento. Estos estados tensionales deben ser menores a los admisibles calculados mediante las fórmulas de las leyes de comportamiento; con el fin de controlar el ahuellamiento, la fatiga y la deformación máxima del pavimento, asegurando que el modelo estructural se comporte adecuadamente frente a las solicitaciones de carga.

2.3.2.1 Leyes del comportamiento

Las leyes del comportamiento son expresiones matemáticas, que permiten calcular las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles del modelo estructural. Las leyes de comportamiento se fundamentan en los criterios de la Shell, de los Ingenieros Dormon – Kerhoven y la CRR de Bélgica, y el criterio de Yang Huang.

Las leyes de comportamiento más difundidas son la ley de fatiga de la mezcla asfáltica, la ley de deformación sobre la subrasante, la ley de esfuerzos sobre la subrasante y la ley de deflexión (Higuera, 2007).

2.3.2.1.1 Control de fatiga

La deformación radial de tracción actuante en la capa bituminosa, deberá ser menor a la deformación radial de tracción admisible, con el fin de controlar la fatiga de la capa bituminosa ante las solicitaciones de carga impuestas por el tránsito, es decir, los daños estructurales (Higuera, 2007).

$$\epsilon_r < \epsilon_{r adm}$$

Las leyes que controlan la fatiga de la capa bituminosa obedecen a diferentes criterios, el más utilizado es de la Shell

- Criterio o ley de fatiga de la Shell

$$\epsilon_{r adm} = (0.856 \times V_b + 1.08) \times E_1^{-0.36} \times \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

$E_{r adm}$: Deformación de tracción admisible de la capa asfáltica (m/m)

V_b : Porcentaje en Volumen de asfalto de la mezcla

E_1 : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (N/m²)

N : Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño

K : coeficiente de Calange ($K_1 \times K_2 \times K_3$)

Coefficiente de Calage: relaciona el número de aplicaciones de carga de diseño y el número de aplicaciones de carga en un ensayo dinámico de laboratorio. El factor considera variaciones laterales de las cargas de tránsito, condiciones de temperatura de trabajo de la mezcla y diferentes estados de tensiones (Higuera, Mecánica de pavimentos, 2007).

Tabla 15
Coefficiente de Calage

		Mezclas abiertas con bajos porcentajes de asfalto	Mezclas densas con altos porcentajes de asfalto
Autorreparación de fisuras pequeñas	K1	2.0	10.0
Distribución lateral de cargas	K2		2.5
Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla por día por año	K3	Espesores pequeños Temperaturas bajas 1.0	Espesores altos Temperaturas altas 0.33

Fuente: (Higuera, Mecánica de pavimentos, 2007, pág. 91)

2.3.2.1.2 Control de ahuellamiento

La deformación vertical de compresión, presente sobre la capa de subrasante deberá ser menor a la deformación vertical de compresión admisible, con el fin de controlar el ahuellamiento y deformación de la estructura del pavimento, es decir, los daños funcionales (Higuera, 2007).

$$\epsilon_z < \epsilon_{z adm}$$

Uno de los criterios usados para controlar el ahuellamiento es el criterio de la Shell, el cual está en función del nivel de confiabilidad (85%).

$$\epsilon_{z adm} = 2.10 \times 10^{-2} \times N^{-0.25} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño durante el periodo de diseño

2.3.2.1.3 Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante

El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se puede calcular mediante los criterios de Dormon-Kerhoven y la CRR de Bélgica.

- Criterio de Dormon - Kerhoven

$$\sigma_{zadm} = \frac{0.007 \times E_s}{1 + 0.7 \times \log N} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

σ_{zadm} : Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante (Kg/cm²)

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

E_s : Módulo resiliente de la subrasante (Kg/cm²)

- Criterio CRR de Bélgica

$$\sigma_{zadm} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{0.229}} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

σ_{zadm} : Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante (Kg/cm²)

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño durante el periodo de diseño

CBR: Capacidad de soporte del suelo de la subrasante (%)

2.3.2.1.4 Control de la deflexión

La deflexión vertical que se presenta en la superficie de la estructura debe ser menor a la deflexión vertical admisible, con la finalidad de controlar la deformación y el ahuellamiento de la estructura del pavimento, es decir, los daños funcionales.

$$\Delta_z < \Delta_{z adm}$$

Las medidas de deflexión son un criterio de deformabilidad que permiten evaluar el estado y la capacidad estructural del pavimento en función del número de aplicaciones de carga que este es capaz de soportar antes de alcanzar la falla. (Higuera, 2007). Existen algunos criterios propuestos, se utilizará la fórmula de Huang.

$$\Delta_{z adm} = 26.32202 \times N^{-0.2438} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño durante el periodo de diseño

2.4 Rehabilitación de pavimentos flexibles

La rehabilitación del pavimento es el proceso mediante el cual se devuelve a la carretera las condiciones originales de soporte de carga y el nivel de servicio (comodidad, seguridad), para adaptar la misma al nuevo periodo de servicio. En el pavimento se presentan dos tipos de rehabilitación: superficial y estructural.

La rehabilitación superficial está orientada a resolver problemas que se presentan en la capa superior del pavimento como el agrietamiento por factores térmicos, envejecimiento, bajos coeficientes de fricción, baches, etc. La rehabilitación se realiza mediante la colocación de una capa delgada (espesores inferiores a los 35 mm) de mezcla asfáltica (Yarango, 2014). Por otra parte, la rehabilitación estructural puede orientarse a una reconstrucción total o la construcción de capas adicionales sean de material granular o de mezcla asfáltica sobre la superficie existente (Yarango, 2014).

Para determinar si es necesario y cuándo el pavimento requiere ser rehabilitado es importante primero evaluar el estado del pavimento mediante una valoración de la capacidad estructural, calidad de recorrido, estado actual de las fallas estimando la condición futura o el tiempo en que alcanzarán un nivel crítico. Con esta información se diseña una sobre carpeta de refuerzo. Para el diseño del refuerzo existen varios métodos, en el presente capítulo se detalla el procedimiento determinado por la AASHTO.

2.4.1 Diseño del refuerzo en pavimentos flexibles con el método AASHTO

El método establece que el refuerzo está destinado a la mejoría estructural del pavimento existente y el grosor exigido de la capa de refuerzo es función de la capacidad estructural que se requiere para satisfacer la demanda del tránsito futuro y la capacidad estructural del pavimento existente (Higuera, 2015).

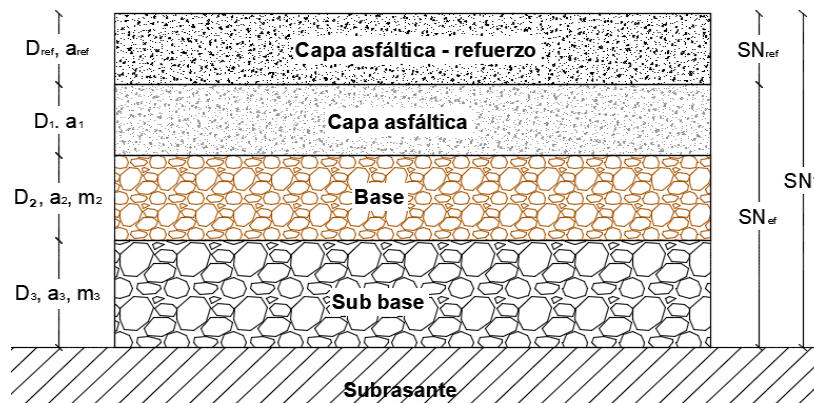


Figura 29. Esquema – diseño de refuerzo pavimentos flexibles

Donde:

SN_f : Número estructural requerido para el tránsito futuro

SN_{ef} : Número estructural del pavimento existente

SN_{ref} : Número estructural requerido para el refuerzo

D_{ref} : Espesor de la capa de refuerzo, (pulgadas)

a_{ref} : Coeficiente estructural de refuerzo, (1/pulgada)

a_1, a_2, a_3 : Coeficiente estructural de las capas del pavimento existente, (1/pulgada)

D_1, D_2, D_3 : Espesores de las capas del pavimento existente, (pulgadas)

m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje de la base, subbase.

2.4.1.1 Número estructural requerido para el tránsito futuro (SN_f)

El número estructural para el tránsito futuro se calcula mediante la fórmula básica del AASHTO 93 (ver Ec. 28), para lo cual, es necesario el conocimiento del tránsito de diseño, la confiabilidad, serviciabilidad, resistencia de la subrasante, propiedades de los materiales y características de drenaje, criterios que son descritos en la sección 2.7.1.

2.4.1.2 Número estructural del pavimento existente (S_{Nef})

Para el cálculo del número estructural del pavimento existente se analiza la ecuación del número estructural (Ec. 41), siendo necesario conocer las condiciones de drenaje de las capas granulares como también el espesor y el aporte estructural de cada capa. Los coeficientes estructurales (a_i) se determinan por observación visual, mediante el porcentaje de fisuras transversales y piel de cocodrilo obtenidas para cada grado de severidad, para posteriormente hacer uso de las tablas recomendadas por el AASHTO (Tabla 16, Tabla 17).

$$S_{N_{ef}} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots + a_n D_n m_n \quad \text{Ec. 41}$$

Tabla 16

Valores del coeficiente estructural para capas de concreto asfáltico deterioradas

Condición de la superficie	Coficiente estructural
Muy poca piel de cocodrilo y/o fisuras transversales de baja severidad	0.35-0.40
< 10% piel de cocodrilo de baja severidad y/o <5% de fisuras transversales de media y alta severidad	0.25-0.35
>10% piel de cocodrilo de baja severidad y/o <10% piel de cocodrilo de severidad media y/o 5-10% de fisuras transversales de media y alta severidad	0.20-0.30
>10% piel de cocodrilo de severidad media y/o <10% piel de cocodrilo de alta severidad y/o >10% de fisuras transversales de media y alta severidad	0.14-0.20
>10% piel de cocodrilo de alta severidad y/o >10% de fisuras transversales de alta severidad	0.08-0.15

Fuente: (AASHTO, 1993, pp. III-105)

Tabla 17

Valores del coeficiente estructural para capas de base o subbase granular deterioradas

Condición de la superficie	Coficiente estructural
Sin evidencia de bombeo, degradación o contaminación por finos	0.10-0.14
Alguna evidencia de bombeo, degradación o contaminación por finos.	0.00-0.10

Fuente: (AASHTO, 1993, pp. III-105)

2.4.1.3 Número estructural requerido para el refuerzo (SN_{ref})

El número estructural requerido para el refuerzo se obtiene restando el número estructural efectivo del pavimento existente del número estructural para el tránsito futuro.

$$SN_{ref} = SN_f - SN_{ef} \quad \text{Ec. 42}$$

2.4.1.4 Espesor de la capa de refuerzo (D_{ref})

El espesor del refuerzo se obtiene dividiendo el número estructural requerido del refuerzo para el coeficiente estructural de la capa asfáltica de refuerzo (a_{ref}), tomando el valor de un hormigón asfáltico nuevo.

$$D_{ref} = \frac{SN_{ref}}{a_{ref}} \quad \text{Ec. 43}$$

Después de obtener el espesor del refuerzo para el pavimento es indispensable verificar que los esfuerzos, deformaciones y deflexiones de la estructura del pavimento sean menores a los esfuerzos deformaciones y deflexiones admisibles, mediante la aplicación del método racional.

2.5 Materiales de refuerzo

Toda obra de ingeniería debe ser implantada en un suelo capaz de absorber las cargas transmitidas por la estructura. Existen casos en los que el suelo natural por sí mismo no soporta estas cargas, por lo cual se hace necesaria la utilización de distintas técnicas que mejoren las características naturales, como por ejemplo el reemplazo del suelo, el mejoramiento del suelo natural o el uso de emulsiones y fibras.

En algunas civilizaciones se presentan vestigios de la aplicación de distintos materiales como pasto, ramas, bambú, fibras naturales para el mejoramiento del suelo para obras. En Mesopotamia se aplicó el método de colocación de materiales naturales mejorando el suelo para la construcción de edificios. En el sur de Inglaterra (2500 años A. C), utilizaban varas y ramas para hacer caminos en zonas pantanosas, esta técnica tenía como objetivo mejorar la capacidad de carga del suelo, pero

el uso de materiales orgánicos, tiene la desventaja de ser biodegradables, acortando su periodo de vida útil.

Posteriormente al uso de fibras naturales se usaron técnicas y materiales con los cuales se trató de obtener resultados más duraderos, estos se conocen como métodos de estabilización de suelos. Alrededor de 1900 surge como una alternativa el empleo de productos denominados geosintéticos después de que Terzaghi y A. Casagrande, contemplaron la importancia de crear filtros con el fin de conseguir la separación entre dos materiales donde el paso del agua no repercuta en la filtración de finos, técnica desarrollada durante el presente siglo (Geotex , 2017).

2.5.1 Geosintéticos

Los geosintéticos son materiales fabricados mediante la transformación industrial de productos derivados del petróleo (polímeros), siendo los más usados el polipropileno y el poliéster que, mediante la aplicación de varios procesos, son convertidos desde su forma elemental (polvos o gránulos) en láminas, fibras, perfiles, películas, tejidos, mallas, etc.

Los geosintéticos tienen varios campos de acción en el área de la construcción como son las obras viales, sistemas de control de erosión, obras hidráulicas, mejorando la redistribución de esfuerzos, refuerzo de tierra, filtración, drenaje, protección y control de la permeabilidad; convirtiéndose en una alternativa para solucionar problemas tanto técnicos como económicos de los proyectos de ingeniería.

2.5.1.1 Funciones de los geosintéticos

Los geosintéticos presentan diferentes funciones según las características mecánicas, siendo conveniente identificar la función primaria que poseen: separación, filtración, drenaje, refuerzo o control de erosión.

- **Separación:** Actúan como separadores de suelos con diferentes curvas granulométricas, los cuales bajo cargas significativas tenderían a mezclarse. Por ejemplo, los geotextiles son usados para prevenir que materiales de base penetren suelos blandos de estratos subyacentes, manteniendo los espesores de diseño y la integridad de la vía. Los separadores

ayudan también en la prevención del acarreamiento de granos finos en dirección de estratos granulares permeables (International Geosynthetic Society).

- **Filtración:** Los geosintéticos actúan de forma similar a un filtro de arena, el cual permite el movimiento de agua a través del suelo reteniendo las partículas traídas por el flujo, evitando así la pérdida de estabilidad de la estructura. Para cumplir este rol, el geotextil debe tener propiedades de retención y permeabilidad adecuadas y ser resistente a la reducción de permeabilidad debido a la acumulación de finos (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009).
- **Drenaje:** El buen drenaje es de importancia crítica para evitar el deterioro de la vía debido a la acción de las aguas pluviales que caen sobre la vía o que son bombeadas desde la subrasante hacia las capas de la estructura del pavimento (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009).
Los geosintéticos actúan como drenes para conducir el flujo que no se requiere (agua de lluvia o el agua excedente en el suelo). Los geotextiles son usados para disipar las presiones de poros en la base de terraplenes y para grandes flujos fueron desarrollados drenes de geocompuestos (International Geosynthetic Society).
- **Refuerzo:** Los geosintéticos actúan como un elemento de refuerzo dentro de la masa de suelo o en combinación con el propio suelo para producir un compuesto que mejore las propiedades de resistencia y deformación (International Geosynthetic Society). Las características principales que deben considerarse son la interacción entre geosintético-suelo, resistencia al daño mecánico, módulo de rigidez tensional y resistencia tensional (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009). Los geosintéticos instalados sobre subrasantes inestables, incrementan la capacidad de carga del sistema debido a una mejor distribución de esfuerzos. Cuando se instalan dentro de las capas de base o subbase, ayudan a reducir los asentamientos asociados con la dispersión lateral de los materiales de base y subbase (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009).
- **Control de erosión:** Los geosintéticos buscan reducir la erosión del suelo ocasionado por la lluvia y la escorrentía de aguas de superficie. Para el control de la erosión se utilizan mantas temporales de geosintéticos y tapetes livianos permanentes de geosintéticos, colocados sobre los taludes evitando la exposición del suelo, como también barreras de

geotextil para la retención de partículas traídas por la escorrentía superficial (International Geosynthetic Society).

2.5.1.2 Tipos de materiales geosintéticos

En el campo de la ingeniería, los geosintéticos más utilizados son los geotextiles, geomallas, geomembranas y geocompuestos, los mismos que poseen distintas clases o subcategorías.

2.5.1.2.1 Geotextiles

El geotextil es un material textil plano, flexible, permeable a los fluidos, fabricado generalmente con fibras sintéticas, cuya función es retener partículas de suelo mayores al tamaño de sus poros, separación, refuerzo, drenaje, filtro y protección. Los geotextiles se clasifican según el método de fabricación y según la composición.

Clasificación según el método de fabricación

- Geotextiles tejidos:

Los geotextiles tejidos se fabrican tejiendo tiras de cintas entrecruzadas, al entrelazar dos o más fibras, hilos o filamentos. Se pueden tejer tanto de forma transversal (trama), como longitudinal (urdimbre) y normalmente ofrecen un tipo de resistencia a tracción conocida como biaxial (en los dos sentidos de su fabricación). Estos tipos de geotextiles tejidos se emplean principalmente en la construcción y realizan funciones de separación y refuerzo (Geotexan, 2012).

- Geotextiles no tejidos:

Están formados por fibras o filamentos superpuestos en forma laminar, consolidándose esta estructura por distintos sistemas según cual sea el sistema empleado para unir los filamentos o fibras (PAVCO, 2012), clasificándose en:

- Geotextiles No Tejidos ligados mecánicamente o punzonados por agujas
- Geotextiles No Tejidos ligados térmicamente o termo-soldados
- Geotextiles No Tejidos ligados químicamente o resinados

Clasificación según el método de fabricación

Según (PAVCO, 2012) las fibras más empleadas son las sintéticas, sin embargo al existir gran diversidad de aplicaciones, también se fabrican con fibras naturales y artificiales.

- *Fibras naturales:* Pueden ser de origen animal o vegetal utilizadas para la fabricación de geotextiles biodegradables.
- *Fibras artificiales:* Son derivadas de la celulosa (el Rayón, la viscosa y el acetato).
- *Fibras sintéticas:* Los geotextiles fabricados con estos polímeros poseen gran durabilidad y resistencia a los ataques de microorganismos y bacterias. Los más empleados son el polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida y poli acrílico.

2.5.1.2.2 Geomallas

Las geomallas son una estructura polimérica plana consistente en una estructura regular abierta de elementos de tracción integralmente conectados, que pueden ser unidos por extrusión, ligado o entrelazado. Se distinguen de los geotextiles por la discontinuidad que le dan sus aberturas de más de 3-4 cm (Ballester, Castro, & Gil, 2000). Se caracterizan por tener gran fortaleza en las uniones garantizando la transferencia de cargas a lo largo y ancho de la malla, módulo de alta resistencia a la tracción para resistir cargas dinámicas y alta durabilidad; utilizada principalmente para refuerzo.

Clasificación de la geomalla

La geomalla se clasifica en dos tipos básicos: monoaxial y biaxial.

- *Monoaxial:* Fabricadas a base de polietileno de alta densidad en un proceso de extrusión siguiendo un estiramiento en un solo sentido, poseen alta resistencia a la tensión y mínima elongación axial controlada. Se utilizan en aplicaciones donde se conoce a ciencia cierta la dirección de aplicación de la carga (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009).
- *Biaxial:* Poseen alta resistencia en las uniones y capacidad en dos direcciones. Se utilizan para refuerzos con carga de dirección variable.

2.5.1.2.3 Geomembranas

Las geomembranas son barreras de muy baja permeabilidad fabricadas a partir de hojas relativamente delgadas de polímeros como el HDPE y el PVC los cuales permiten efectuar uniones entre láminas por medio de fusión térmica o química sin alterar las propiedades del material (PAVCO, 2012). La función de la geomembrana es controlar la migración de fluidos, ideal para obras como construcción de canales, embalses, túneles, rellenos sanitarios, etc., debido a que posee alta durabilidad, alta resistencia química y alta resistencia a la radiación ultravioleta.

2.5.1.2.4 Geocompuestos

Los geocompuestos son la combinación de dos o más materiales y sus funcionalidades. Existen varios tipos de geocompuestos según la función a desempeñar.

- *Geocompuestos de drenaje*: elaborados con uno o dos geotextiles que permiten el drenaje de agua
- *Geocompuesto de refuerzo*: formado por un geotextil y una geomalla
- *Geocompuesto filtrante*: fabricado mediante la combinación de un geotextil filtrante y otro con elevada resistencia al punzonamiento.
- *Geocompuesto impermeabilizante*: Formado por lodos bentoníticos situados entre dos geotextiles.

2.5.1.2.5 Geoceldas

Son sistemas tridimensionales de gran peralte y forma romboide, fabricados en paneles de polietileno o polipropileno. Se utilizan para contener rellenos en taludes, evitando deslizamiento y erosión, confina materiales dentro de las celdas permitiendo construir plataformas reforzadas, con mayor capacidad de distribución de carga (Díaz, Escobar, & Olivio , 2009).

2.5.1.3 Geosintéticos para pavimentación y repavimentación

En ingeniería el uso de los geosintéticos ha tenido un gran desarrollo, de tal manera que, para finales de la década de los sesenta en el departamento de transportes de California, Caltrans,

comenzaron a experimentar con geotextiles aplicados a proyectos de repavimentación; teniendo en cuenta la principal función que deberían cumplir: evitar la reflexión prolongando la vida útil de las vías generando ahorros sustanciales en el mantenimiento de las obras viales. Por otra parte, con el avance de la tecnología de pavimentos, han fabricado geomallas de fibra de vidrio, con la finalidad de reforzar las capas bituminosas, incrementando su resistencia a la fatiga y retardando la aparición y reflejo de las fisuras existentes en los materiales bituminosos.

Los geosintéticos entre las capas asfálticas (geomallas de fibra de vidrio y geotextiles de repavimentación), son usados dependiendo de la función del geosintético, como una barrera impermeable, como una provisión de refuerzo a la tensión y al mismo tiempo para reducir los efectos de la reflexión de fisuras (PAVCO, 2012).

En repavimentación, al colocar la intercapa de geosintético se genera un efecto de separación permitiendo un desplazamiento relativo entre capas y la disminución de los esfuerzos a tensión. La resistencia a la fatiga de una capa de repavimentación dependerá de las características de la membrana amortiguadora de esfuerzos incluyendo su módulo de elasticidad, espesor y de la cantidad de modificadores del asfalto (PAVCO, 2012).

Mediante la introducción de un elemento rígido con alta resistencia a la tensión en la base de una sobrecarpeta, las grietas que se propagan hacia la superficie son interceptadas y se evita inmediatamente que sigan migrando. Por el contrario, la grieta se reorienta horizontalmente, como se muestra en la Figura 30 (Tensar, 2008).

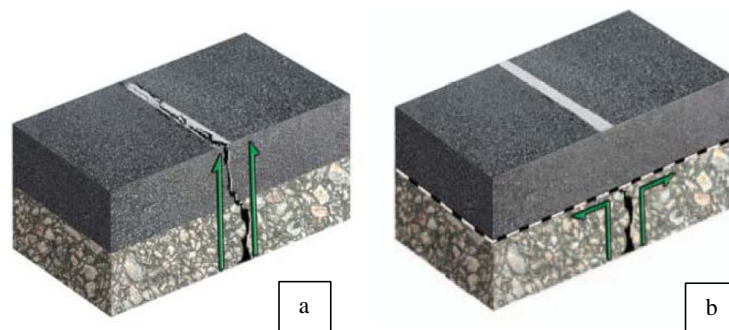


Figura 30. a) Pavimento sin refuerzo, b) pavimento con refuerzo

Fuente: (Tensar, 2008, p. 3)

2.5.1.3.1 Geotextil no tejido

El geotextil de pavimentación actúa como una intercapa en la estructura del pavimento que reduce la aparición de grietas de tipo piel de cocodrilo y los fenómenos de ahuellamiento. El geotextil impregnado de asfalto cumple con dos funciones básicas:

- Barrera impermeabilizadora

El geotextil actúa como barrera impermeable frente a efectos de la transmisión del flujo superficial hacia las capas granulares y la subrasante a través de los vacíos remanentes en el concreto asfáltico.

El geotextil no tejido utilizado para pavimentación y repavimentación deberá albergar una cantidad determinada de asfalto residual hasta lograr su saturación, además de una cantidad adicional para permitir la adhesión del geotextil a la superficie antigua y a la nueva capa de rodadura.

La cantidad de cemento asfáltico a utilizar es uno de los puntos donde se debe tener un mayor cuidado. Una de las normas constructivas internacionales para repavimentación, (Task Force 25, compuesta por la AASHTO, la AGC y la ARTBA), exige que como mínimo la cantidad de cemento asfáltico para saturar el geotextil debe ser de 0.9 L/m^2 , esta es una de las razones por las cuales el geotextil a usarse debe ser un no tejido punzonado por agujas, gracias a su espesor y porosidad le permiten alojar tal cantidad de asfalto (PAVCO, 2012).

- Membrana amortiguadora de esfuerzos

La colocación del geotextil de repavimentación entre la capa asfáltica antigua y nueva retarda el agrietamiento por reflexión, debido a que se suministra una capa flexible que absorbe parte de los esfuerzos entre dichas capas, permitiendo movimientos leves dentro de la intercapa del geotextil sin tensionar la capa de repavimentación en concreto asfáltico (PAVCO, 2012). De esta manera se prolonga la vida útil de la capa de repavimentación. Los geotextiles no tejidos impregnados con asfalto tienen un módulo de elasticidad bajo y absorben las deformaciones sin transferirlas.

El geotextil para repavimentación alivia parcialmente la transferencia de esfuerzos inducidos por el tráfico en la cercanía de las grietas, actuando como una capa aliviadora de esfuerzos. La capa de base se protege de los esfuerzos cortantes generados por las cargas generadas por el tráfico y de aquí que sean toleradas deflexiones mayores (PAVCO, 2012).

2.5.1.3.2 Geomalla de fibra de vidrio

Las geomallas de fibra de vidrio, son geomallas flexibles ideales para los pavimentos asfálticos nuevos y rehabilitaciones ya que, debido a las propiedades mecánicas como alto módulo de elasticidad, alta resistencia a la tensión, y baja elongación, se utilizan para controlar agrietamientos por reflexión, agrietamientos por fatiga y deformaciones plásticas en los revestimientos de concreto asfáltico, disminuyendo costos de mantenimiento a largo plazo e incrementando la vida útil de la carpeta.

La función principal de la geomalla es aumentar la resistencia a la tracción de la capa asfáltica y garantizar bajo una carga vertical, la distribución uniforme de los esfuerzos horizontales en una mayor superficie (PAVCO, 2012). Para la colocación de la geomalla de fibra de vidrio se debe tomar en cuenta algunas consideraciones constructivas, como se menciona en el manual de diseño con geosintéticos de PAVCO: que el recubrimiento mínimo de concreto asfáltico por encima de la geomalla de fibra de vidrio es de 5 cm y mínima por debajo de 3 cm.

CAPITULO III DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

3.1 Ensayos orientados al diseño Marshall

Para el presente proyecto se diseñó una mezcla asfáltica densa en caliente constituida por ligante y agregados mismos que deben cumplir con los parámetros descritos en el MTOP-001F-2002 numeral 810.2 y 811.2 respectivamente y ser caracterizados mediante ensayos basados en normas como INEN o ASTM.

Los ensayos de caracterización del ligante, agregados y el ensayo Marshall fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Para el análisis de los resultados del ensayo Marshall se ocuparon los criterios establecidos para tráfico pesado en el MTOP-001F-2002 tabla 405.05.4.

3.1.1 Obtención de la muestra de campo

El muestreo de agregados se lo realiza en base a la norma NTE INEN 695 la cual presenta dos procedimientos para el muestreo: muestreo de una banda transportadora y muestreo de una pila.

Los agregados utilizados en este proyecto son provenientes de los depósitos aluviales del río Pita, triturados en la planta asfáltica Naranjo – López. Para el muestreo se utilizó el segundo método que presenta la norma (muestreo de agregados de una pila), debido a que el material en la planta se encuentra apilado por tamaños de agregado (pasante de $\frac{3}{4}$ ´ retenido en el de $\frac{1}{2}$ ´, pasante de $\frac{1}{2}$ ´retenido en $\frac{1}{4}$ ´, pasante de $\frac{1}{4}$ ´).



Figura 31. Agregado en planta asfáltica Naranjo - López

Para obtener una muestra representativa de los áridos, el agregado grueso se debe tomar de tres partes diferentes de la pila (parte superior, parte media y parte inferior) y para el agregado fino se debe remover la capa externa y tomar la muestra del interior en lugares aleatorios para de esta manera evitar tomar material segregado o contaminado con agentes del ambiente.

3.1.2 Caracterización de los materiales componentes de la mezcla

Los materiales que integran la mezcla asfáltica son el ligante y el agregado y deben ser previamente caracterizados por medio de ensayos normados (INEN, ASTM) con el fin de obtener sus propiedades físico-mecánicas, mismas que permitirán conocer el comportamiento de los materiales tanto de forma individual como parte integrante de la mezcla.

Cabe mencionar que inicialmente se planificó trabajar con agregados procedentes de la mina de Pintag, agregados de origen volcánico, pero después de realizar la caracterización de los agregados se concluyó que el ensayo de peladura no cumple con lo establecido en el MTOP-001F-2002 numeral 811.2-02 donde menciona que después de ser sometido el agregado al ensayo de peladura más del 95% del material bituminoso debe quedar impregnado en las partículas (observar Figura 32).

Se procedió a trabajar con agregados procedentes del río Pita triturados en la planta asfáltica Naranjo – López.

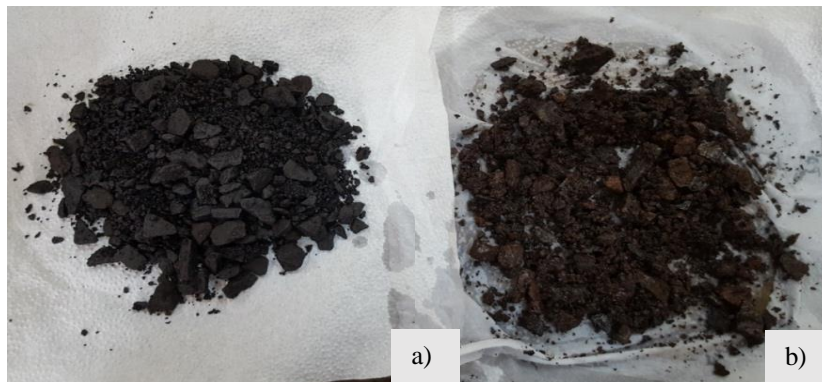


Figura 32. a) Mezcla asfáltica inicial con agregado de Pintag, b) mezcla asfáltica después de realizado el ensayo de peladura



Figura 33. a) mezcla asfáltica inicial con agregado del río Pita, b) mezcla asfáltica después de realizado el ensayo de peladura

3.1.2.1 Caracterización de los agregados

3.1.2.1.1 Análisis granulométrico para el agregado grueso y fino

El ensayo fue realizado según lo establecido en la norma NTE INEN 696. Se trabajó con arena y agregado grueso con tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada y 1/2 pulgada, los pesos utilizados hacen referencia a la Tabla 2.



Figura 34. Muestra árido grueso y fino seco

Con los datos obtenidos, se calculó el porcentaje pasante y retenido totales para posteriormente graficar la curva. A continuación se presenta la curva granulométrica para cada tamaño de agregado.

- Tamaño nominal $\frac{3}{4}$ de pulgada

Peso inicial: 5632.7 gr

Tabla 18

Análisis granulométrico grava $\frac{3}{4}$ pulgada

Tamices	Peso Retenido (g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado (%)	Acumulado pasa (%)
3/4 " (19,0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12,5mm)	3676.60	3676.60	65.27	34.73
3/8 " (9,51 mm)	1352.00	5028.60	89.28	10.72
No. 4 (4,76 mm)	177.00	5205.60	92.42	7.58
No. 8 (2.36 mm)	102.20	5307.80	94.23	5.77
No. 16(1,18 mm)	65.00	5372.80	95.39	4.61
No. 30(0,6 mm)	28.10	5400.90	95.88	4.12
No. 50(0,30mm)	31.30	5432.20	96.44	3.56
No. 100(0,15 mm)	10.60	5442.80	96.63	3.37
No. 200(0,075 mm)	83.00	5525.80	98.10	1.90
Pasante No. 200	97.10	5622.90		
total		5622.90		

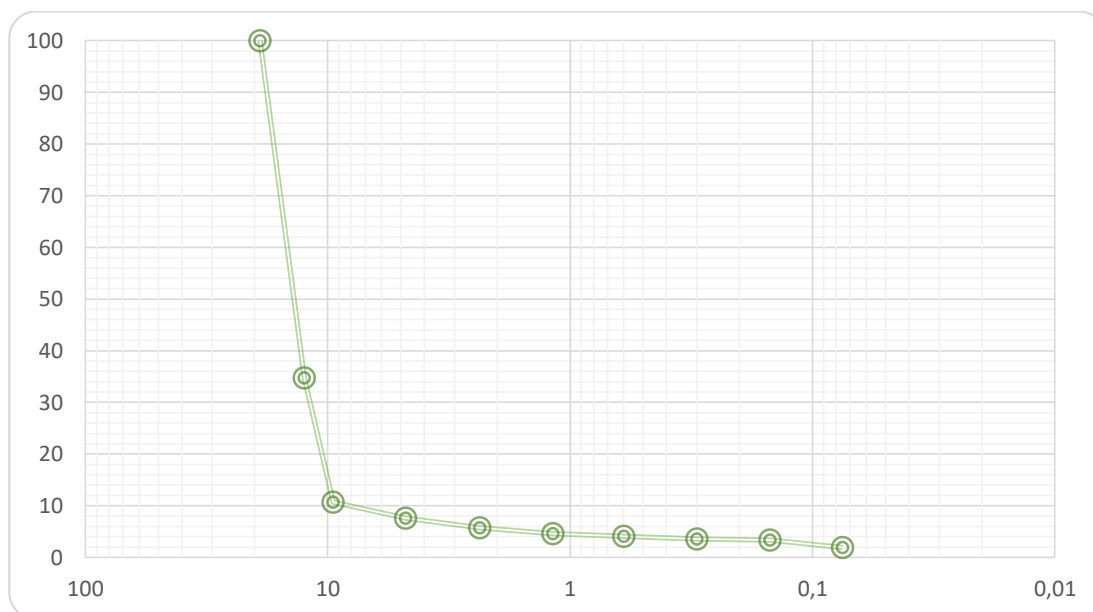


Figura 35. Curva granulométrica grava $\frac{3}{4}$ pulgada

- Tamaño nominal 1/2 de pulgada

Peso inicial: 2366.0gr

Tabla 19

Análisis granulométrico grava 1/2 pulgada

Tamices	Peso Retenido (g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado (%)	Acumulado pasa (%)
3/4 " (19,0 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12,5mm)	37.50	37.50	1.58	98.42
3/8 " (9,51 mm)	533.80	571.30	24.15	75.85
No. 4 (4,76 mm)	1566.80	2138.10	90.37	9.63
No. 8 (2.36 mm)	135.00	2273.10	96.07	3.93
No. 16(1,18 mm)	9.20	2282.30	96.46	3.54
No. 30(0,6 mm)	2.40	2284.70	96.56	3.44
No. 50(0,30mm)	2.80	2287.50	96.68	3.32
No. 100(0,15 mm)	6.00	2293.50	96.94	3.06
No. 200(0,075 mm)	23.80	2317.30	97.94	2.06
Pasante No. 200	48.00	2365.30		
total		2365.30		

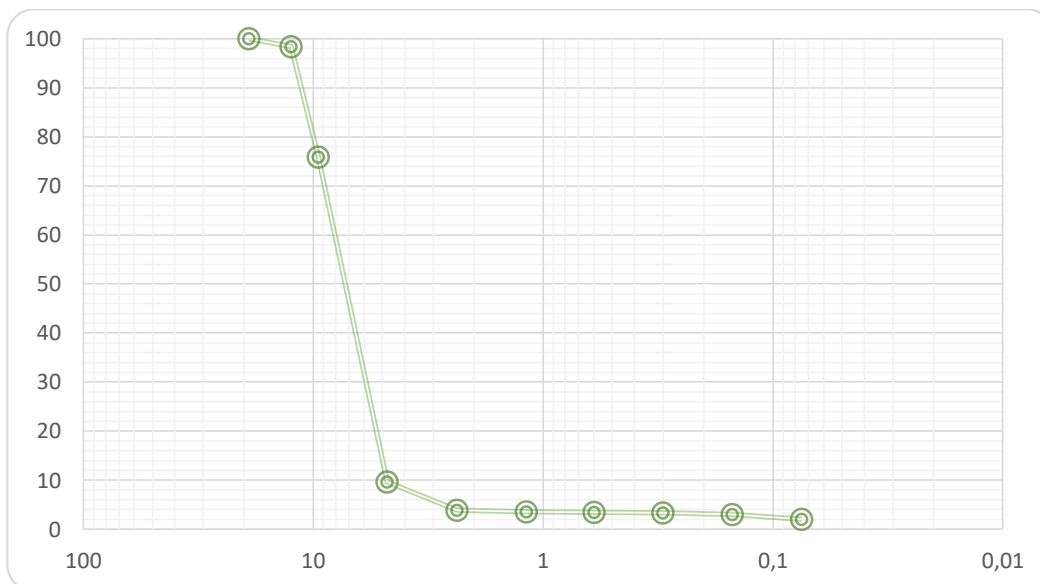


Figura 36. Curva granulométrica grava 1/2 pulgada

- Arena

Peso inicial: 524.70 gr

Tabla 20

Análisis granulométrico arena

Tamices	Peso Retenido (g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado (%)	Acumulado pasa (%)
3/8 " (9,51 mm)	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4 (4,76 mm)	12.80	12.80	2.44	97.56
No. 8 (2,36 mm)	118.00	130.80	24.93	75.07
No. 16(1,18 mm)	117.10	247.90	47.25	52.75
No. 30(0,6 mm)	67.40	315.30	60.09	39.91
No. 50(0,30mm)	74.90	390.20	74.37	25.63
No. 100(0,15 mm)	48.30	438.50	83.57	16.43
No. 200(0,075 mm)	32.30	470.80	89.73	10.27
Pasante No. 200	53.70	524.50		
total		524.50		

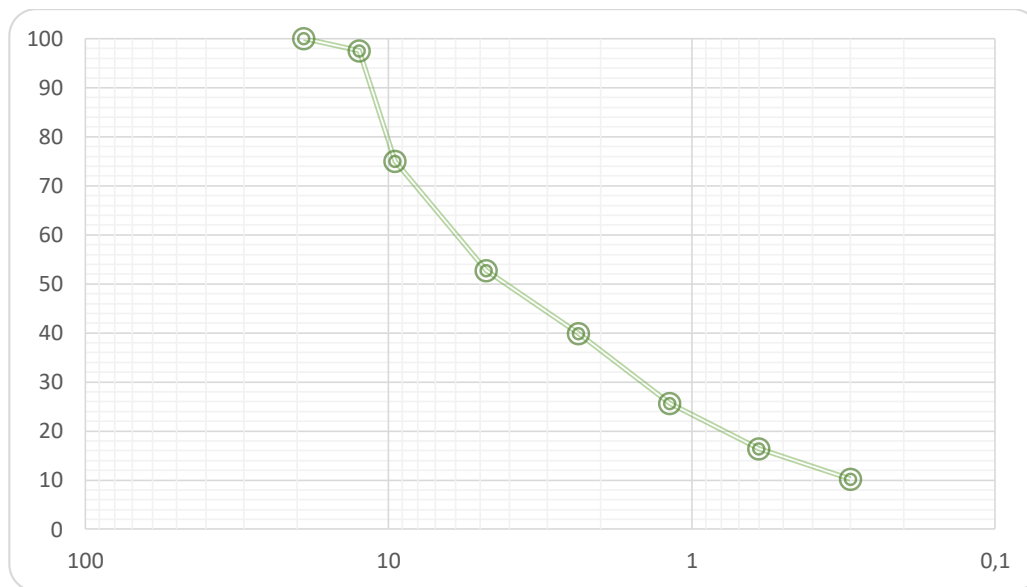


Figura 37. Curva granulométrica - arena

3.1.2.1.2 Absorción y Gravedad específica del agregado fino

Para el presente proyecto se aplicó el método gravimétrico descrito en la norma NTE INEN 856, a las gradaciones #8(2.36mm), #16(1.18 mm), #30(0.60mm) #50(0.36 mm), #100(0.150 mm), #200(0.075mm) y pasante de #200. En la Figura 38 se presenta una ilustración del procedimiento realizado para la obtención de los resultados de la gravedad específica para cada gradación, mismos que se presentan en la Tabla 21.

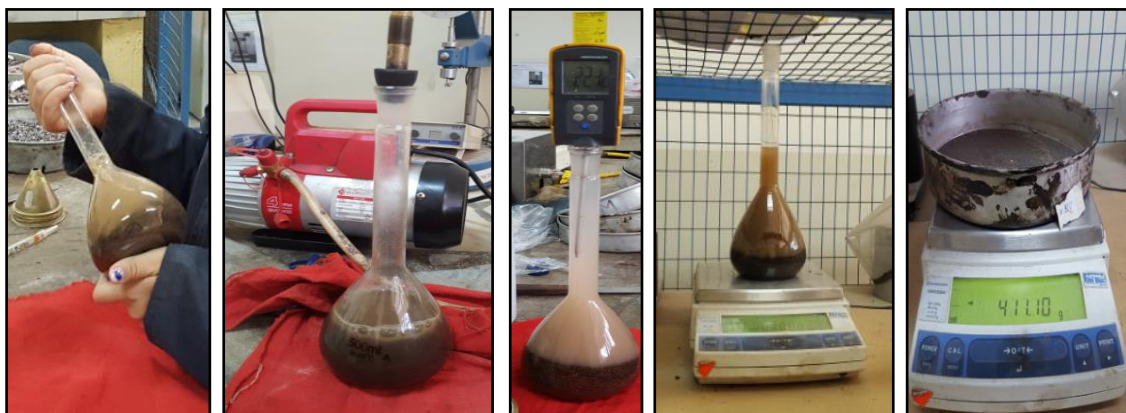


Figura 38. Procedimiento realizado para obtener la gravedad específica del árido fino

Tabla 21

Resultados - gravedades específicas del agregado fino

Graduaciones	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Gravedad específica SSS	Densidad relativa (gravedad específica)
	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
pasante#4 retenido #8	2.640	2.507	2.426
pasante#8 retenido#16	2.630	2.512	2.440
Pasante #16 retenido #30	2.656	2.593	2.554
Pasante #30 retenido #50	2.725	2.670	2.638
pasante#50 retenido#100	2.733	2.684	2.655
pasante #100 retenido#200	2.733	2.692	2.668
Pasante 200.	2.418	2.384	2.361

3.1.2.1.3 Absorción y Gravedad específica del agregado grueso

El ensayo se realizó a los agregados gruesos con gradaciones $\frac{1}{2}$ (12.5mm), $\frac{3}{8}$ (9.51mm), y #4 (4.75mm), aplicando el procedimiento descrito en la norma NTE INEN 857. En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos mediante el ensayo.



Figura 39. Procedimiento del ensayo: gravedad específica del árido grueso

Tabla 22

Resultados - gravedades específicas del agregado grueso

Gradaciones	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Gravedad específica SSS	Densidad relativa (gravedad específica)
	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
1/2"	2.683	2.566	2.496
3/8"	2.571	2.468	2.403
#4	2.629	2.479	2.388

3.1.2.1.4 Resistencia a la abrasión de árido grueso

El ensayo de resistencia a la abrasión se basa en la norma INEN NTE 860. Para el ensayo se verificó el peso necesario para cada gradación de agregado, según lo descrito en la Tabla 4, seleccionando la gradación B, por tener el tamaño máximo nominal del agregado de $\frac{3}{4}$ de pulgada. La carga utilizada es de 11 bolas de acero, determinada mediante la Tabla 5.



Figura 40. Procedimiento de ensayo: resistencia a la abrasión del árido grueso

A continuación se presenta el cálculo para la obtención del porcentaje de desgaste del agregado grueso, la fórmula aplicada se encuentra descrita en el apartado 2.2.1.4

Tabla 23

Datos para el cálculo de resistencia a la abrasión del agregado grueso

Resistencia a la abrasión

	peso agregado pasante de 19 mm y retenido en 12.5 mm	2501	gr
	peso agregado pasante de 12.5 mm y retenido en 9.5 mm	2499.58	gr
B	masa inicial de la muestra de ensayo	5000.58	gr
C	masa de la muestra retenida en el tamiz de #12 (1.70mm)	3237.3	gr

$$D = \frac{5000.58 - 3237.3}{5000.58} \times 100$$

$$D = 35.26 \%$$

De acuerdo con el MTOP-001F-2002 sección 811.2.02, el desgaste máximo que puede presentar el agregado grueso es del **40%** después de 500 revoluciones de la máquina de los ángeles, por lo cual el agregado utilizado para el presente proyecto cumple con los requisitos establecidos en la norma al presentar un desgaste del **35.26%**.

3.1.2.1.5 Ensayo de peladura

El ensayo de peladura se realizó mediante la norma ASTM D 3625. La muestra (mezcla asfáltica) se elaboró mediante el procedimiento establecido en la norma ASTM D 6926.



Figura 41. Elaboración de la mezcla asfáltica



Figura 42. Procedimiento ensayo de peladura

Terminado el ensayo, se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente, posteriormente se realizó el análisis visual de la mezcla inicial y de la mezcla sometida al ensayo de peladura concluyendo que, el porcentaje de pérdida de adherencia del agregado es **inferior al 95%** de tal manera que cumple con el requerimiento establecido en el MTOP-001F-2002 sección 811.2.02 donde se menciona que más del 95% del material bituminoso debe quedar impregnado en el agregado.



Figura 43. Comparación de la mezcla asfáltica antes y después de ser sometida al ensayo

3.1.2.1.6 Equivalente de arena

El ensayo fue realizado según lo establecido en la norma ASTM D 2419. Mediante la aplicación de la Ec. 10 descrita en la sección 2.2.1.6 se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 24 y, en la Figura 44 se presenta una ilustración del procedimiento realizado para la obtención de los resultados.



Figura 44. Procedimiento ensayo equivalente de arena

Tabla 24

Resultados del ensayo equivalente de arena

Descripción	Muestra 1	Muestra 2
lectura arena	12.90	13.00
nivel de arena	2.90	3.00
lectura arcilla	3.90	4.40
equivalente de arena	74.4	68.2
Equivalente de arena promedio	71.3 \approx 72.0	

De acuerdo con el MTOP-001F-2002 sección 811.2.02a, el valor del equivalente de arena mínimo para la capa de rodadura y para tráfico pesado es del **50%**, por lo tanto, el agregado utilizado para el presente proyecto cumple con los requisitos establecidos en la norma al presentar un equivalente de arena de **72.0%**.

3.1.2.2 Caracterización del asfalto

3.1.2.2.1 Ensayo de Penetración

El ensayo fue realizado bajo la norma INEN NTE 917 y las siguientes condiciones: 25 °C de temperatura, 100 gr de peso y tiempo de 5 segundos. Se utilizaron para el ensayo dos muestras, a las mismas que se realizaron 10 penetraciones. En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos.

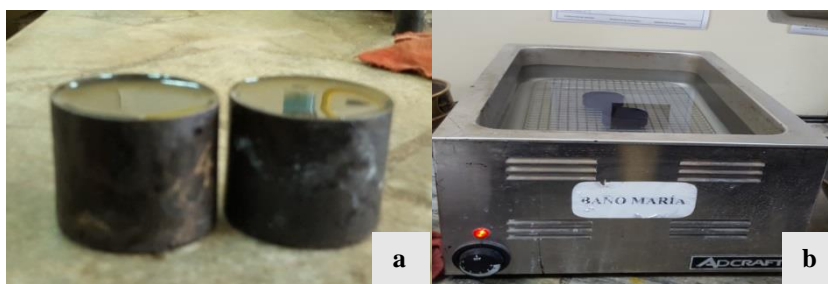


Figura 45. a) muestras de asfalto
b) muestras en baño de agua a 25 °C

Tabla 25

Resultados del ensayo de penetración

Lectura (mm/10)	Muestras	
	P1	P2
1	60	65
2	64	63
3	63	65
4	60	62
5	62	66
6	60	62
7	66	60
8	62	63
9	65	61
10	61	60
promedio	62.3	62.7
promedio total	62.5	

Según el MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1, el cemento asfáltico que se debe emplear para pavimentos es un asfalto AC-20 con penetración entre **60 y 70**, por lo cual el valor de **62.5 mm/10** obtenido mediante el ensayo cumple con la normativa.

3.1.2.2.2 Punto de Reblandecimiento

El ensayo de punto de ablandamiento se lo realizó mediante el procedimiento descrito en la norma NTE INEN 920. En la Tabla 26 se presenta el resultado de la temperatura para cada esfera de acero cuando ha tocado la placa inferior.



Figura 46. Procedimiento de ensayo punto de ablandamiento

Tabla 26

Resultado del ensayo punto de Ablandamiento

Esfera	Temperatura (°C)
1	48.8
2	49
Promedio	48.9 °C

Según el MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1, el cemento asfáltico AC-20 con penetración de 60 a 70 debe tener un punto de ablandamiento comprendido entre **48°C** y **57 °C** de tal manera que el material bituminoso sometido a ensayo para este proyecto cumple con la norma ya que tiene un punto de ablandamiento de **48.9 °C**.

3.1.2.2.3 Índice de penetración

Para el cálculo del índice de penetración de un material bituminoso es necesario conocer previamente el valor de penetración y el punto de ablandamiento del asfalto (ver Tabla 25 y Tabla 26). A continuación se presenta el cálculo del índice de penetración del asfalto, mediante la aplicación de las fórmulas descritas en la sección 2.2.2.3.

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log 62.5}{48.9 - 25} \right]$$

$$A = 2.32$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times 2.32}{2.32 + 1}$$

$$IP = -0.96$$

El rango de aceptación para el índice de penetración que presenta el MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1 es de **-1.5** a **+1.5** para un cemento asfáltico AC-20 con penetración de 60 a 70, por tal razón se acepta el valor del índice de penetración de **-0.96** el cual señala que el asfalto ensayado posee un buen comportamiento para ser utilizado en construcción de carreteras.

3.1.2.2.4 Gravedad específica del asfalto

El ensayo de gravedad específica del material bituminoso se realizó mediante el método del picnómetro descrito en la norma ASTM D70. La fórmula utilizada para el cálculo se describe en la sección 2.2.2.4

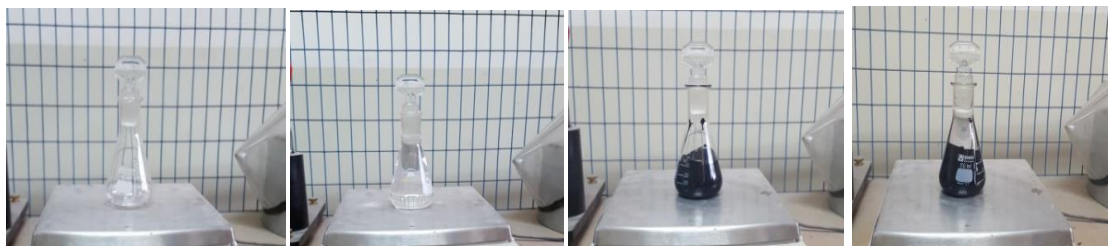


Figura 47. Procedimiento – ensayo gravedad específica del asfalto

Tabla 27

Resultado de la densidad y gravedad específica del asfalto

Símbolo	Datos	
a	57.48	gr
b	125.08	gr
c	96.9	gr
d	125.42	gr
Ya	0.997644	

→
CONTINÚA

temperatura de ensayo	22.9	°C
gravedad específica	1.009	
densidad	1.006	gr/cm ³

Según lo establecido en MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1 para un asfalto AC-20 la densidad relativa 25°C/25°C como mínimo debe ser **1.00**, de tal manera que el asfalto ensayado cumple con la especificación ya que el valor obtenido mediante ensayo es **1.01 gr/cm³**.

3.1.2.2.5 Ductilidad

Para el ensayo de ductilidad del asfalto se elaboró dos muestras según los requerimientos descritos en la norma INEN 916.



Figura 48. a) Colocación del asfalto en el molde, b) preparación de probeta para el ensayo



Figura 49. Ensayo de ductilidad en proceso

El valor obtenido en el ensayo de ductilidad para el asfalto utilizado en el presente proyecto es mayor a **100 cm** de tal manera que cumple con lo especificado en la norma MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1.

3.1.2.2.6 Punto de inflamación

El ensayo estándar para punto de inflamación y fuego fue realizado bajo la norma ASTM D92. El resultado del ensayo se presenta en la Tabla 28.



Figura 50. Procedimiento de ensayo: punto de inflamación

Tabla 28

Medida del punto de inflamación

Punto de inflamación	
	temperatura (°C)
medida 1	296

El punto de inflamación para el asfalto ensayado se da a una temperatura de **296°C** el mismo que cumple con la norma MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1. En la cual menciona que el valor mínimo para el punto de inflamación de un asfalto AC-20 con penetración de 60 a 70 es de **232** °C.

3.1.2.2.7 Resumen de resultados

Tabla 29

Resumen de datos obtenidos en la caracterización del asfalto

Ensayos	Unidad	Datos calculados	Valores para un asfalto con penetración de 60 a 70 (MTOP-001F-2002 tabla 810.2.1)		Verificación
			mínimo	máximo	
Penetración (25°C, 100gr, 5s), mm/10	mm/10	62.5	60	70	CUMPLE

Punto de ablandamiento (°C)	°C	48.9	48	57	CUMPLE
Índice de penetración		-0.96	-1.5	1.5	CUMPLE
Ductilidad (25 °C. 5cm/min), cm	cm	> 100	100		CUMPLE
Punto de inflamación, copa de Cleveland	°C	296	232		CUMPLE
Densidad relativa		1.01	1.00		CUMPLE

3.1.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente (Método Marshall)

En la presente sección se analizó la densidad, porcentaje de vacíos, flujo y estabilidad de mezclas asfálticas elaboradas con agregados cuya granulometría cumple con los requerimientos de la norma MTOP-001F-2002 y material bituminoso sin aditivo a diferentes porcentajes (5%, 5.5%, 6%, 6.5%, 7%), con el fin de determinar el porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla. La mezcla patrón servirá como parámetro de referencia para comparar el comportamiento de la mezcla reforzada con geosintético y fibra de vidrio.

3.1.3.1 Estabilización granulométrica

Para el presente proyecto se hará uso de los límites granulométricos para un tamaño máximo nominal de ¾" presentados en la Tabla 6 y como se puede observar en la sección 3.1.2.1.1 las granulometrías del material utilizado para el proyecto por separado no se encuentran dentro de los límites, por tal razón se decidió realizar una estabilización granulométrica trabajando con los 3 materiales en conjunto (tamaño nominal ¾", ½" y arena).

Es recomendable trabajar con una granulometría que se encuentre centrada respecto a los límites superior e inferior, por lo que se realizó varias iteraciones y comprobaciones hasta conseguir los porcentajes adecuados. En la Tabla 30 se presentan los porcentajes de cada material.

Tabla 30

Porcentaje y peso de cada granulometría

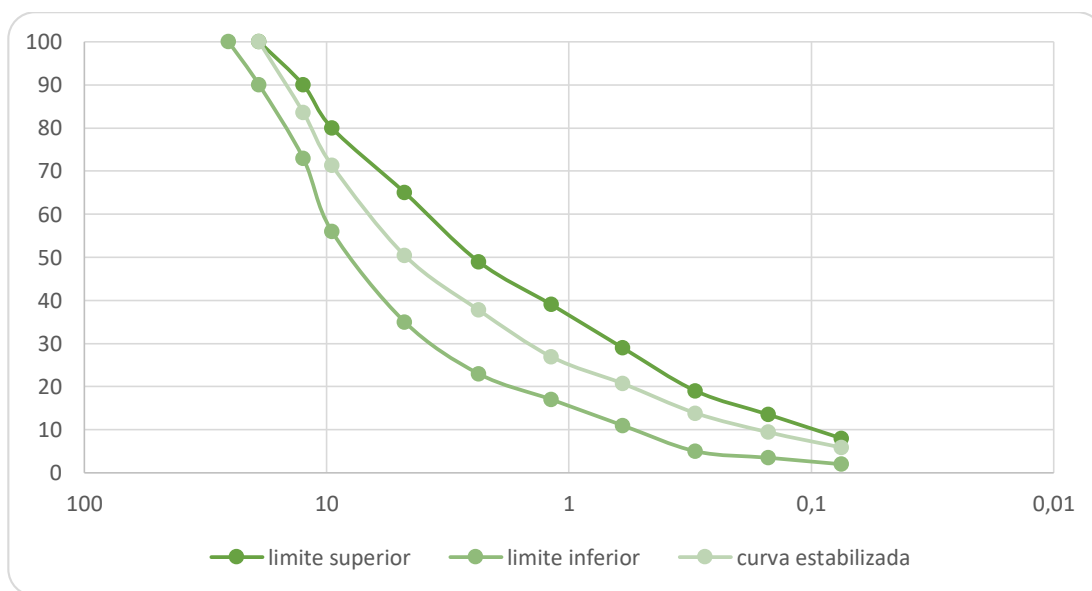
Tamaño máximo nominal	¾"	½"	arena	total
Porcentaje necesario (%)	24	27	49	100
Peso (gr)	255.76	301.27	492.97	1050.00

Se controla que la granulometría conformada por los porcentajes en peso de cada material seleccionado se encuentre dentro de los límites permitidos y posteriormente se realiza una comprobación granulométrica para verificar si la granulometría práctica concuerda con la granulometría teorizada.

Tabla 31

Estabilización granulométrica

Gradación	Porcentajes que pasa (MTO)		Peso retenido (g)	Retenido acumulado	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	Min	Máx.				
3/4 " (19,0 mm)	90.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2" (12,5mm)	73.00	90.00	171.72	171.72	16.35	83.65
3/8 " (9,51 mm)	56.00	80.00	129.36	301.08	28.67	71.33
No. 4 (4,76 mm)	35.00	65.00	219.57	520.65	49.59	50.41
No. 8 (2.36 mm)	23.00	49.00	132.69	653.34	62.22	37.78
No. 16(1,18 mm)	17.00	39.00	114.14	767.48	73.09	26.91
No. 30(0,6 mm)	11.00	29.00	64.91	832.39	79.27	20.73
No. 50(0,30mm)	5.00	19.00	72.15	904.53	86.15	13.85
No. 100 (0,15 mm)	3.50	13.50	46.62	951.16	90.59	9.41
No. 200 (0,075 mm)	2.00	8.00	37.15	988.30	94.12	5.88
Pasante No. 200			61.70	1050.00	100.00	



Es importante mencionar que para obtener una altura adecuada de las briquetas para el ensayo Marshall ($63.5\text{mm}\pm 1.3\text{mm}$), se realizó una comprobación con un peso de 1200gr y otra con 1050 gr, concluyendo que el uso de 1050 gr de material pétreo se acerca más a la altura óptima del espécimen cilíndrico.

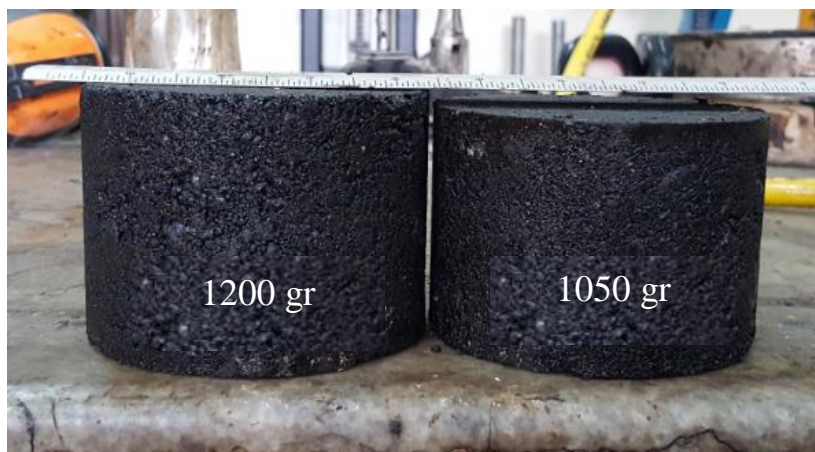


Figura 52. Comparación de altura de briketa conformada con 1200 gr y 1050 gr de agregado

3.1.3.2 Elaboración de briquetas

Para la elaboración de briquetas se siguió el procedimiento presentado en la norma ASTM D 6926. Las briquetas se elaboraron con la gradación especificada en la Tabla 31, con un peso de 1050 gr y cinco porcentajes de asfalto que van del 5% al 7% con incrementos de 0.5% entre ellos. En la Figura 53, Figura 54, Figura 55 se presenta la preparación del material, el procedimiento de elaboración y la briketa terminada.



Figura 53. Preparación de la mezcla asfáltica



Figura 54. Procedimiento para la elaboración de briquetas



Figura 55. Briquetas compactadas en proceso de enfriamiento

3.1.3.3 Gravedad específica Bulk (Gmb)

El ensayo se realizó con una temperatura de agua menor en 3°C a la temperatura de ensayo que es 25°C , por lo cual, en el cálculo se realizó la corrección por temperatura y corrección de la masa del agua desalojada mediante la aplicación de la Ec. 18. En la Figura 56 se presenta el procedimiento realizado en el ensayo y en la Tabla 32 los resultados de la gravedad específica Bulk obtenidos para cada porcentaje de asfalto.



Figura 56. Procedimiento del ensayo: gravedad específica Bulk

Tabla 32

Resultados de la gravedad específica Bulk, densidad y porcentaje de agua absorbida

Porcentaje de asfalto	Gravedad específica Bulk	Densidad Bulk	Porcentaje de agua absorbida
5	2.178	2.172	0.6%
5.5	2.190	2.183	0.1%
6	2.218	2.211	1.2%
6.5	2.240	2.234	1.1%
7	2.221	2.214	0.7%

3.1.3.4 Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall

Para el ensayo de estabilidad y flujo Marshall se aplicó la norma ASTM D 6927. En la Tabla 33 se presenta el resumen de los resultados obtenidos tanto de la estabilidad como del flujo para cada porcentaje de asfalto.



Figura 57. Procedimiento del ensayo: flujo y estabilidad Marshall

Tabla 33*Resultados de estabilidad y flujo Marshall*

Porcentaje de asfalto (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)
5	2898.74	10.33
5.5	3105.38	10.67
6	3275.56	11.33
6.5	3313.54	12.33
7	3374.75	13.33

3.1.3.5 Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Para determinar la gravedad específica de la mezcla asfáltica no compactada se aplicó la norma ASTM D 2041. En la Tabla 34 se presenta un resumen de los resultados de la gravedad específica máxima teórica para cada porcentaje de asfalto.



Figura 58. Preparación de la muestra – ensayo gravedad específica máxima teórica



Figura 59. Procedimiento del ensayo: gravedad específica máxima teórica

Tabla 34

Resultados de la Gravedad específica máxima

Porcentaje de asfalto (%)	A	D	E	Temperatura (°C)	Densidad del agua (g/cm ³)	Gravedad específica máxima (g/cm ³)
5	1050.5	4981.1	5595.4	20	0.998234	2.404
5.5	1076.5	4981.1	5606.5	20	0.998234	2.382
6	1073.4	4981.1	5593.1	20	0.998234	2.322
6.5	1094.3	4981.1	5601.1	20	0.998234	2.303
7	1085.2	4981.1	5593.8	20	0.998234	2.293

3.1.3.6 Gravedad específica del agregado

3.1.3.6.1 Gravedad específica neta de los agregados (Gsb)

Para el cálculo de la gravedad específica neta del agregado se utilizó el porcentaje por masa de agregado respecto a la masa total de la mezcla y la gravedad específica neta para cada tamaño de agregado (3.1.2.1.2 y 3.1.2.1.3) presentados en la Tabla 35.

Tabla 35

Gravedad específica neta y porcentaje de cada tamaño de agregado

Tamices	Gramos	Porcentaje respecto al peso total	gravedad específica neta
½" (12,5mm)	171.72	16.354	2.496
3/8 " (9,51 mm)	129.36	12.320	2.403
No. 4 (4,76 mm)	219.57	20.911	2.388
No. 8 (2.36 mm)	132.69	12.638	2.426
No. 16(1,18 mm)	114.14	10.871	2.440
No. 30(0,6 mm)	64.91	6.181	2.554
No. 50(0,30mm)	72.15	6.871	2.638
No. 100(0,15 mm)	46.62	4.440	2.655
No. 200(0,075 mm)	37.15	3.538	2.668
Pasante No. 200	61.70	5.876	2.361
	1050	100	

Aplicando la Ec. 21 se obtiene el resultado de la gravedad específica neta del agregado total siendo:

$$Gsb = 2.462$$

3.1.3.6.2 Gravedad específica aparente de los agregados (G_{sa})

El cálculo de la gravedad específica aparente del agregado se realizó mediante la aplicación de la Ec. 22, la cual utiliza como dato la gravedad específica aparente para cada tamaño de agregado expuesto en la Tabla 36, dato obtenido mediante caracterización del material pétreo descrita en la sección 3.1.2.1.2 y 3.1.2.1.3.

Tabla 36

Gravedad específica aparente para cada tamaño de agregado

Tamices	Gramos	Porcentaje respecto al peso total	gravedad específica neta
½" (12,5mm)	171.72	16.354	2.683
3/8 " (9,51 mm)	129.36	12.320	2.571
No. 4 (4,76 mm)	219.57	20.911	2.629
No. 8 (2.36 mm)	132.69	12.638	2.640
No. 16(1,18 mm)	114.14	10.871	2.630
No. 30(0,6 mm)	64.91	6.181	2.656
No. 50(0,30mm)	72.15	6.871	2.725
No. 100(0,15 mm)	46.62	4.440	2.733
No. 200(0,075 mm)	37.15	3.538	2.733
Pasante No. 200	61.70	5.876	2.418
	1050	100	

Por lo tanto, el resultado para la gravedad específica aparente del agregado total es:

$$G_{sa} = 2.634$$

3.1.3.6.3 Gravedad específica efectiva de los agregados (G_{se})

Para el cálculo de la gravedad específica efectiva de los agregados se utilizó los valores presentados en la Tabla 37 y la Ec. 23.

Tabla 37*Cálculo de gravedad específica efectiva del agregado*

Porcentaje de asfalto	Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica máxima teórica	Gravedad específica del asfalto	Gravedad específica efectiva
(%)	Pb (%)	Gmm	Gb	Gse
5	4.762	2.404	1.009	2.583
5.5	5.213	2.382	1.009	2.575
6	5.660	2.322	1.009	2.519
6.5	6.103	2.303	1.009	2.513
7	6.542	2.29	1.009	2.517
promedio				2.541

Por lo tanto, el resultado para la gravedad específica efectiva es:

$$Gse = 2.541$$

En la Tabla 38 se presenta las propiedades de la mezcla asfáltica, valores obtenidos mediante el análisis volumétrico aplicado a las briquetas, mismo que es descrito en la norma INV E 799. Con estos valores se generó las curvas de diseño de la mezcla asfáltica (Figura 60 y Figura 61), mismas que permitieron conocer el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla

Tabla 38*Propiedades de la mezcla asfáltica compactada – Mezcla patrón*

porcentaje de asfalto (%)	briquetas	contenido de asfalto en la mezcla	contenido de agregado en la mezcla (%)	peso en el aire	peso en el agua	peso saturado superficie seca	Volumen de la briqueta (cm3)	gravedad específica bulk	Gravedad específica teorica maxima (Gmm)	vacios de aire (Va)	vacios en el agregado mineral (VAM)	vacios llenos de asfalto (VFA)	estabilidad			flujo (mm)	
													lectura estabilidad (lb)	Factor C.	estabilidad corregida (lb)		
		pb	ps					Gmb	Gmm	Va	VAM	VFA					
5.00	M1	4.76	95.24	1080.18	583.14	1083.91	500.77	2.160					2595.78	0.980	2543.86	10.00	
	M2			1083.01	589.34	1085.50	496.16	2.186						2877.16	0.980	2819.62	10.00
	M3			1078.20	587.23	1080.29	493.06	2.189						3296.48	1.011	3332.74	11.00
	promedio								2.178	2.404	9.392	15.744	40.342		2898.74	10.33	
5.50	M1	5.21	94.79	1082.95	588.69	1083.28	494.59	2.192					3204.96	0.949	3041.51	10.00	
	M2			1088.80	591.80	1089.42	497.62	2.191						2773.76	1.000	2773.76	11.00
	M3			1087.21	589.98	1087.91	497.93	2.186						3500.86	1.000	3500.86	11.00
	promedio								2.190	2.382	8.077	15.700	48.552		3105.38	10.67	
6.00	M1	5.66	94.34	1090.08	606.01	1095.55	489.54	2.229					3020.16	1.000	3020.16	11.00	
	M2			1096.37	609.52	1102.58	493.06	2.226						3681.48	1.005	3699.89	12.00
	M3			1091.95	600.48	1098.02	497.54	2.197						3122.24	0.995	3106.63	11.00
	promedio								2.218	2.322	4.511	15.033	69.993		3275.56	11.33	
6.50	M1	6.10	93.90	1102.08	616.51	1106.37	489.86	2.252					3625.16	1.021	3701.29	13.00	
	M2			1097.95	609.21	1102.35	493.14	2.229						3602.28	1.013	3649.11	12.00
	M3			1097.70	613.96	1104.55	490.59	2.240						2752.64	0.941	2590.23	12.00
	promedio								2.240	2.303	2.721	14.558	81.311		3313.54	12.33	
7.00	M1	6.54	93.46	1098.62	607.58	1100.92	493.34	2.229					3247.64	1.032	3351.56	13.00	
	M2			1108.88	611.58	1111.98	500.40	2.219						3160.52	1.003	3170.00	13.00
	M3			1095.91	604.74	1100.26	495.52	2.214						3545.96	1.016	3602.70	14.00
	promedio								2.221	2.293	3.139	15.707	80.014		3374.75	13.33	

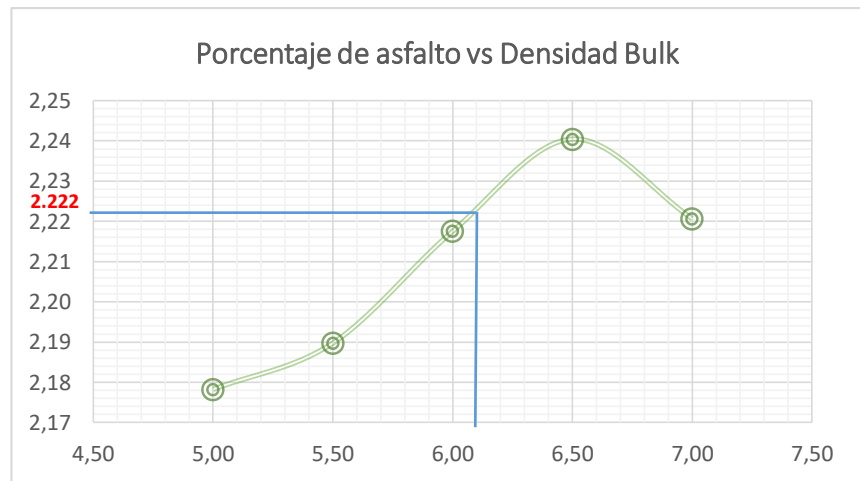
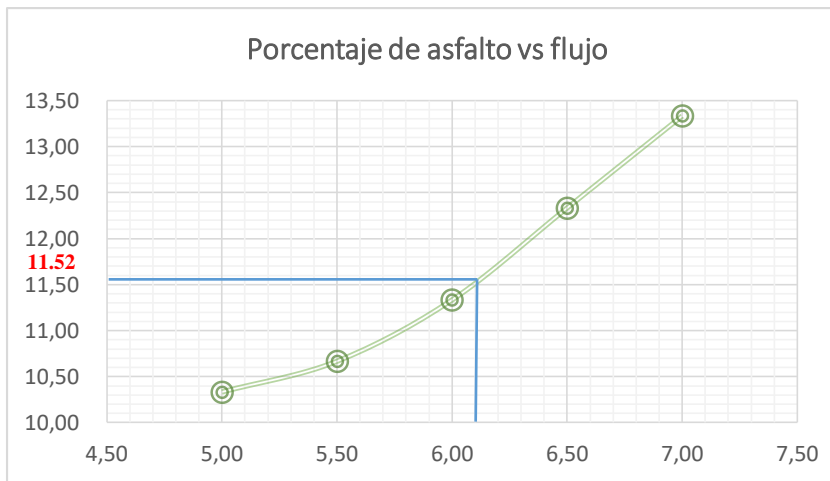
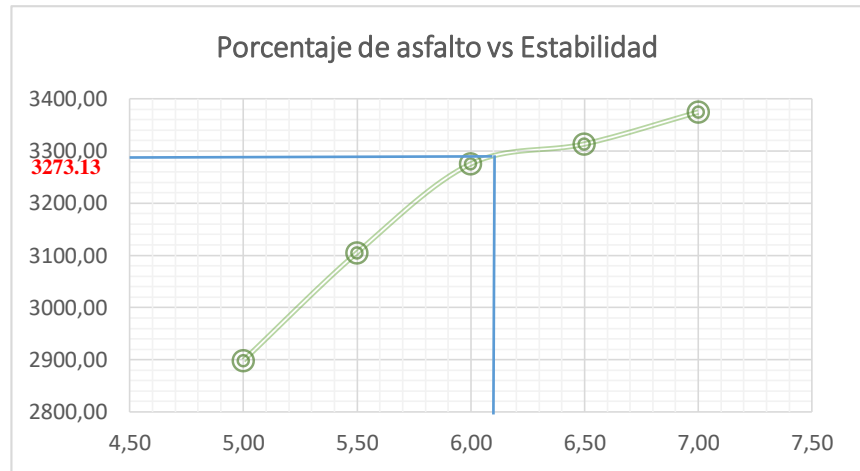
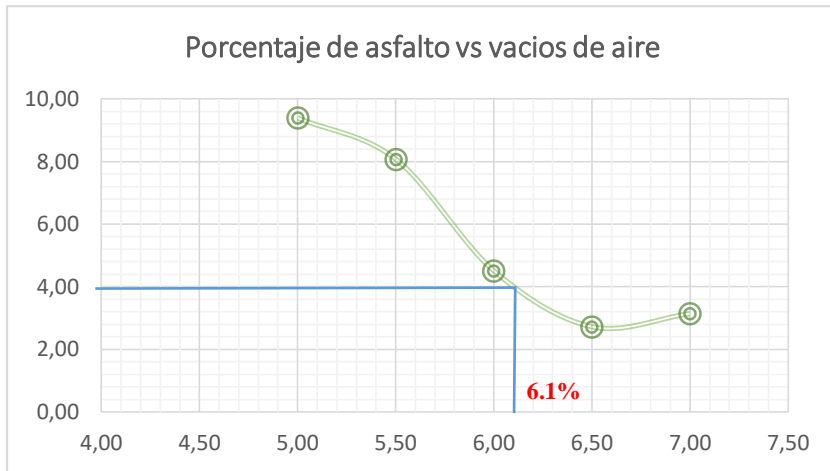


Figura 60. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón

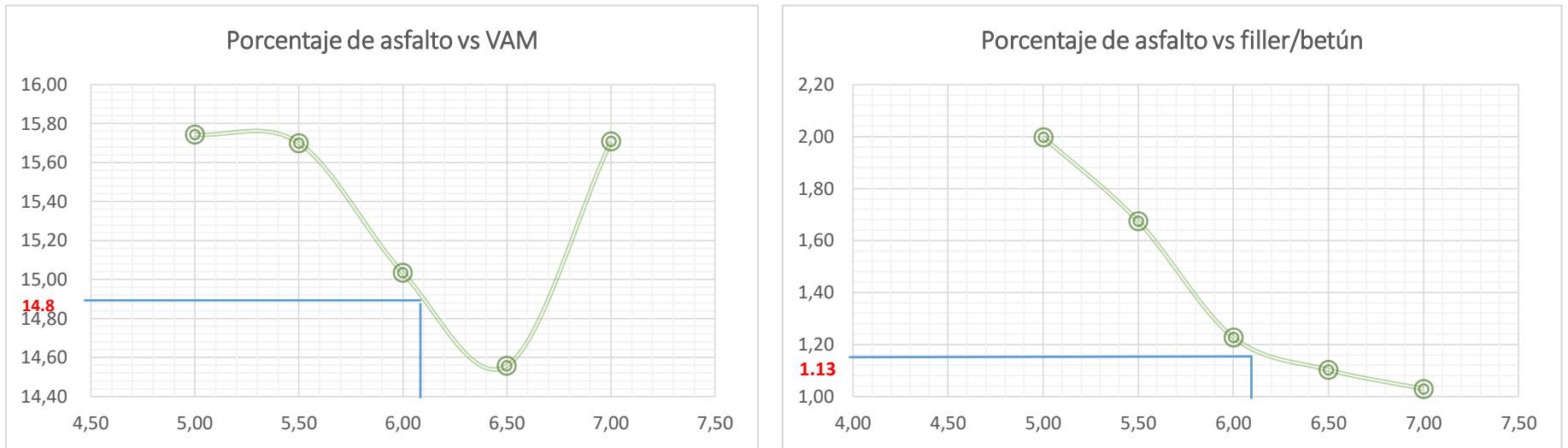


Figura 61. Curvas de diseño de la mezcla asfáltica – patrón

Después de evaluar las gráficas anteriormente expuestas se determinó que, **el porcentaje óptimo de asfalto es 6.1%**, con el cual la mezcla cumple los requisitos de calidad establecidos en el MTOP 001F-2002, el resumen de resultados se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39

Verificación de las propiedades de la mezcla para 6.1% de asfalto respecto a la norma MTOP 2002 tabla 405.5.4

Porcentaje óptimo de asfalto	Parámetros	valor calculado	Valor que establece MTOP 2002 tabla 405.5.4	Comprobación
6.1	Vacíos en la mezcla (%)	4	3 - 5	OK
	Estabilidad (lb)	3273.13	min 1800	OK
	Flujo (mm)	11.52	8 - 14	OK
	Relación filler/betún	1.13	0.8 - 1.2	OK
	VAM (%)	14.86	min 14	OK

El MTOP 001F-2002 establece que, para la verificación de un buen diseño de la mezcla asfáltica la relación entre gravedades específicas neta, aparente y efectiva deben cumplir con la condición expuesta en la Tabla 40.

Tabla 40

Condición de aceptación de la mezcla en base a las gravedades específicas

G_{sb}	<	G_{se}	<	G_{sa}	
2.462	<	2.541	<	2.634	OK

3.1.4 Fórmula maestra

En la Tabla 41 se presenta la fórmula maestra determinada para la mezcla asfáltica patrón en base a la granulometría descrita en la sección 3.1.3.1 y el contenido de asfalto óptimo.

Tabla 41*Fórmula maestra de la mezcla asfáltica patrón*

No. de tamices	Contenido (%)	Contenido total (%)	Descripción
3/4 " (19,0 mm)	0.00		
1/2"(12,5mm)	16.35	49.59	agregado grueso
3/8 " (9,51 mm)	12.32		
No. 4 (4,76 mm)	20.91		
No. 8 (2.36 mm)	12.64		
No. 16(1,18 mm)	10.87		
No. 30(0,6 mm)	6.18	50.41	agregado fino
No. 50(0,30mm)	6.87		
No. 100(0,15 mm)	4.44		
No. 200(0,075 mm)	3.54		
Pasante No. 200	5.88		
asfalto	6.10	6.10	asfalto
Total (%)	106.10	106.10	

CAPITULO IV DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

4.1 Introducción

En el presente capítulo, se diseñó la estructura del pavimento mediante la aplicación del método AASHTO 93 y la comprobación del diseño mediante el método Racional, obteniendo el espesor de la carpeta asfáltica, al mismo que se analiza las deformaciones y deflexiones determinando la posición adecuada del refuerzo. Posteriormente se realizó ensayos para analizar el comportamiento mecánico de la carpeta reforzada.

4.2 Diseño del pavimento mediante el método AASHTO 93

El diseño está basado en la guía AASHTO 93. Misma que describe los procedimientos para el diseño estructural de pavimentos flexibles de acuerdo a la Ec. 28. El cálculo de la estructura se realizó con referencia a los parámetros que debe cumplir un pavimento de primer orden y para un periodo de diseño de 10 años.

A continuación se describen los valores utilizados para el diseño del pavimento.

4.2.1 Ejes equivalentes

Para el cálculo de los ejes equivalentes se utilizó el conteo vehicular de la Autopista General Rumiñahui y la Ec. 29. En la Tabla 42 se presenta los resultados.

Tabla 42
Cálculo de ejes equivalentes

TIPO	2017		2017	Peso por eje (Ton)							Factor camión			ESAL en el carril de diseño	Factor de crecimiento 10 años	ESAL de diseño	
	VEHÍCULO	No. de veh/día		No. de veh/año	Eje delantero		Eje medio		Eje trasero		Eje delantero	Eje medio	Eje trasero				total
liviano	17375	93.15%	6341875	1	SS			2	SS		0.00022	-	0.00354	0.0038	23 846	10.75	256 383
2DB bus 2 ejes y camión de 2 ejes	1212	6.50%	442380	7	SS			11	SD		0.53105	-	3.23829	3.7693	1 667 480	10.77	17 952 607
3-A camión 3 ejes	20	0.11%	7300	6	SS			20	TD		0.28665	-	3.16049	3.4471	25 164	10.70	269 323
2S2 camión 4 ejes	9	0.05%	3285	6	SS	12	SD	20	TD		0.28665	4.58638	3.16049	8.0335	26 390	10.70	282 445
3S2 camión 5 ejes	30	0.16%	10950	6	SS	20	TD	20	TD		0.28665	3.16049	3.16049	6.6076	72 354	10.70	774 385
3S3 camión 6 ejes	6	0.03%	2190	6	SS	20	TD	24	TR		0.28665	3.16049	1.18559	4.6327	10 146	10.70	108 590
Suma	18652	100%	6807980	nota: SS-eje rueda simple; SD-eje estándar; TD- doble tándem; TR-triple tándem													1.96.E+07

4.2.2 Confiabilidad

El grado de confiabilidad es seleccionado de la Tabla 8, en este caso se tiene una confiabilidad del **90%** valor para una vía colectora (autopistas RI-RII, clase I-II).

El porcentaje de confiabilidad es representado en la ecuación de diseño AASHTO 93 mediante el valor del fractil de la ley normal centrada (Z_r), en este caso según la Tabla 9, se tiene un Z_r de **-1.282**.

4.2.3 Desviación estándar del sistema

Para un pavimento flexible la desviación estándar es **0.45** (ver Tabla 10).

4.2.4 Índice de Serviciabilidad

Para el cálculo del índice de serviciabilidad, el valor del índice de servicio inicial (P_o) es **4.2** y el valor del índice de servicio final (P_f) es **2.0**, valor recomendado por el MTOP para vías colectoras (autopistas RI-RII, clase I-II).

4.2.5 Módulo resiliente y coeficiente estructural de capas

El valor del módulo resiliente de la subrasante se calculó mediante la Ec. 31 para un valor de CBR de 15%, que corresponde a una subrasante clase S_2 según la clasificación del MTOP.

Por otra parte, para el cálculo del módulo resiliente y el coeficiente de capa de la sub base y base granular se utilizó los monogramas de las Figura 26 y Figura 27, para valores de CBR de **30%** para la sub base y **80%** para la base, valores mínimos establecidos en norma MTOP-001F-2002 sección 403 numeral 403.1.02 y sección 404 numeral 404.1.02 respectivamente.

En el caso de la carpeta asfáltica, para determinar el coeficiente estructural de capa (a_1) es necesario conocer el módulo de elasticidad de la mezcla, mediante la aplicación de la Ec. 32, misma que utiliza los valores de la estabilidad y flujo Marshall obtenidos en el diseño de la mezcla, los valores se presentan en la Tabla 33.

Es importante mencionar que se trabajó con los valores de CBR mínimos para la base y sub base establecidos por la norma, debido a que el diseño realizado es un diseño para un pavimento tipo según los requerimientos de una vía de primer orden, centrándose el estudio en la carpeta asfáltica.

4.2.6 Drenaje

El valor del factor de modificación de capa m_i se encuentra en la Tabla 13. Tanto para la base y sub base el tiempo de exposición del pavimento a un nivel de humedad próximo a la saturación de 5-25% y la calidad de drenaje para la base es bueno con un valor de m_2 de **1.15** y para la sub base la calidad del drenaje es regular, con un valor de m_3 de **1.05**.

4.2.7 Diseño estructural del pavimento

En la Tabla 43 se presenta el número estructural total y los espesores del pavimento flexible.

Tabla 43

Cálculo - diseño de la estructura del pavimento flexible - método AASHTO 93

Periodo de diseño	10 años	valor	observación
DATOS			
1. VARIABLES DEL DISEÑO			
1.1. cargas equivalentes en el período de diseño (W18)		1.96E+07	Fuente: conteo de tráfico Autopista Rumiñahui
1.2 confiabilidad en el diseño			
R		90.00%	colectores(autopistas) (tabla II-8)
ZR		-1.282	tabla 9
1.3. desviación estándar del sistema (So)		0.45	tabla 10
1.4. Pérdida de serviciabilidad			
Po		4.2	
Pt		2.0	valor recomendado por el MTOP para vías colectoras
ΔPSI		2.2	
2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES			
2.1. Módulo resiliente efectivo (MR)			
	CBR		
subrasante	15.00 %	13329 Psi	subrasante clase S2
sub base	30.00 %	15000 Psi	CBR minimo establecido en norma MTOP-001F-2002 sección 403 numeral 403.1.02.
base	80.00 %	30000 Psi	CBR minimo establecido en norma MTOP-001F-2002 sección 404 numeral 404.1.02.
concreto asfáltico		353000 Psi	E, calculado con la Ec. 28
2.2. Coeficiente de capas (a_i)			
subrasante			
sub base		0.110 a3	
base		0.140 a2	
concreto asfáltico		0.400 a1	
3. CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO			
3.1. drenaje			
factor de modificación de capa	calidad de drenaje		
m de la base (m2)	buena	1.15	
m de la sub base (m3)	regular	1.05	
CÁLCULO			
4. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO			
4.1. determinación del número estructural (SN)			
subrasante		4.2 SN3	
sub base		4.1 SN2	
base		3.2 SN1	
4.2. cálculo de espesores de las capas			
concreto asfáltico		20 cm	
base		15 cm	
sub base		5 cm	
SN total		4.22	

4.3 Método Racional

4.3.1 Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles del pavimento.

En la Tabla 44 se presenta los parámetros de diseño de la estructura del pavimento flexible.

Tabla 44

Parámetros de diseño de la estructura del pavimento

Descripción		Valor	
Ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño durante el periodo de diseño	W_{18}	1.96E+07	
Porcentaje del volumen de asfalto en la mezcla	V_b	13.42	%
Capacidad de soporte de la subrasante	CBR	15.00	%
Nivel de confianza	NC	85	%
Módulo dinámico de la mezcla asfáltica	E_1	2.43E+09	N/m ²
Coefficiente de Calage	K	8.25	

Para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles se aplicó las leyes de comportamiento con los criterios de la SHELL, Dormon-Kerhoven, CRR de Bélgica y Huang, descritos en el capítulo 2. En la Tabla 45 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 45

Esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles del modelo estructural

Parámetro	Criterio		valor admisible	
Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica	ley de fatiga de la Shell	E_r adm	2.785E-04	
Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante	criterio de la Shell (NC % 85)	E_z adm	3.154E-04	
Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante	criterio de Dormon-Kerhoven	σ_z adm	1.077	Kg/cm ²
	criterio de la CRR de Bélgica	σ_z adm	0.529	Kg/cm ²
Deflexión admisible en la superficie de la estructura del pavimento	Fórmula de Huang	Δ_z adm	0.439	mm

4.3.2 Modelamiento de la estructura del pavimento en el programa Bisar 3.0 de la Shell

En la Figura 62 se presenta un esquema de las posiciones en las que se calculan los esfuerzos, deformaciones y deflexiones y, en la

Tabla 46 se presentan los datos requeridos.

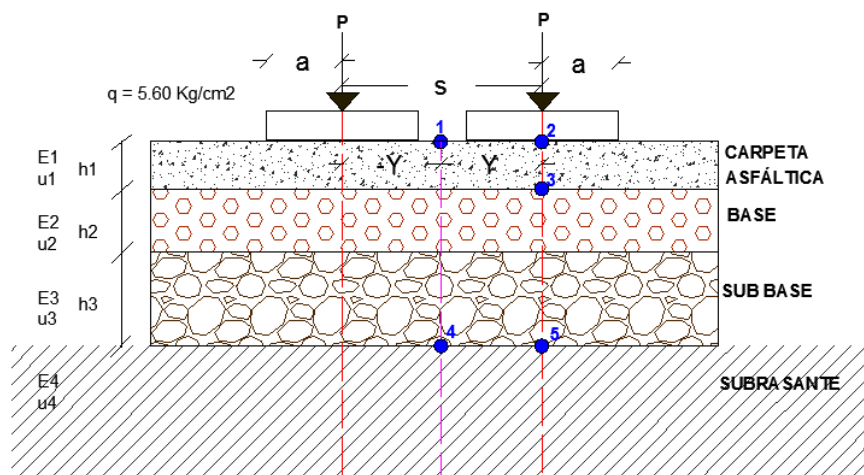


Figura 62. Esquema de las posiciones donde se analizó esfuerzos, deformaciones y deflexiones

Tabla 46

Características de las capas de la estructura del pavimento

Capa	Parámetro	Valor	
Asfáltica	h_1	0.20	m
	E_1	2437	MPa
	u_1	0.35	
Base	h_2	0.15	m
	E_2	207	MPa
Sub base	u_2	0.40	
	h_3	0.05	m
	E_3	104	MPa
Subrasante	u_3	0.40	
	E_4	92	MPa
	u_4	0.50	

Para el cálculo de las solicitaciones (esfuerzos, deformaciones, deflexiones) del modelo estructural se utilizó el programa BISAR 3.0 de la Shell, en el cual es necesario introducir la carga

del sistema, las características de la estructura del pavimento y las posiciones donde se desea obtener el valor de los parámetros, tal como se indica a continuación.

4.3.2.1 Cargas del sistema

Tabla 47

Cargas del modelo estructural

Descripción		valor	
Radio de carga	a	0.108	m
Presión de contacto	q	5.600	Kg/cm ²
Distancia entre el eje del sistema y el eje de carga	Y	0.162	m
Carga	P	2050	Kg

4.3.2.2 Características de la estructura

Tabla 48

Características de las capas de la estructura del pavimento

Capas	Módulo de elasticidad (MPa)	Espesor (m)	Relación de poisson
1	2437	0.20	0.35
2	207	0.15	0.40
3	104	0.05	0.40
4	92		0.50

4.3.2.3 Posición donde se desea calcular los parámetros

Tabla 49

Posiciones para calcular los parámetros

Nº posición de cálculo	X (m)	Y(m)	Z (m)	Nº de la capa
1	0.000	0.000	0.000	1
2	0.000	0.162	0.000	1
3	0.000	0.162	0.200	1
4	0.000	0.000	0.400	4
5	0.000	0.162	0.400	4

4.3.2.4 Resultado de parámetros calculados

Tabla 50

Esfuerzos, deformaciones y deflexiones calculados en el programa BISAR 3.0

Parámetro		Valor calculado
Deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica	E_r	1.618E-04
Deformación vertical de compresión sobre la subrasante	E_z	2.828E-04
Esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante (Kg-cm ²)	σ_z	0.334
Deflexión en la superficie en el eje de simetría (mm)	Δ_o	0.344
Deflexión en la superficie en el eje de carga de cada llanta (mm)	Δ_o	0.351
Deflexión en la subrasante en el eje del sistema (mm)	Δ_s	0.283
Deflexión en la subrasante en el eje de carga de cada llanta (mm)	Δ_s	0.274

4.3.2.5 Comparación de las solicitaciones calculadas con las admisibles

Tabla 51

Comparación de las solicitaciones calculadas con las admisibles

Capa	Criterio	Valor admisible		Valor calculado	V calculado < V admisible
Asfáltica	Ley de fatiga de la Shell	E_r adm	2.785E-04	1.618E-04	cumple
	Criterio de la Shell (NC % 85)	E_z adm	3.154E-04	2.828E-04	cumple
Subrasante	Criterio de Dormon-Kerhoven	σ_z adm	1.077	0.334	cumple
	Criterio de la CRR de Bélgica	σ_z adm	0.529	0.334	cumple
Estructura	Fórmula de Huang	Δ_z adm	0.439	0.351	cumple

La estructura analizada se encuentra correctamente diseñada y cumple con todos los criterios de diseño ya que las solicitaciones calculadas son menores a las solicitaciones admisibles, por lo tanto, el dimensionamiento realizado mediante la aplicación del método AASHTO 93 es el adecuado. En la Figura 63 se muestra un esquema del diseño del pavimento final.

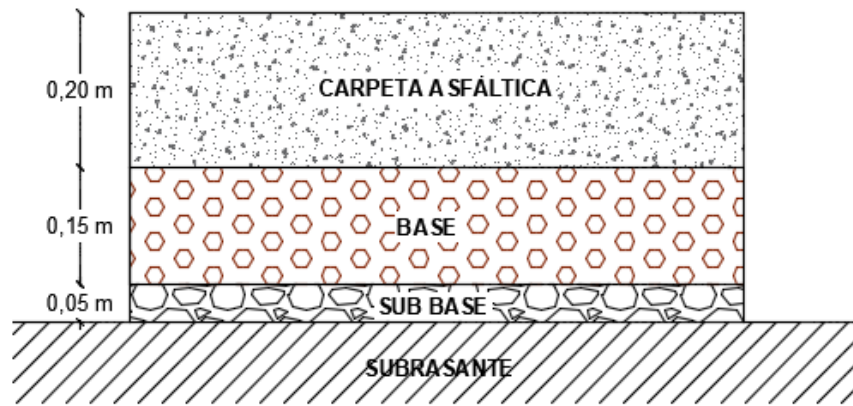


Figura 63. Esquema - diseño final de la estructura del pavimento flexible

Si bien el espesor de carpeta asfáltica obtenido en el cálculo supera los valores recomendados por el AASHTO se debe recalcar que el mismo es teórico y fue calculado para una subrasante clase S2, base y sub base con CBR mínimo establecido por el MTOP y para un tráfico correspondiente a una vía de primer orden.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LA POSICIÓN DEL REFUERZO PARA LA CARPETA ASFÁLTICA

5.1 Introducción

En el presente capítulo se determinó la posición óptima del refuerzo mediante la curva de comportamiento teórica de la mezcla asfáltica reforzada. Esta curva se obtuvo mediante el análisis de las solicitaciones de la carpeta asfáltica cuando el refuerzo se encuentra colocado en diferentes posiciones, comparando los mismos con las solicitaciones admisibles de deformación radial a tracción en la base de la capa asfáltica y deflexión en la superficie de la estructura del pavimento diseñada en el capítulo IV.

Para la obtención de las solicitaciones en la carpeta se usó el programa BISAR 3.0 de la Shell. El refuerzo se modeló para la geomalla de fibra de vidrio en las siguientes posiciones $1/6h$, $1/3h$, $1/2h$, $2/3h$ medido desde la superficie de la carpeta y en la base de la carpeta, siendo “h” el espesor de la carpeta asfáltica.

La comprobación de la curva de comportamiento teórica de la mezcla asfáltica reforzada y la posición óptima del refuerzo se realizaron mediante ensayos mecánicos (Marshall y tracción indirecta) a probetas con cuatro tipos de refuerzo: geomalla de fibra de vidrio, geotextil no tejido y con dos fibras elaboradas como alternativa de refuerzo (fibra de vidrio con anhídrido polivinílico – bórax y fibra de vidrio con isopreno).

5.2 Propuestas de fibras de reforzamiento

En el presente proyecto se muestra dos alternativas de reforzamiento de la carpeta asfáltica mediante la utilización de la estera de hebras de fibra de vidrio de 375 gr/m^2 (fiberglass chopped Strand Mat (CSM)). La primera alternativa es añadirle anhídrido polivinílico - bórax y la segunda isopreno, con la finalidad de mantener los filamentos unidos y proporcionar mayor módulo de elasticidad al material.

- Fiberglass chopped Strand Mat (CSM)

Fiberglass chopped strand Mat es una estera de fibras de vidrio que proporciona la misma resistencia en todas las direcciones. La fabricación de esta estera se realiza mediante hebras continuas de filamentos en longitudes de 1.5 a 3 pulgadas dispersadas en forma aleatoria y unidas mediante la aplicación de un aglutinante.



Figura 64. Fiberglass chopped strand mat

- Anhídrido polivinílico - bórax

El polímero elastómero denominado anhídrido polivinílico - bórax (APB) fue desarrollado en un proyecto de investigación (Merino, 2016) como una membrana que actúa como un sistema de protección de taludes. El polímero presenta las siguientes propiedades:

- Los materiales que componen el polímero no generan un riesgo a la salud.
- Al ser un elastómero mantiene aproximadamente su forma al someterse a deformaciones bruscas y rápidas, puede extenderse de manera extraordinaria y luego recuperar su forma.
- el polímero modifica su forma de manera acorde con la deformación cuando se somete a deformaciones lentas.



Figura 65. Membrana de anhídrido polivinílico - bórax
Fuente: (Merino, 2016)

- Isopreno

El isopreno o 2-metil-1,3-butadieno es un compuesto orgánico con fórmula $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$ que a temperatura ambiente es un líquido incoloro muy volátil, debido a su bajo punto de ebullición. Hidrocarburo que da lugar a polímeros llamados isoprenoides o terpenos empleados frecuentemente en la industria. En la naturaleza existen polímeros con esta estructura como el caucho, que contiene principalmente residuos de isopreno.

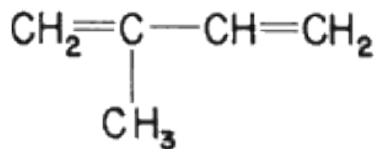


Figura 66. Estructura de la molécula de isopreno

5.2.1 Refuerzo con estera de fibra de vidrio y anhídrido polivinílico - bórax

Para la fabricación del refuerzo de fibra de vidrio y anhídrido polivinílico - bórax se aplica el procedimiento descrito a continuación. Es importante mencionar que para la elaboración del polímero elastómero: anhídrido polivinílico - bórax (APB) se aplicó las dosificaciones descritas en la investigación de Merino.

a) Materiales y equipos

- Tetraborato de sodio grado técnico (bórax)
- Acetato de polivinilo (polímero de goma blanca)
- Agua
- Estera de fibra de vidrio (375 gr/m²)
- Balanza de precisión
- Espátula
- Atomizador



Figura 67. Materiales para la fabricación del polímero

b) Procedimiento

- Se elabora la mezcla para la primera capa, para lo cual se mezcla tetraborato de sodio grado técnico y Acetato de polivinilo con agua, según la dosificación de la Tabla 52.

Nota: Los materiales necesitan tomar contacto con el agua para obtener las propiedades requeridas

Tabla 52

Dosificación lechada

Compuesto	Cantidad
Agua (ml)	500
Bórax (gr)	30
Agua (ml)	500
Polímero de goma (ml)	200

Fuente: (Merino, 2016)

- Se aplica sobre la estera de fibra de vidrio el bórax con la finalidad de humedecer y posteriormente se coloca tanto el bórax como el polímero de goma en forma simultánea mediante un atomizador a una distancia de 60cm y de manera uniforme.



Figura 68. Lanzado de bórax y polímero de goma

- Terminada la aspersion de la primera capa se deja secar según el tiempo establecido en la Tabla 53

Tabla 53

Tiempo de secado y temperatura

Ambiente	Tiempo de secado (min)	Temperatura (°C)
Totalmente nublado	120	15-19
Parcialmente nublado	90	20-24
Despejado soleado	45	25-30
Noche	180	8-12
Lluvia	No recomendable	

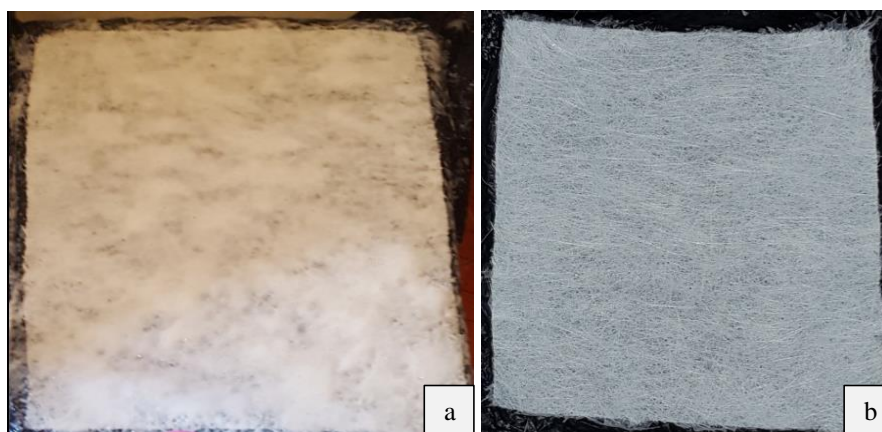
Fuente: (Merino, 2016)

- Transcurrido el tiempo de secado, se prepara la mezcla para la segunda capa según la dosificación de la Tabla 54. Para esta capa no se humedece la probeta sino directamente se realiza la aspersion del bórax y el polímero de goma en forma simultánea y de manera uniforme a una distancia de 60cm y se deja secar el tiempo establecido en la Tabla 53 según la condición climatológica.

Tabla 54*Dosificación final de la membrana*

Compuesto	Cantidad
Agua (ml)	500
Bórax (gr)	30
Agua (ml)	150
Polímero de goma (ml)	200

Fuente: (Merino, 2016)

**Figura 69.** a) Proceso de secado del refuerzo, b) Resultado final**5.2.1.1 Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico -bórax****Tabla 55***Módulo de elasticidad y desplazamiento máximo de la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax*

Muestra	Módulo elástico	Máximo desplazamiento
	N/mm ²	mm
M ₁ -Bórax	3091.12	1.200
M ₂ -Bórax	2868.05	0.761
M ₃ -Bórax	2709.53	0.644
Promedio módulo de elasticidad	2889.57	0.869

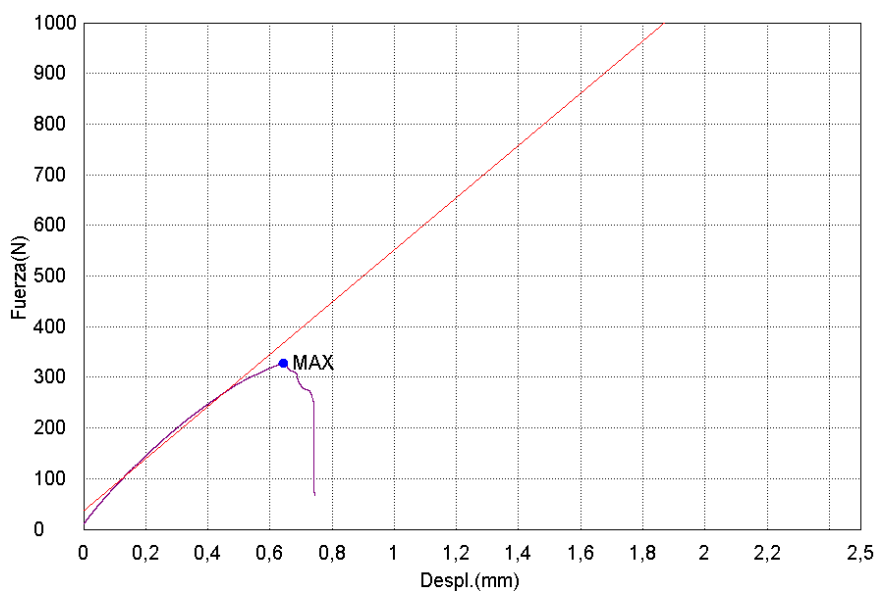


Figura 70. Fuerza – desplazamiento (fibra de vidrio con bórax)

5.2.2 Refuerzo de estera de fibra de vidrio con isopreno

Para la fabricación del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno se presenta los materiales y el procedimiento requerido.

a) Materiales y equipos

- Estera de fibra de vidrio (375 gr/m^2)
- Agua
- Isopreno
- Balanza de precisión
- Espátula



Figura 71. Materiales para la fabricación del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno

b) Procedimiento

- Para elaborar el polímero butadieno (isopreno) se mezcla el isopreno con agua según la siguiente dosificación: por cada 100 gramos de solución ,18 gr de isopreno.
- En la estera de fibra de vidrio se coloca la primera capa de polímero de forma uniforme mediante el uso de una espátula.



Figura 72. Colocación del isopreno en la estera de fibra de vidrio

- Debido a que el isopreno polimeriza al calor, se deja secar la primera capa en un lugar soleado por aproximadamente una hora, hasta cuando se observe que el polímero se ha secado completamente.

- Posteriormente se coloca la segunda capa de polímero de forma similar a la primera capa y se deja secar.



Figura 73. a) Proceso de secado del refuerzo, b) Resultado final

5.2.2.1 Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio con isopreno

Tabla 56

Módulo de elasticidad y desplazamiento máximo de la fibra de vidrio e isopreno

Muestra	Módulo Elástico	Máximo desplazamiento
	N/mm ²	mm
M ₁ -isopreno	1058.08	0.834
M ₂ - isopreno	878.057	0.475
M ₃ - isopreno	580.91	0.329
Promedio módulo de elasticidad	839.02	0.546

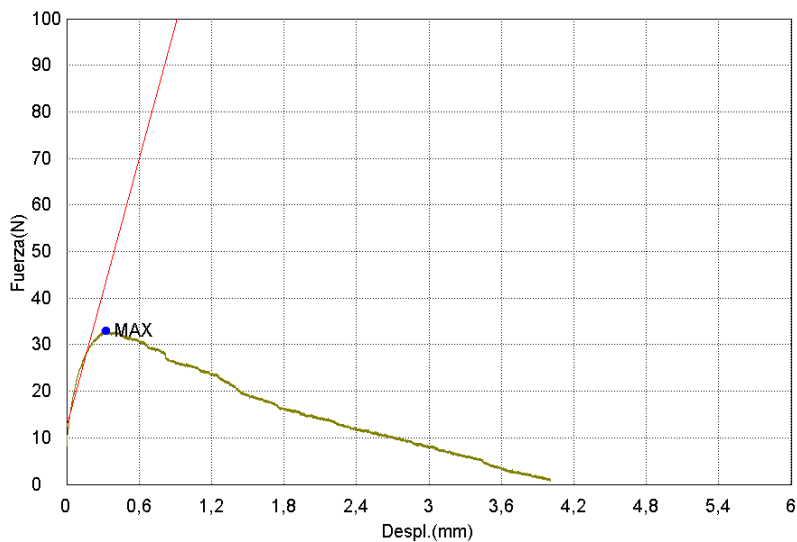


Figura 74. Fuerza – desplazamiento (fibra de vidrio e isopreno)

5.3 Curva de comportamiento de la mezcla asfáltica reforzada y posición óptima del refuerzo

5.3.1 Solicitaciones admisibles

En la Tabla 57 se presenta las solicitaciones admisibles de deformación radial a tracción en la base de la carpeta y deflexión en la superficie de la estructura.

Tabla 57
Solicitaciones admisibles

Capa	Criterio		Valor admisible
Asfáltica	Deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica	Ley de fatiga de la Shell	E_r adm (m/m) 2.785E-04
Estructura	Deflexión en la superficie	Fórmula de Huang	Δ_z adm (mm) 0.439

5.3.2 Solicitaciones de la carpeta asfáltica reforzada

En las Tabla 58 y Tabla 59 se presentan las características utilizadas en el modelamiento de la estructura del pavimento y la comparación de las solicitaciones calculadas con las admisibles para cada posición del refuerzo en la carpeta asfáltica.

Tabla 58
Características de las capas de la estructura del pavimento con refuerzo de la carpeta en distintas posiciones

Capa	Refuerzo geomalla de fibra de vidrio		
	Espesor (m)	Módulo de elasticidad (MPa)	Poisson
REFUERZO EN 1/6 h			
carpeta asfáltica	0.005	2.44E+03	0.35
refuerzo	0.002	6.66E+04	0.50
carpeta asfáltica	0.195	2.44E+03	0.35
base	0.150	2.07E+02	0.40
sub base	0.050	1.04E+02	0.40
subrasante		9.20E+01	0.50

Nota: h es el espesor de la carpeta asfáltica

→
CONTINÚA

REFUERZO EN 1/3 h

carpeta asfáltica	0.060	2.44E+03	0.35
refuerzo	0.002	6.66E+04	0.50
carpeta asfáltica	0.140	2.44E+03	0.35
base	0.150	2.07E+02	0.40
sub base	0.050	1.04E+02	0.40
subrasante		9.20E+01	0.50

REFUERZO EN 1/2 h

carpeta asfáltica	0.100	2.44E+03	0.35
refuerzo	0.002	6.66E+04	0.50
carpeta asfáltica	0.100	2.44E+03	0.35
base	0.150	2.07E+02	0.40
sub base	0.050	1.04E+02	0.40
subrasante		9.20E+01	0.50

REFUERZO EN 2/3 h

carpeta asfáltica	0.140	2.44E+03	0.35
refuerzo	0.002	6.66E+04	0.50
carpeta asfáltica	0.060	2.44E+03	0.35
base	0.150	2.07E+02	0.40
sub base	0.050	1.04E+02	0.40
subrasante		9.20E+01	0.50

REFUERZO EN LA BASE

carpeta asfáltica	0.200	2.44E+03	0.35
refuerzo	0.002	6.66E+04	0.50
base	0.150	2.07E+02	0.40
sub base	0.050	1.04E+02	0.40
subrasante		9.20E+01	0.50

Tabla 59*Solicitaciones en la carpeta asfáltica con refuerzo en diferentes posiciones*

Posición del refuerzo	Capa	Valor admisible	Malla de fibra de vidrio			
			Valor calculado	Valor calculado < Valor admisible	$\frac{\text{valor de servicio}}{\text{valor admisible}}$ (%)	
1/6 h	Asfáltica	Er adm	2.785E-04	1.471E-04	cumple	52.82
	Estructura	Δz adm (mm)	0.439	0.321	cumple	73.14
1/3 h	Asfáltica	Er adm	2.785E-04	1.632E-04	cumple	58.60
	Estructura	Δz adm (mm)	0.439	0.343	cumple	78.08
1/2 h	Asfáltica	Er adm	2.785E-04	1.595E-04	cumple	57.27
	Estructura	Δz adm (mm)	0.439	0.348	cumple	79.29
2/3 h	Asfáltica	Er adm	2.785E-04	1.433E-04	cumple	51.45
	Estructura	Δz adm (mm)	0.439	0.344	cumple	78.31
base	Asfáltica	Er adm	2.785E-04	8.218E-05	cumple	29.51
	Estructura	Δz adm (mm)	0.439	0.321	cumple	73.16

Nota: h es el espesor de la carpeta asfáltica

5.3.3 Ubicación del refuerzo y curva de comportamiento

Para determinar la posición óptima del refuerzo se analizó el porcentaje de deformación radial a tracción que se genera en la carpeta respecto al máximo que puede soportar la misma (deformación admisible). Este valor fue comparado con el porcentaje obtenido para una carpeta sin refuerzo, el menor valor de todos los analizados fue el que determinó la posición adecuada del refuerzo.

Tabla 60

Porcentaje de deformación radial a tracción de la carpeta respecto al admisible según la posición de refuerzo

Posición del refuerzo	Malla de fibra de vidrio	
	$\frac{\text{valor de servicio}}{\text{valor admisible}}$ (%)	Porcentaje de mejora respecto al sin refuerzo
Sin refuerzo	58.10	
0.03h	52.82	9.09
1/3h	58.60	-0.87
1/2h	57.27	1.42
2/3h	51.45	11.43
Base	29.51	49.21

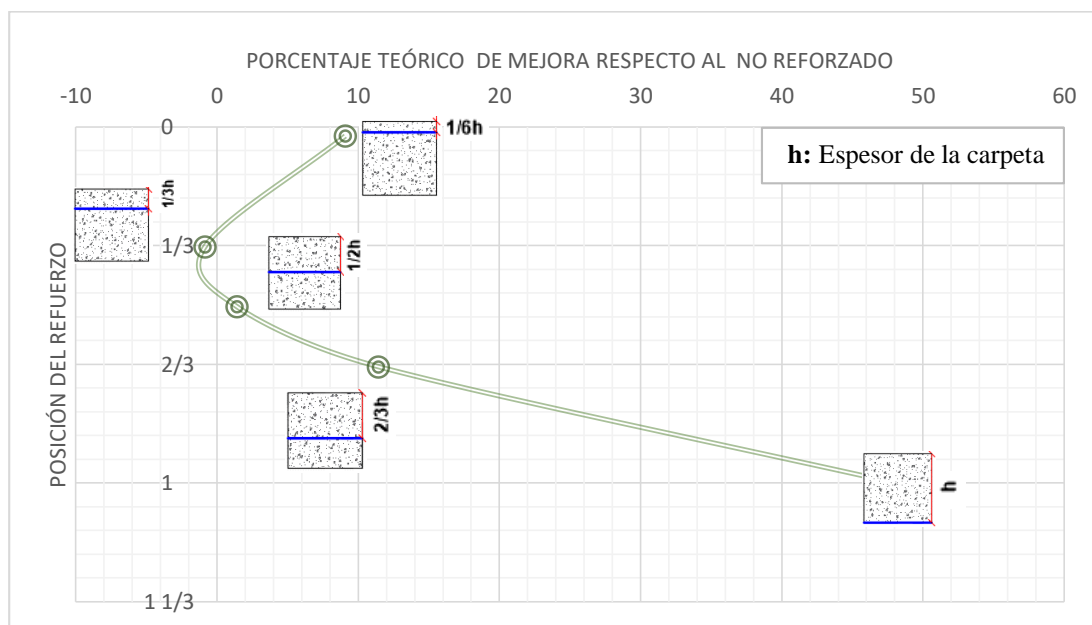


Figura 75. Curva teórica del comportamiento de la mezcla asfáltica con el refuerzo en varias posiciones

Después de analizar los valores de deformación de la carpeta asfáltica para cada posición se pudo observar que mientras la posición del refuerzo se va acercando a la base de la carpeta asfáltica existe menos porcentaje de deformación (mayor porcentaje de mejora respecto al no reforzado), por lo cual, la posición óptima del refuerzo se encuentra en la **base** de la carpeta. Ver Figura 75.

5.4 Ensayos mecánicos

Con la finalidad de comprobar de forma práctica el comportamiento obtenido teóricamente se realizaron ensayos Marshall y tracción indirecta. Para dichos ensayos se elaboraron probetas con refuerzo mediante la aplicación de la norma ASTM D 6927. Para el proceso de compactación de la mezcla se aplicó un número de golpes proporcional a la altura de la probeta a ser compactada sin sobrepasar el número de golpes establecidos en la norma (75 golpes para tráfico pesado). En la Figura 76 se presenta el proceso de elaboración de las probetas reforzadas.



Figura 76. Elaboración de probetas reforzadas



Figura 77. Probetas con refuerzo en la base

5.4.1 Estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad y flujo Marshall se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 6927 descrita en el capítulo II. Se realizaron probetas con el refuerzo en las siguientes posiciones 1/6h, 1/3h, 1/2h, 2/3h y base (siendo “h” el espesor de la probeta) para cada tipo de geosintético, obteniendo los siguientes resultados.

5.4.1.1 Geomalla de fibra de vidrio

Tabla 61

Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con geomalla de fibra de vidrio

Posición del refuerzo	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Mejora estabilidad respecto a sin refuerzo (%)	Aumento del flujo respecto a sin refuerzo (%)
sin refuerzo	3273.13	11.52		
1/6h	3370.0	11.67	2.96	1.27
1/3h	3158.1	13.33	-3.51	15.74
1/2h	3632.0	13.00	10.97	12.85
2/3h	3873.3	12.67	18.34	9.95
base	4265.3	12.33	30.31	7.06

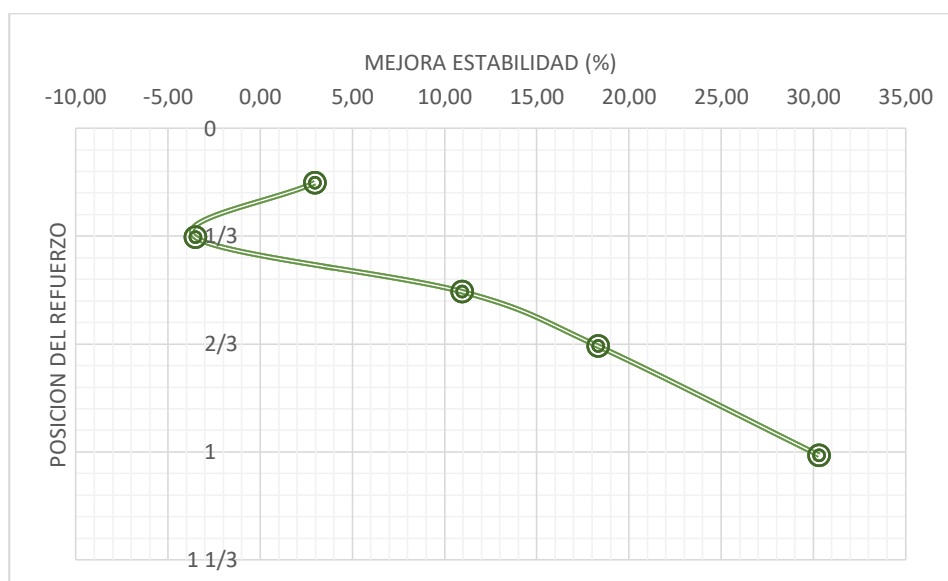


Figura 78. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de geomalla de fibra de vidrio respecto de la no reforzada

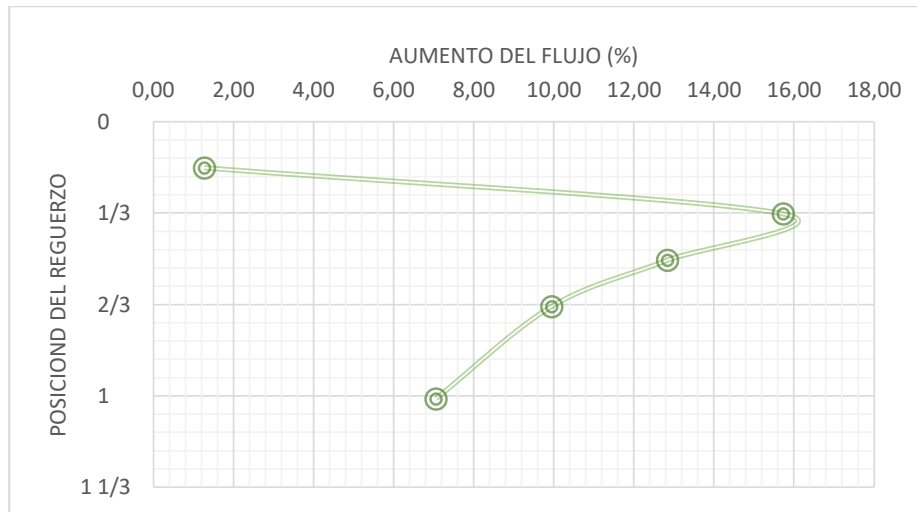


Figura 79. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de geomalla de fibra de vidrio respecto de la no reforzada

5.4.1.2 Geotextil no tejido

Tabla 62

Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con geotextil no tejido

Posición del refuerzo	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Mejora estabilidad respecto a sin refuerzo (%)	Aumento del flujo respecto a sin refuerzo (%)
sin refuerzo	3273.13	11.52		
1/6h	3360.2	12.67	2.66	9.98
1/3h	3319.8	13.67	1.43	18.63
1/2h	3415.5	13.00	4.35	12.85
2/3h	3645.0	12.33	11.36	7.06
base	3874.6	12.00	18.37	4.17

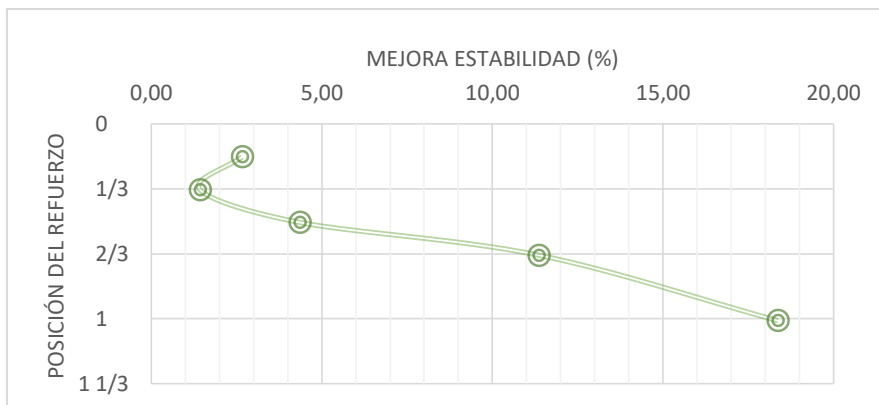


Figura 80. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de geotextil no tejido respecto de la no reforzada

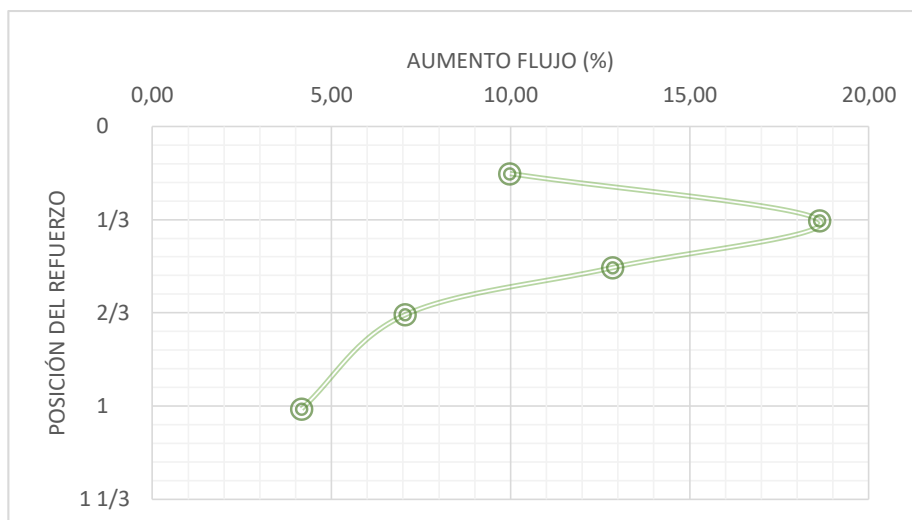


Figura 81. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de geotextil no tejido respecto de la no reforzada

5.4.1.3 Estera de fibra de vidrio y Anhídrido polivinílico - bórax

Tabla 63

Resultados de estabilidad y flujo para probetas reforzadas con fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax

Posición del refuerzo	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Mejora estabilidad respecto a sin refuerzo (%)	Aumento del flujo respecto a sin refuerzo (%)
sin refuerzo	3273.13	11.52		
1/6h	3356.8	11.67	2.56	1.30
1/3h	3309.0	12.67	1.10	9.95
1/2h	3387.1	12.33	3.48	7.06
base	3870.7	12.00	18.26	4.17

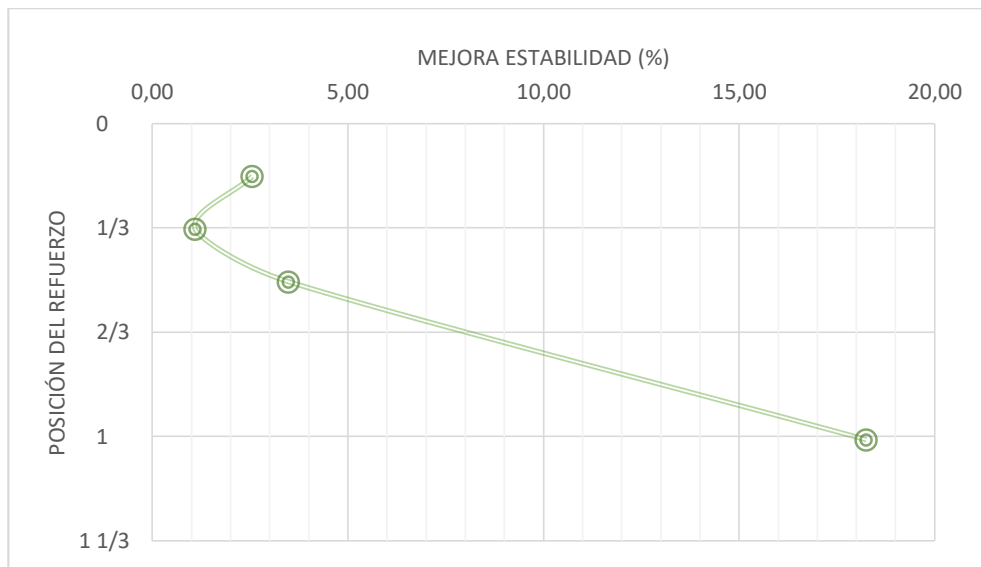


Figura 82. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con bórax respecto a la no reforzada

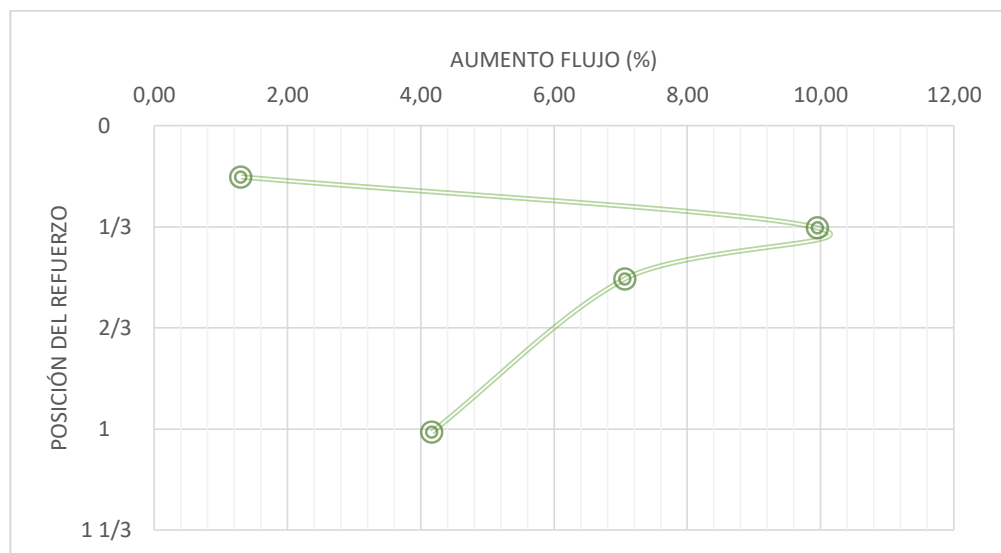


Figura 83. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con bórax respecto a la no reforzada

5.4.1.4 Estera de fibra de vidrio con isopreno

Tabla 64

Resultados de estabilidad y flujo para probetas con refuerzo de fibra de vidrio con isopreno

Posición del refuerzo	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Mejora estabilidad respecto a sin refuerzo (%)	Aumento del flujo respecto a sin refuerzo (%)
sin refuerzo	3273.13	11.52		
1/6h	3495.20	12.00	6.78	4.17
1/3h	3461.33	13.00	5.75	12.85
1/2h	3715.32	13.33	13.51	15.74
Base	4069.39	12.67	24.33	9.95

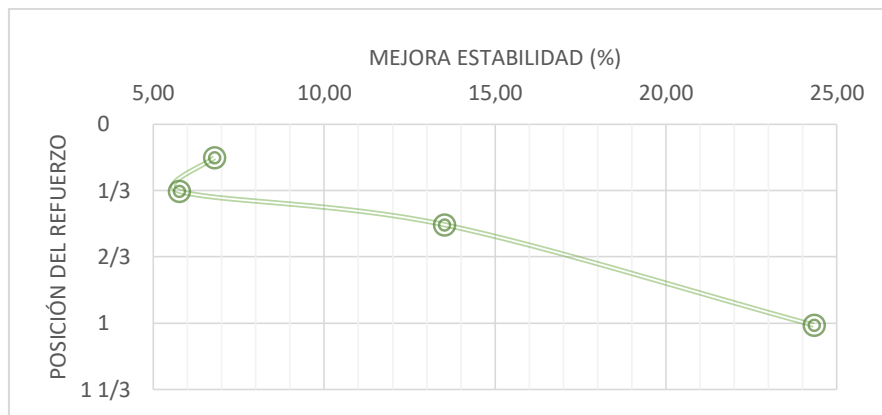


Figura 84. Porcentaje de mejora de la estabilidad según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno respecto de la no reforzada

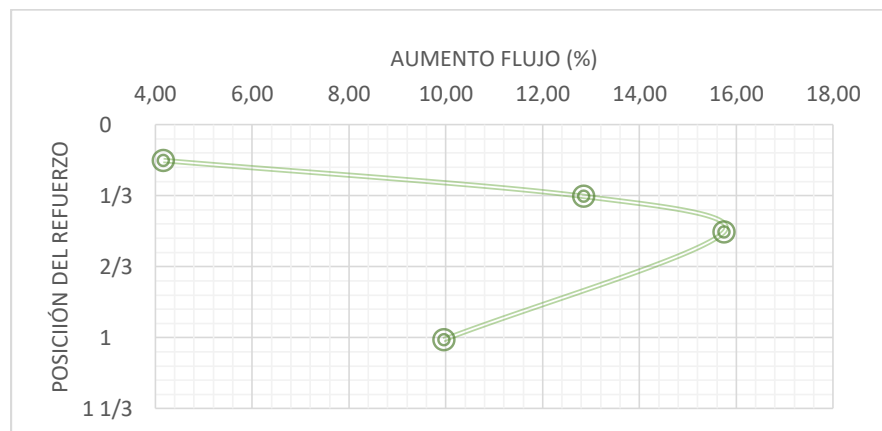


Figura 85. Porcentaje de aumento del flujo según la posición del refuerzo de fibra de vidrio con isopreno respecto de la no reforzada

5.4.1.5 Resumen de resultados estabilidad y flujo

Tabla 65

Resumen de resultados de estabilidad y flujo en la base de la carpeta

Tipo de fibra	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Mejora Estabilidad respecto al sin refuerzo (%)	Aumento flujo respecto al sin refuerzo (%)
Sin refuerzo	3273.13	11.52		
Malla fibra de vidrio	4265.28	12.33	30.31	7.06
G. no tejido	3874.55	12.00	18.37	4.17
Fibra de vidrio con bórax	3870.70	12.00	18.26	4.17
Fibra de vidrio con isopreno	4069.39	12.67	24.33	9.95

Mediante el análisis de las gráficas de estabilidad Marshall obtenidas para las muestras reforzadas se pudo observar que mientras más cerca a la base se coloque el refuerzo existe un porcentaje mayor de mejora de la estabilidad respecto a las muestras no reforzadas. Las tendencias de las curvas obtenidas permiten comprobar la hipótesis del comportamiento de la mezcla obtenida de forma teórica; y la posición más adecuada para la colocación del refuerzo.

Por otra parte, en la gráfica del flujo Marshall se pudo observar un aumento en los valores respecto al no reforzado sin sobrepasar el máximo superior establecido en la norma que son 14 mm, lo que significa que el refuerzo le brinda a la mezcla mayor flexibilidad, soportando así mayores deformaciones antes de la falla.

5.4.2 Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta permite reproducir el estado de tensiones que se generan en la fibra inferior de la carpeta asfáltica (zona de tracción). Es un método que permite evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción. El ensayo da información sobre propiedades elásticas resilientes, fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y permite evaluar el efecto de la humedad en las mezclas bituminosas.

El ensayo se aplicó a probetas reforzadas con los diferentes geosintéticos colocados en la base de las mismas utilizando la normativa NTL- 346/90. El principio del método consiste en imponer

una deformación por compresión diametral a la probeta de forma que los esfuerzos aplicados a la misma sean sobre dos generatrices opuestas. El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta y el desplazamiento vertical.

Para la ejecución del ensayo se tomó las medidas geométricas de las probetas y se introdujo las mismas en agua a 25°C por 6 horas. Pasado el tiempo de acondicionamiento térmico se procede con el ensayo; la carga se aplicó manteniendo una velocidad de deformación de 0.85 ± 0.02 mm hasta que se rompa. El tiempo transcurrido desde que la probeta se retira del agua hasta que se produce la rotura no debe exceder 30 segundos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos y la ilustración del procedimiento:



Figura 86. Proceso del ensayo: tracción indirecta

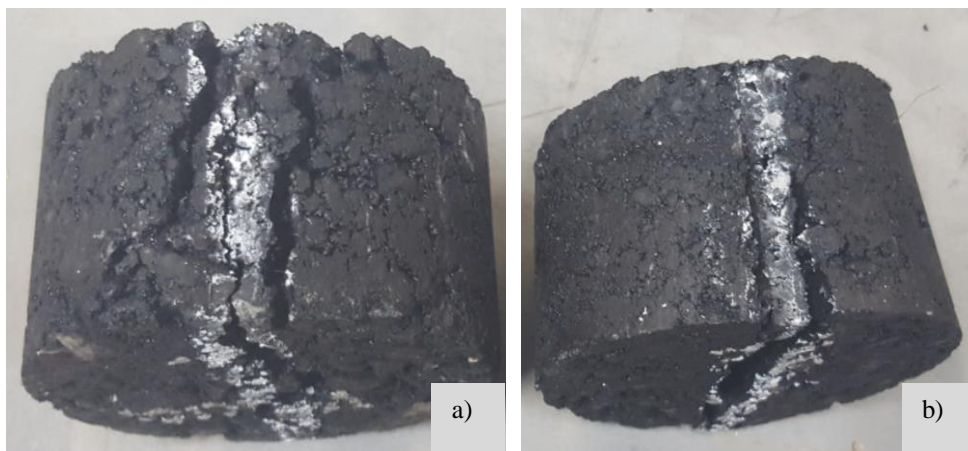
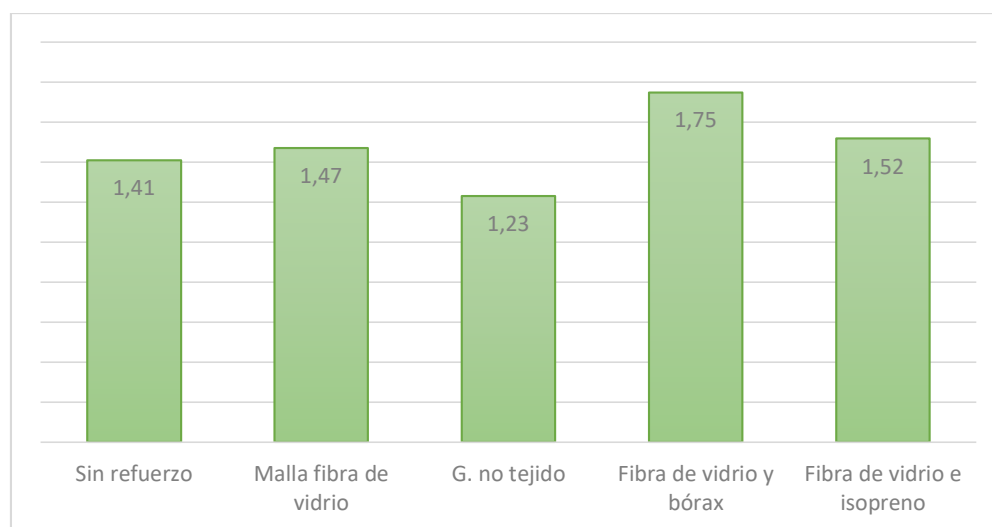


Figura 87. a) Probeta ensayada sin refuerzo,
b) Probeta ensayada con refuerzo

Tabla 66*Resultados - ensayo de tracción indirecta*

Tipo de fibra	Altura promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga máxima de rotura (Kg)	Resistencia a la compresión diametral (Kg/cm ²)	Deformación vertical (%)
				$R_{\tau} = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d}$	
	(h)	(d)	(P)		
Sin refuerzo	6.32	10.11	487.75	4.863	1.41
Malla fibra de vidrio	6.53	10.12	595.48	5.736	1.47
G. no tejido	6.42	10.11	601.67	5.899	1.23
Fibra de vidrio con bórax	6.46	10.12	621.45	6.057	1.75
Fibra de vidrio con isopreno	6.38	10.12	747.29	7.368	1.52

**Figura 88.** Porcentaje de deformación vertical

La deformación medida con el ensayo de tracción indirecta permitió determinar el potencial de agrietamiento de la mezcla. La mezcla asfáltica que admite mayor deformación antes de alcanzar la falla resiste mejor los agrietamientos. Así, la colocación del refuerzo en la carpeta asfáltica le permite soportar mayores deformaciones antes de alcanzar la falla comparado con la mezcla asfáltica no reforzada, siendo el refuerzo de fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax la que presenta mayor de deformación vertical (1.75), teniendo un 24% de deformación más que la mezcla asfáltica no reforzada.

5.5 Desempeño de la carpeta asfáltica reforzada

Para definir la mejora que genera la inclusión del refuerzo en la mezcla asfáltica se analizó la optimización del espesor de la carpeta, el aumento del número de ejes equivalentes y los años de vida útil del pavimento.

Para la determinación del espesor de la capa asfáltica se aplicó un retro cálculo en el método de diseño AASHTO 93, teniendo como dato el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica reforzada, mismo que fue calculado mediante los datos obtenidos en el ensayo de flujo y estabilidad Marshall, generando un valor de a_1 .

Por otra parte, para el cálculo de los años de vida útil y número de ejes equivalentes se utilizó el método racional. Los parámetros analizados son la deformación radial a tracción en la base de la carpeta y la deflexión vertical en la superficie de la estructura. La deflexión vertical es el parámetro que presenta el mayor porcentaje de daño respecto al admisible. Por lo tanto, fue este parámetro el que se utilizó para determinar el valor de ejes equivalentes necesarios para causar el mismo porcentaje de daño esperado en una carpeta asfáltica sin refuerzo.

Se utilizaron los nuevos valores de módulo de elasticidad de la mezcla reforzada y el espesor de la carpeta sin refuerzo para el modelamiento del pavimento en el programa Bisar 3.0.

A continuación se presenta los resultados obtenidos en el análisis

Tabla 67
Espesor de la carpeta asfáltica según el refuerzo colocado

Tipo de fibra	Método AASHTO 93			
	Módulo de elasticidad mezcla asfáltica (Ec. 32) (Psi)	a_1	Espesor carpeta	
			plg	cm
Sin refuerzo	353000	0.400	8.0	20
Malla de fibra de vidrio	430000	0.434	7.4	18.76
G. no tejido	401000	0.421	7.6	19.34
Fibra de vidrio con bórax	400659	0.420	7.6	19.39
fibra de vidrio con isopreno	399000	0.418	7.7	19.48

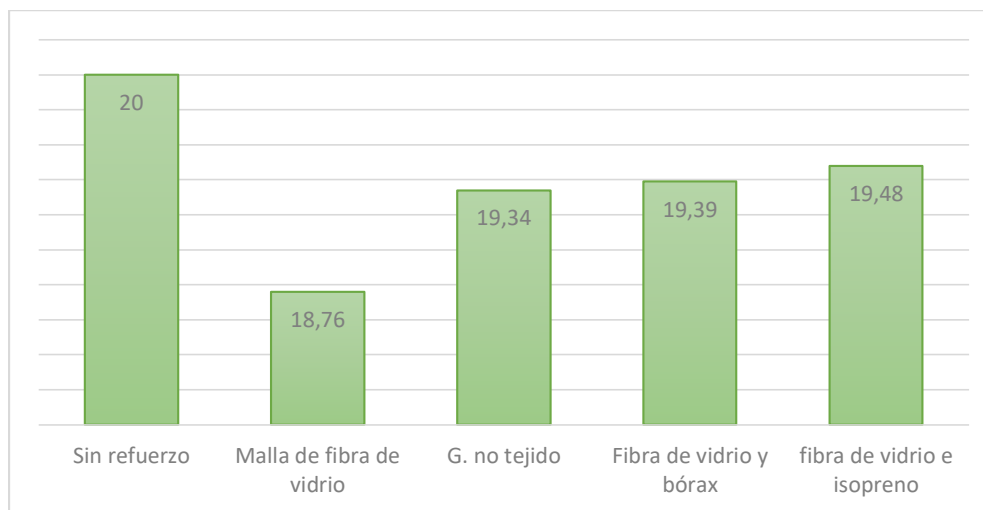


Figura 89. Espesor de la carpeta asfáltica según el refuerzo colocado, (cm)

El espesor de la carpeta calculado para una mezcla asfáltica sin refuerzo es de 20cm pero, según el tipo de fibra utilizada como refuerzo se obtiene una optimización en el espesor así: la mezcla reforzada con malla de fibra de vidrio tiene un espesor de carpeta de 18,76cm lo que representa una disminución en el espesor del 7.83% con respecto a la no reforzada ($0.63\text{plg} = 1.59\text{ cm}$), la mezcla asfáltica reforzada con geotextil no tejido tiene un espesor de carpeta de 19.34cm que representa una disminución en el espesor del 4.99% ($0.40\text{plg} = 1.02\text{cm}$), mezcla asfáltica reforzada con fibra de vidrio con anhídrido polivinilico - bórax tiene un espesor de carpeta 19.39cm que representa una disminución en el espesor del 4.76% ($0.38\text{plg} = 0.97\text{ cm}$) y fibra de vidrio con isopreno tiene un espesor de carpeta de 19.48cm que representa una disminución en el espesor del 4.31% ($0.35\text{plg} = 0.88\text{cm}$).

Tabla 68

Resultados - aumento del número de ejes equivalentes y tiempo de vida útil de carpeta reforzada

Método Racional (carpeta espesor 20 cm)							Tiempo de vida útil (años)
Tipo de fibra	Capa	Parámetro	Valor admisible	Valor calculado	$\frac{\text{valor de servicio}}{\text{valor admisible}}, (\%)$	W18	
Sin refuerzo	Asfáltica	E_r	2.785E-04	1.618E-04	58.10	1.96E+07	10
	Subrasante	E_z	3.154E-04	2.828E-04	89.65		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.529	0.334	63.11		
Estructura	Δz (mm)	0.439	0.351	80.09			
Malla de fibra de vidrio	Asfáltica	E_r	2.484E-04	1.439E-04	57.93	2.44E+07	12.2
	Subrasante	E_z	2.988E-04	2.591E-04	86.72		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.504	0.310	61.60		
Estructura	Δz (mm)	0.416	0.333	80.09			
Geotextil no tejido	Asfáltica	E_r	2.587E-04	1.501E-04	58.03	2.26E+07	11.4
	Subrasante	E_z	3.046E-04	2.674E-04	87.79		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.513	0.319	62.16		
Estructura	Δz (mm)	0.424	0.340	80.09			
Fibra de vidrio con bórax	Asfáltica	E_r	2.587E-04	1.501E-04	58.01	2.26E+07	11.4
	Subrasante	E_z	3.046E-04	2.674E-04	87.79		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.513	0.319	62.16		
Estructura	Δz (mm)	0.424	0.340	80.09			
Fibra de vidrio con isopreno	Asfáltica	E_r	2.593E-04	1.504E-04	58.00	2.25E+07	11.3
	Subrasante	E_z	3.049E-04	2.679E-04	87.88		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.513	0.319	62.19		
Estructura	Δz (mm)	0.424	0.340	80.09			

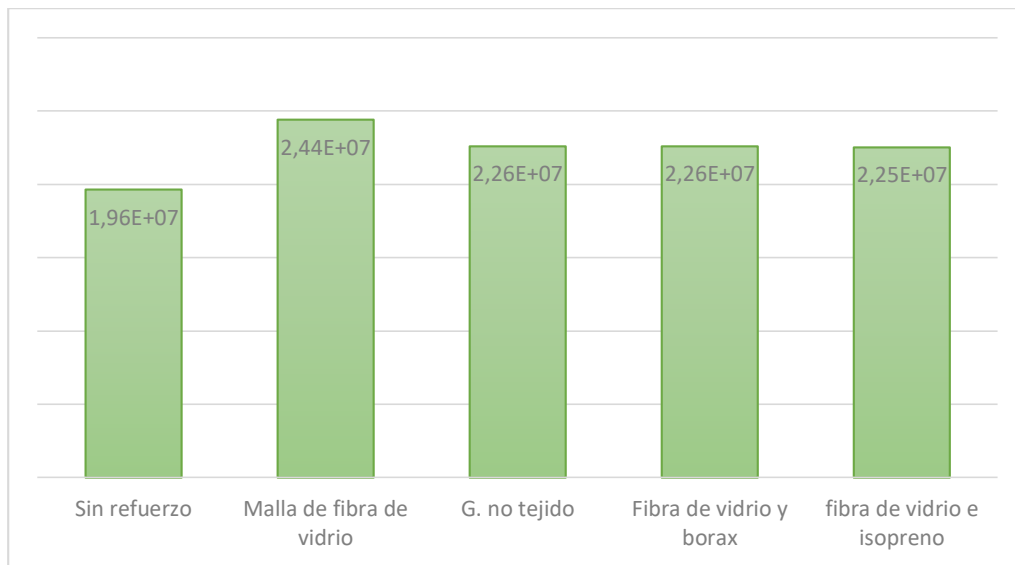


Figura 90. Número de ejes equivalentes según el refuerzo colocado en la carpeta asfáltica

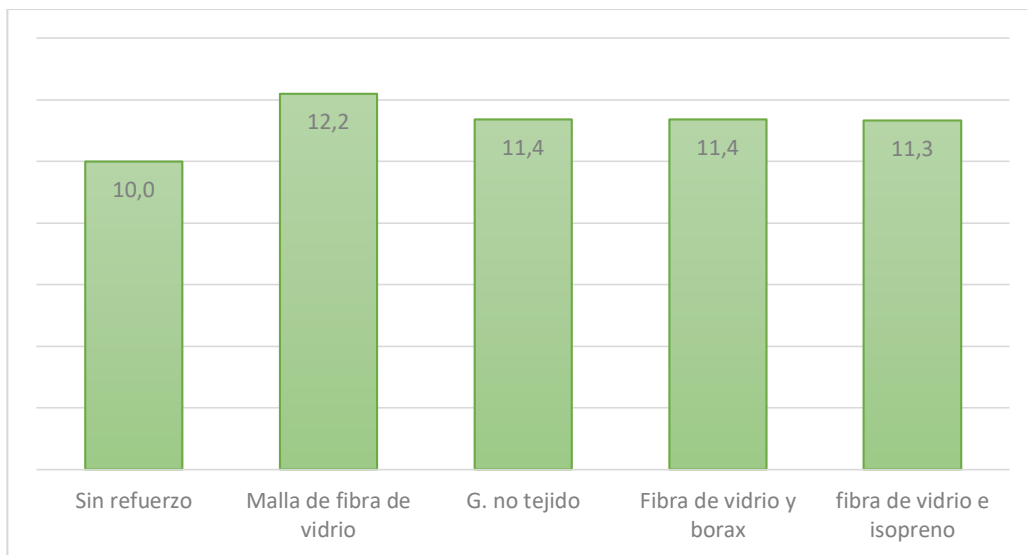


Figura 91. Vida útil del pavimento según el refuerzo de la carpeta asfáltica, (años)

La mezcla asfáltica sin refuerzo fue diseñada para un tiempo de vida útil de 10 años y según el tipo de refuerzo colocado en la mezcla se observa un incremento en este valor teniendo: mezcla reforzada con malla de fibra de vidrio genera un aumento de 2.2 años de vida útil respecto a la no reforzada, mezcla reforzada con geotextil no tejido y fibra de vidrio con anhídrido polivinilico - bórax generan un aumento de 1.4 años de vida útil y mezcla reforzada con fibra de vidrio e isopreno genera un aumento de 1.3 años de vida útil.

CAPITULO VI

CASO DE APLICACIÓN: ANÁLISIS DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA AV. GENERAL RUMIÑAHUI, TRAMO ESPE - EL COLIBRÍ

6.1 Introducción

Se estudió el caso de la carpeta asfáltica de la Av. General Rumiñahui tramo ESPE – EL Colibrí. Para esto, fue necesario analizar las condiciones actuales de la vía tanto en la superficie de rodadura como estructurales: altura de la carpeta y parámetros mecánicos de la misma. Se realizó entonces una inspección y catálogo visual de las fallas, luego se extrajeron núcleos testigos de la capa de rodadura. Estos núcleos permitieron conocer la altura de la carpeta y los trabajos de mejoramiento previos. Los mismos luego fueron llevados al laboratorio donde se los ensayó para conocer la naturaleza y granulometría de los áridos que lo conforman, el porcentaje de asfalto y mediante el ensayo Marshall sus condiciones mecánicas. El resultado de los análisis permitió diseñar el refuerzo del pavimento.

6.2 Descripción del tramo ESPE – El Colibrí

La vía analizada comprende un tramo de la avenida General Rumiñahui entre la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el redondel del Colibrí, siendo la abscisa inicial 0+000 y la final 2+132 respectivamente (ver Figura 92).

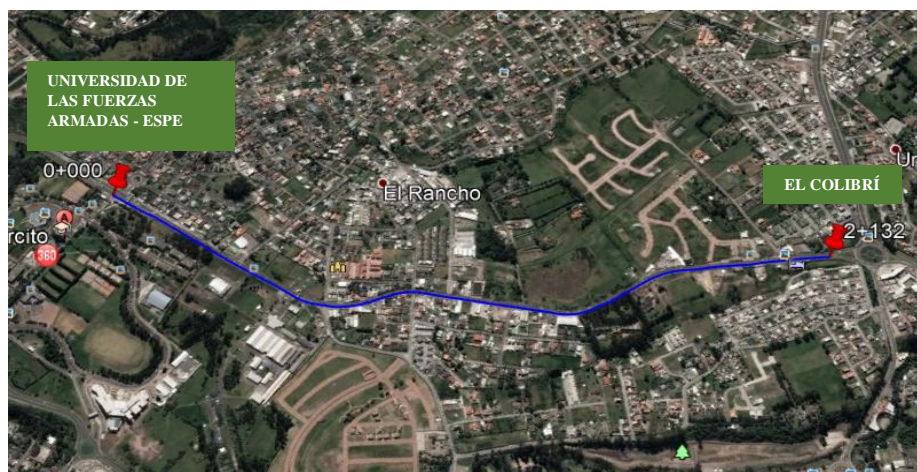


Figura 92. Tramo ESPE – EL Colibrí

6.2.1 Entorno

El tramo ESPE – El Colibrí atraviesa un terreno de características onduladas y a pesar de esto, la vía como tal no presenta irregularidades consistentes con la morfología del terreno. Esto se puede observar en el sector del colibrí donde la vía tiene una cota mayor que la de las construcciones aledañas. Esto implica que en determinados sectores se debieron conformar terraplenes para nivelar la vía.

El suelo sobre el cual está implantada la vía tiene características limo arenosas cuya permeabilidad es medianamente alta, por lo que los tiempos de infiltración del agua lluvia son bajos. Los terrenos aledaños a la vía presentan nivel freático.

A lo largo de la vía, especialmente en las cotas más bajas, existen puntos propensos a la acumulación de agua en periodo de lluvias intensas, pero las mismas drenan con facilidad debido a las características del suelo natural y posiblemente por la existencia subdrenes en la subrasante.

Es claro que las fallas existentes en la vía analizada no son ocasionadas por la morfología de la vía, la pluviosidad de la zona o el tipo de suelo sobre el cual está asentada sino por el tráfico al cual presta servicio. Esto se puede observar en las fallas encontradas en la vía tales como el ahuellamiento en los sectores de llegada y salida de las paradas y en los testigos extraídos de la vía, los cuales presentan fisuras que se originan desde la parte superior de la carpeta, por lo que la base y subbase del pavimento así como la subrasante se encuentran en condiciones de trabajo.

6.3 Extracción de testigos

A lo largo del tramo ESPE – El Colibrí se extrajeron diez testigos, la posición de cada uno se encuentra descrita en la Tabla 69. La extracción se realizó según lo establecido en la norma INV E-758.

Tabla 69*Ubicación de los testigos extraídos***TRAMO:** ESPE - EL COLIBRÍ**FECHA DE EXTRACCIÓN:** 12/11/2017 **NÚMERO DE TESTIGOS EXTRAÍDOS:** 10

No.	Abscisa	No.	Abscisa
P1	0+000	P6	0+407
P2	0+060	P7	1+260
P3	0+232	P8	1+605
P4	0+277	P9	1+796
P5	0+402	P10	1+927

**Figura 93.** Extracción de núcleos del tramo ESPE – El Colibrí**Figura 94.** Testigos extraídos del tramo ESPE – El Colibrí**6.4 Análisis de las probetas extraídas**

En los núcleos extraídos se puede observar que el tramo analizado ha tenido una intervención, por lo que en la actualidad la carpeta asfáltica está compuesta por dos capas. La capa inferior tiene un espesor promedio de 8 cm, compuesta por una mezcla elaborada con material pétreo de origen

volcánico (color rojizo), mientras que la capa superior posee un espesor promedio de 6 cm y el material pétreo que la compone es de origen aluvial (color plomizo) (ver Figura 95).



Figura 95. Capas de la carpeta asfáltica

Posteriormente se fotografió los núcleos en escala de grises con la finalidad de visualizar de mejor manera las fallas. En los núcleos se puede observar que las fallas tienen origen en la superficie irradiándose hacia la parte inferior, presentándose daños únicamente en la capa superior de la carpeta asfáltica. Por lo tanto, el daño que se presenta en el pavimento del tramo analizado no es por falla estructural de las capas inferiores sino por fatiga de la capa asfáltica ocasionada por el tránsito existente.

A continuación se presentan las fotografías de los núcleos.

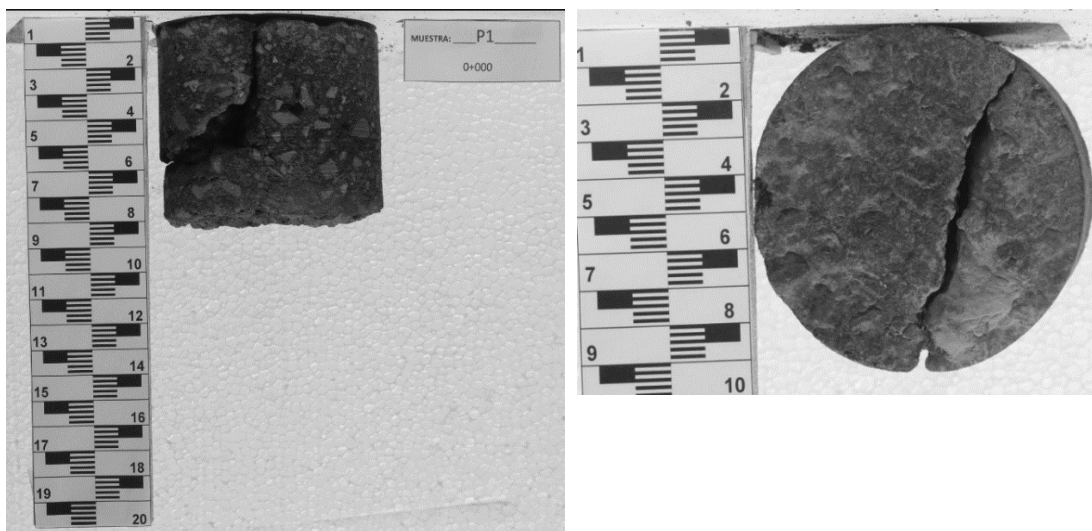


Figura 96. Testigo P₁

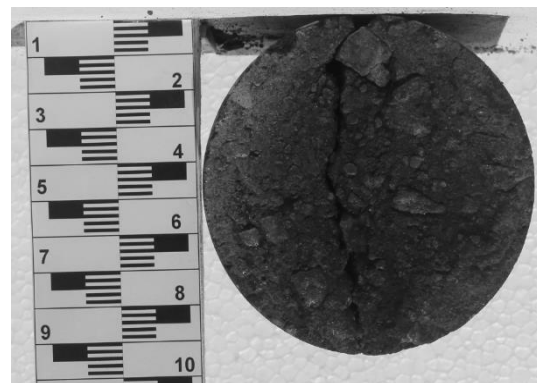
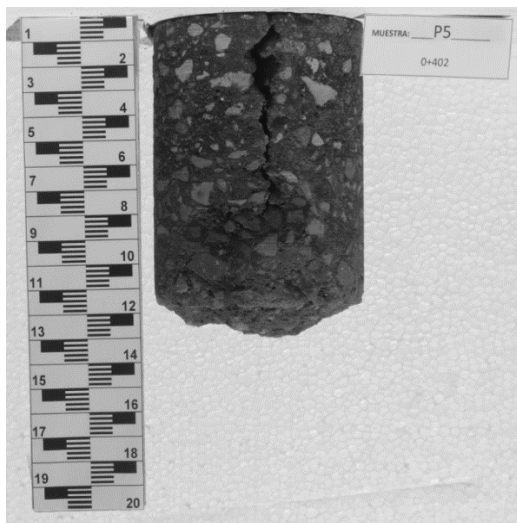
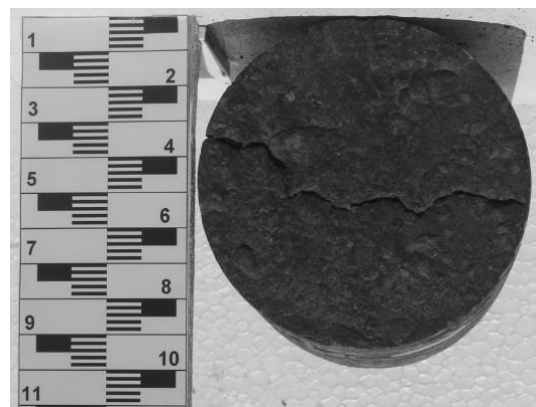
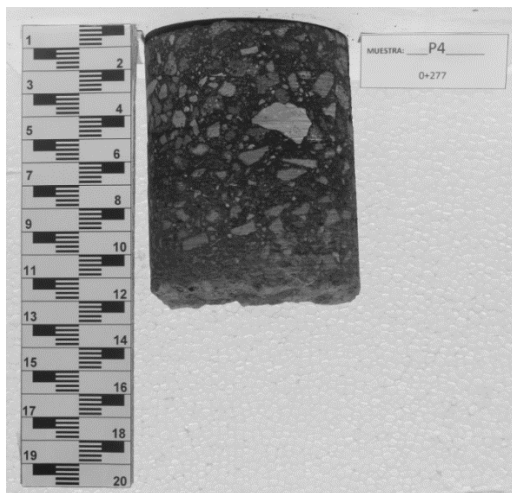
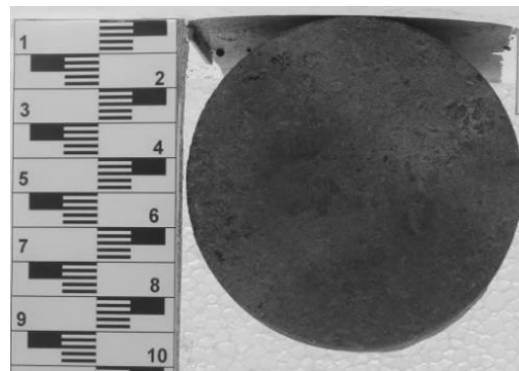
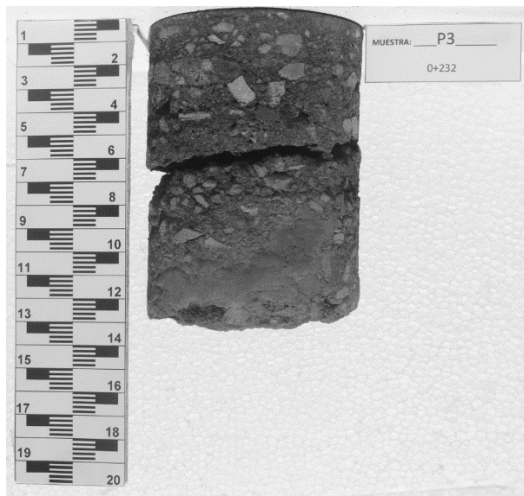


Figura 97. Testigo del P₃ al P₅

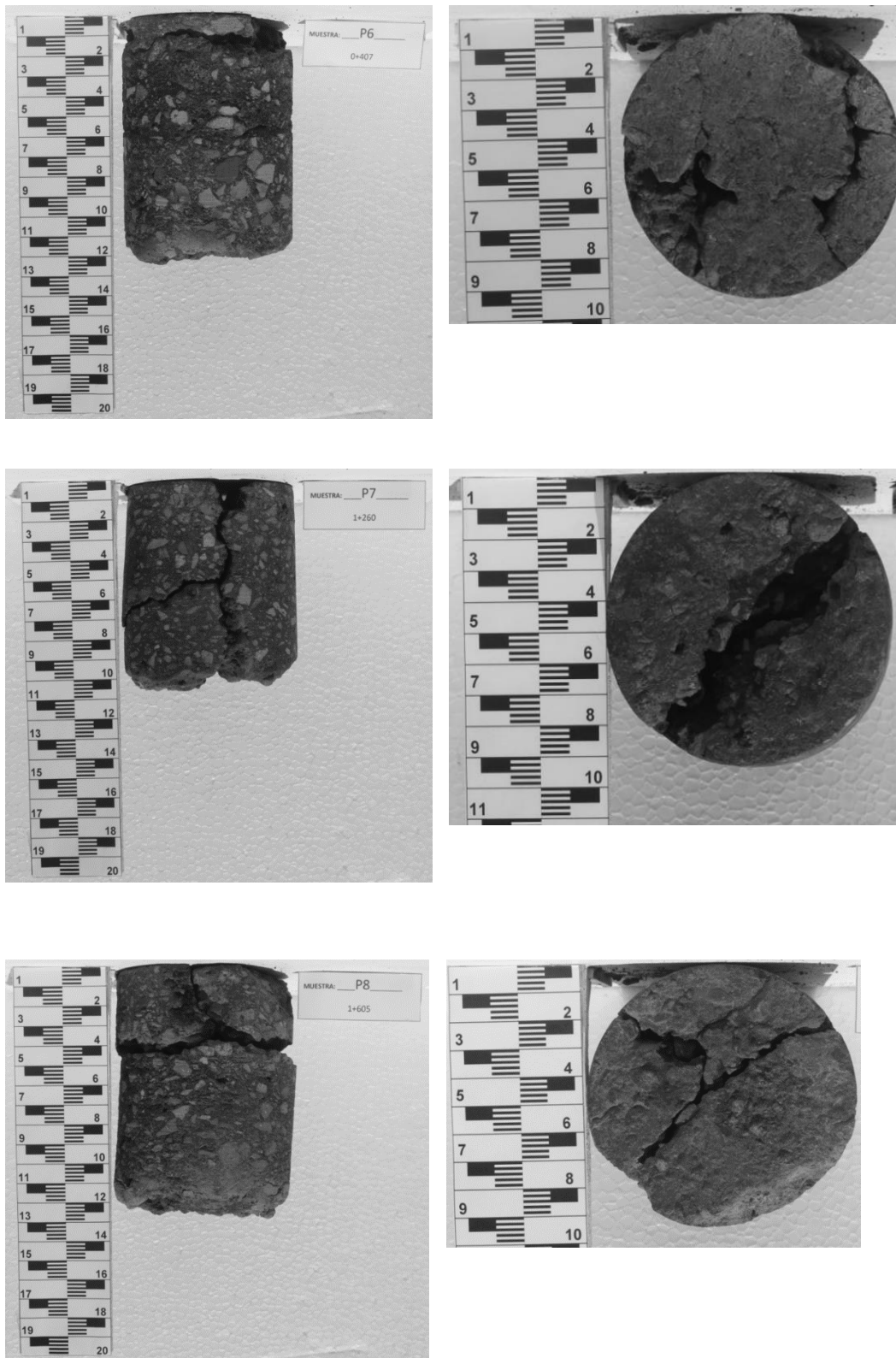


Figura 98. Testigo del P₆ al P₈

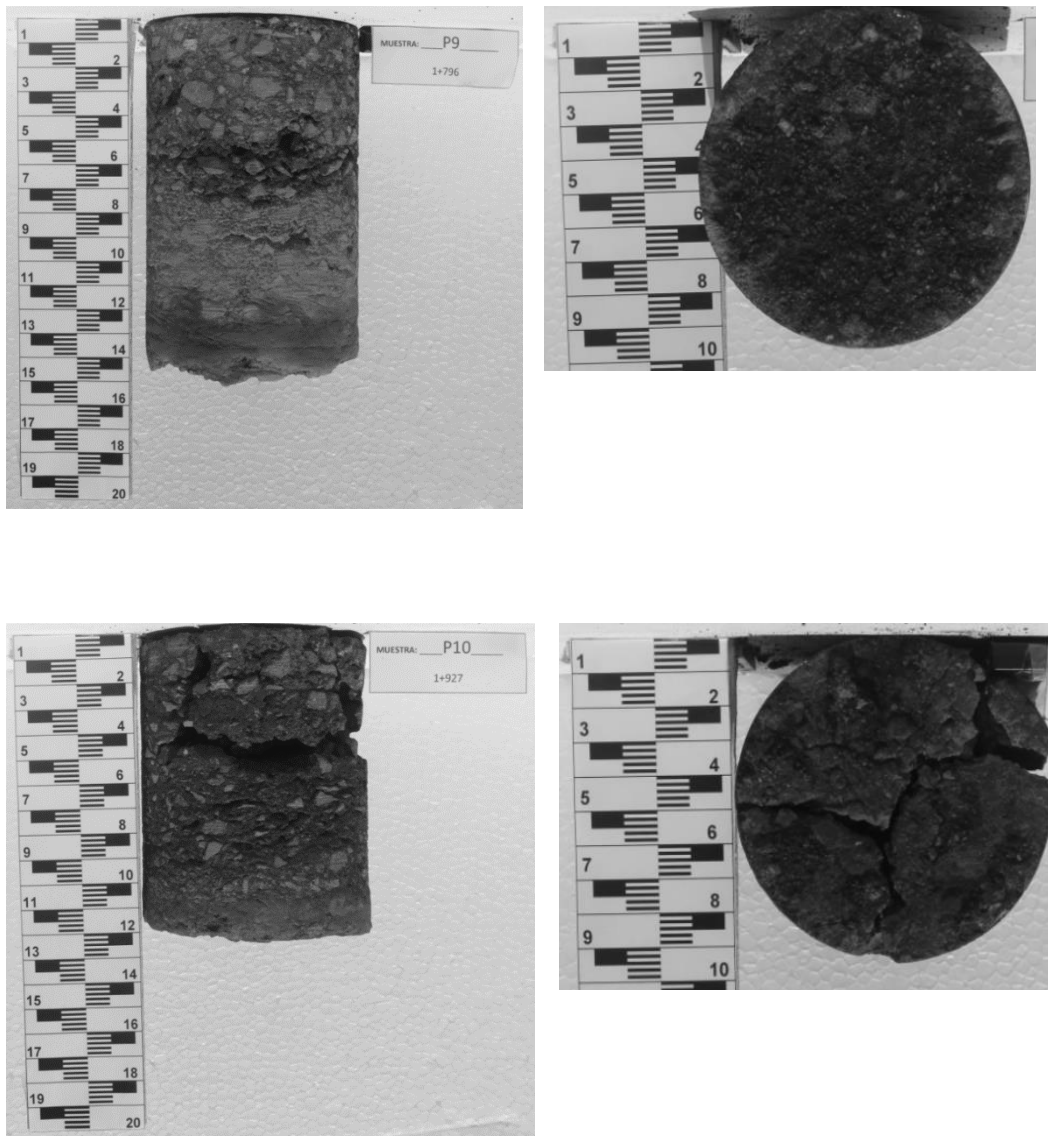


Figura 99. Testigo P₉ y P₁₀

6.4.1 Ensayo de peladura

El ensayo de peladura se realizó mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D 3625 a los núcleos P₁, P₃, P₇, P₁₀ extraídos del tramo ESPE – El Colibrí. Posterior al ensayo se comparó la mezcla inicial con la mezcla ensayada, determinando que los testigos presentan un porcentaje inferior al 95% de desprendimiento de asfalto del agregado.



Figura 100. Procedimiento del ensayo de peladura a testigos de la vía ESPE – El Colibrí

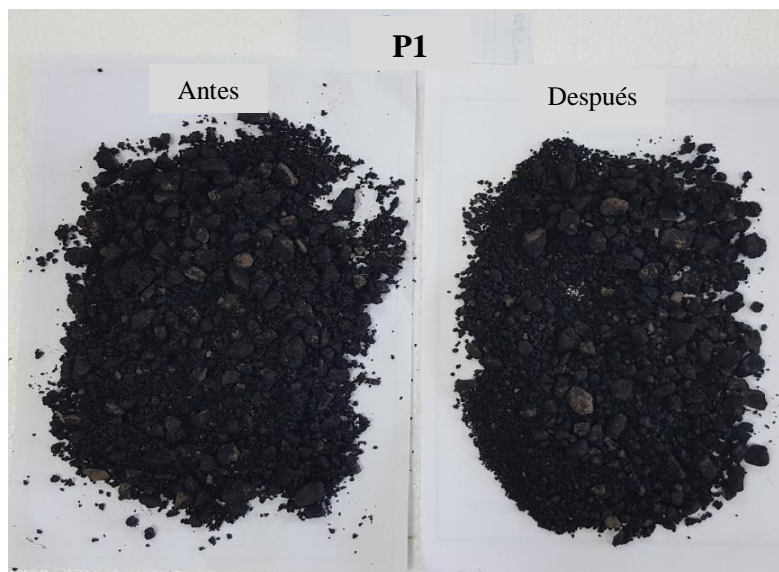


Figura 101. Resultado del ensayo realizado al testigo P₁

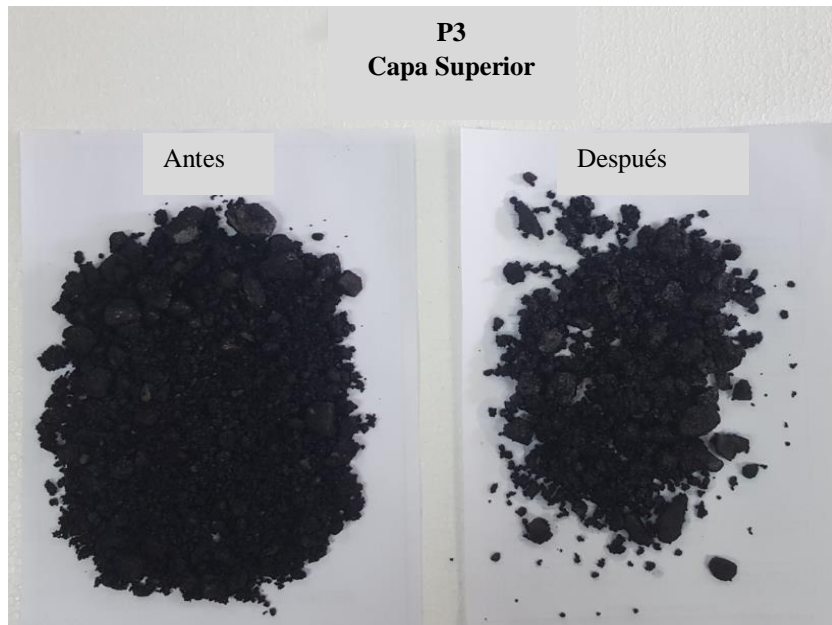


Figura 102. Resultado del ensayo realizado al testigo P₃

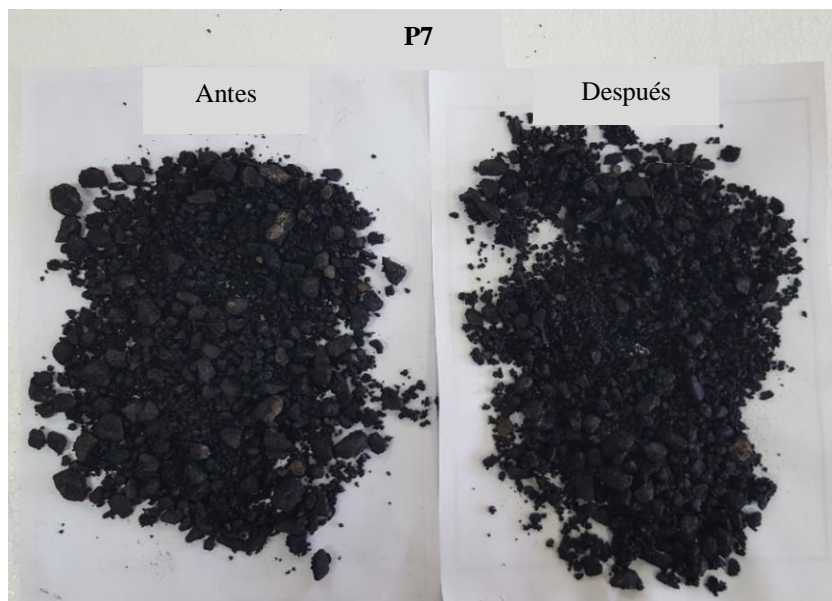


Figura 103. Resultado del ensayo realizado al testigo P₇

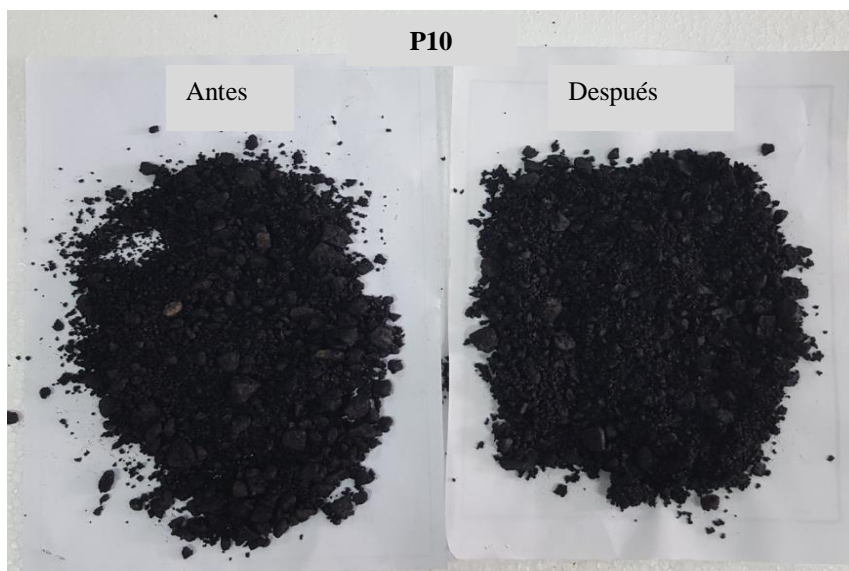


Figura 104. Resultado del ensayo realizado al testigo P₁₀

6.4.2 Estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad y flujo Marshall se realizó según el procedimiento de la norma ASTM D 6927 a los testigos P₄ (capa superior, inferior), P₉ (capa superior e inferior) del tramo ESPE – El Colibrí, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 70.



Figura 105. Procedimiento ensayo Estabilidad y flujo a los testigos P₄ y P₉

Tabla 70

Resultados de estabilidad y flujo de los testigos P₄ y P₉

Testigo	Altura briqueta (mm)	Estabilidad (Kg)	Estabilidad (lb)	Corrección	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (mm)
Capa Superior						
P4	51.7	462.7	1017.94	1.425	1450.56	22
P9	47.4	700.8	1541.76	1.686	2599.41	21
Promedio					2024.99	21.50
Capa Inferior						
P4	49.7	550.5	1211.1	1.532	1855.41	31
P9	48.2	229.8	505.56	1.629	823.56	24
Promedio					1339.48	27.50

6.4.3 Extracción cuantitativa de asfalto para pavimentos

La norma ASTM D 2172 permite determinar el contenido de asfalto en una mezcla asfáltica en caliente o en muestras de asfalto. Este análisis se utilizó para determinar la granulometría y el contenido de asfalto de la mezcla.

Para realizar el ensayo es necesario preparar la mezcla, disgregando y cuarteando la misma hasta obtener el peso necesario. Posteriormente se cubre la muestra con gasolina por un tiempo máximo de 1 hora para que el solvente desintegre la porción de ensayo.



Figura 106. Preparación de la muestra – ensayo de extracción

Con la muestra preparada se procede con el ensayo, para lo cual se coloca la muestra con el solvente en la taza del aparato de extracción y se coloca el anillo filtrante, mismo que debe estar previamente seco y pesado, adicionalmente se coloca un recipiente en el desagüe para recoger el

extracto. Se inicia la centrifugación con una velocidad máxima de 3600 rpm hasta que deje fluir el solvente. Este procedimiento se realiza hasta que el extracto tenga un color ligero de paja, para lo cual, se adiciona cantidades de solvente según sea necesario (no menos de tres).



Figura 107. Procedimiento – ensayo de extracción



Figura 108. Resultado – ensayo extracción
(izq. Agregado capa inferior, der. Agregado capa superior)

6.4.3.1 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto se calculó para los siguientes testigos: P₂ capa superior, P₅ superior, P₅ capa inferior, P₈ capa inferior presentado los siguientes resultados.

Tabla 71
*Contenido de asfalto capa asfáltica
del tramo ESPE – El Colibrí*

Testigo	Cantidad total de agregado en la muestra (g)	Contenido de asfalto (%)
Capa superior		
p ₂	617.39	5.82
p ₅	338.56	5.98
Promedio		5.90

Capa inferior		
p ₅	419.69	5.86
p ₈	540.30	5.80
Promedio		5.83

6.4.3.2 Granulometría

Mediante el ensayo de extracción del asfalto se obtuvo los agregados de las probetas P₂ capa superior, P₅ capa superior, P₅ capa inferior y P₈ capa inferior para el posterior análisis de la granulometría de las muestras. Se observó que la mezcla asfáltica que compone tanto la capa inferior como superior de la carpeta asfáltica se encuentra dentro de los límites granulométricos de la franja de ½”.

- Testigo P₂ capa superior

Peso inicial: 565.09 g

Tabla 72

Granulometría - testigo P₂ capa superior

Tamices	Porcentajes que pasa (MTOB)		Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	Min	Max				
3/4 " (19,0 mm)	100	100	0.00	0	0	100.00
1/2"(12,5mm)	90	100	4.08	4	1	99.28
3/8 " (9,51 mm)	67	87	40.57	45	8	92.10
No. 4 (4,76 mm)	44	74	183.99	229	40	59.54
No. 8 (2.36 mm)	28	58	106.25	335	59	40.74
No. 16(1,18 mm)	20	46	84.39	419	74	25.80
No. 30(0,6 mm)	13	33	46.11	465	82	17.64
No. 50(0,30mm)	5	21	51.42	517	91	8.54
No. 100(0,15 mm)	4	16	30.20	547	97	3.20
No. 200(0,075 mm)	2	10	13.92	561	99	0.74
Pasante No. 200			3.81	565	100	



Figura 109. Curva granulométrica - testigo P₂ (capa superior)

- Testigo P₅ capa superior

Peso inicial: 303.78 g

Tabla 73

Granulometría - testigo P₅ capa superior

Tamices	Porcentajes que pasa (MTOF)		Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	Min	Máx.				
3/4 " (19,0 mm)	100	100	0.00	0	0	100.00
1/2" (12,5mm)	90	100	30.85	31	10	89.84
3/8 " (9,51 mm)	67	87	23.79	55	18	82.01
No. 4 (4,76 mm)	44	74	54.54	109	36	64.06
No. 8 (2.36 mm)	28	58	43.42	153	50	49.77
No. 16(1,18 mm)	20	46	44.95	198	65	34.97
No. 30(0,6 mm)	13	33	27.46	225	74	25.93
No. 50(0,30mm)	5	21	33.56	259	85	14.88
No. 100(0,15 mm)	4	16	27.64	286	94	5.78
No. 200(0,075 mm)	2	10	15.03	301	99	0.84
Pasante No. 200			2.10	303	100	

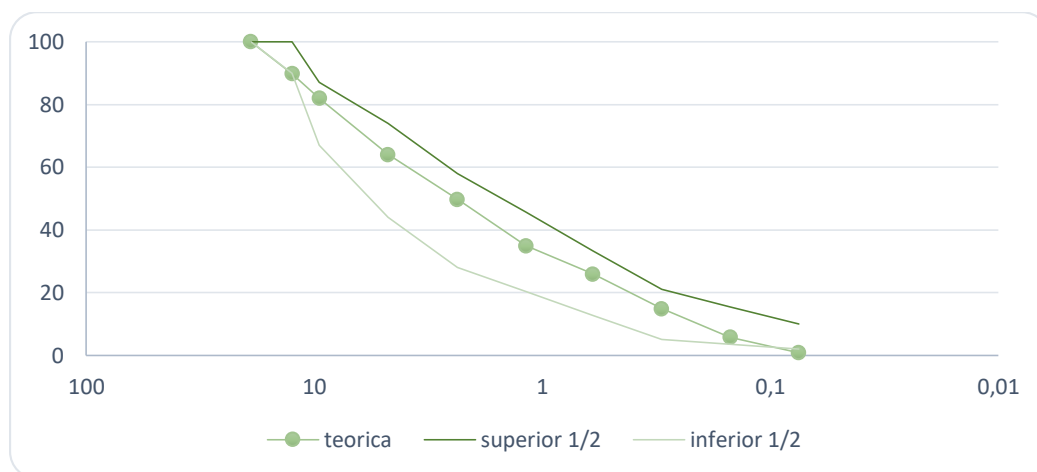


Figura 110. Curva granulométrica - testigo P₅ (capa superior)

- Testigo P₅ capa inferior

Peso inicial: 303.78 g

Tabla 74

Granulometría - testigo P₅ capa inferior

Tamices	Porcentajes que pasa (MTOF)		Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	Min	Max				
3/4 " (19,0 mm)	100	100	0.00	0	0	100.00
1/2"(12,5mm)	90	100	15.89	16	4	95.59
3/8 " (9,51 mm)	67	87	28.18	44	12	87.76
No. 4 (4,76 mm)	44	74	106.60	151	42	58.15
No. 8 (2.36 mm)	28	58	61.16	212	59	41.16
No. 16(1,18 mm)	20	46	45.98	258	72	28.39
No. 30(0,6 mm)	13	33	26.04	284	79	21.16
No. 50(0,30mm)	5	21	31.17	315	88	12.50
No. 100(0,15 mm)	4	16	24.78	340	94	5.62
No. 200(0,075 mm)	2	10	16.14	356	99	1.13
Pasante No. 200			3.95	360	100	



Figura 111. Curva granulométrica - testigo P₅ (capa inferior)

- Testigo P₈ capa inferior

Peso inicial: 477.08 g

Tabla 75

Granulometría - testigo P₈ capa inferior

Tamices	Porcentajes que pasa (MTOF)		Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	Min	Max				
3/4 " (19,0 mm)	100	100	0.00	0	0	100.00
1/2"(12,5mm)	90	100	29.69	30	6	93.78
3/8 " (9,51 mm)	67	87	24.49	54	11	88.64
No. 4 (4,76 mm)	44	74	149.62	204	43	57.28
No. 8 (2.36 mm)	28	58	77.32	281	59	41.07
No. 16(1,18 mm)	20	46	66.39	348	73	27.16
No. 30(0,6 mm)	13	33	33.17	381	80	20.21
No. 50(0,30mm)	5	21	35.47	416	87	12.77
No. 100(0,15 mm)	4	16	31.67	448	94	6.13
No. 200(0,075 mm)	2	10	24.12	472	99	1.08
Pasante No. 200			4.23	476	100	

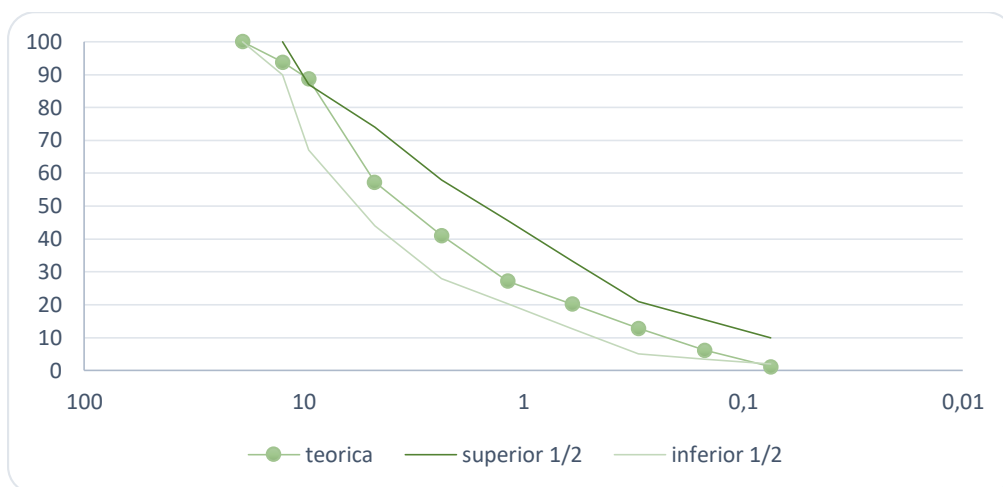


Figura 112. Curva granulométrica - testigo P₈ (capa inferior)

6.5 Fallas en el tramo ESPE – El Colibrí

Tabla 76

Hoja de registro de falla del tramo ESPE – El Colibrí

FALLA	DESCRIPCIÓN	ASPECTO SUPERFICIAL	SEVERIDAD
FISURAS			
Piel de cocodrilo	<p>Son fisuras interconectadas con patrones irregulares que aparecen en áreas sometidas a carga y se propagan formando piezas angulares por lo general con un diámetro promedio de 0.30 cm.</p> <p>Originadas por la fatiga de la capa de rodadura bajo acción repetida de las cargas de tránsito.</p>		<p>A lo largo del tramo se pueden observar fisuras de severidad MEDIA y en mayor porcentaje de severidad ALTA ya que las fisuras ha evolucionado (abertura mayor a 3mm), presentan despotillamiento o desgaste en los bordes y algunos bloques se encuentran sueltos.</p>
Longitudinal	<p>Son discontinuidades en la carpeta asfáltica en la misma dirección que el tránsito dando indicios de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura.</p>		<p>La severidad de la falla observada es ALTA ya que las aberturas son mayores a 3 mm y presentan patrones irregulares en los bordes. Evolución probable: piel de cocodrilo.</p>

→
CONTINÚA

Transversal

Se extienden a través del pavimento en ángulos aproximadamente rectos al eje del mismo o a la dirección de construcción.



En el tramo analizado se presentan los tres tipos de severidades baja, media y alta.

En bloque

Son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares, los bloques tienen el lado promedio mayor que 0.30 m². Aparecen usualmente en áreas no cargadas, originados por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios (ciclos diarios de esfuerzo / deformación unitaria).



Severidad de la fisura **ALTA** debido a que presentan bloques bien definidos por fisuras de abertura mayor que 3 mm, presentando un leve despotillamiento en los bordes.

DEFORMACIONES

Ahuellamiento

Deformación permanente de la carpeta asfáltica en el sentido longitudinal debajo de las huellas de los vehículos. Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento.



Severidad **MEDIA**, profundidad entre 10 mm y 25mm. Evolución probable: piel de cocodrilo.

BACHEO

Parche

Es un área de pavimento la cual ha sido remplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. Se considera un defecto debido a que un área bacheada o el área adyacente no se comportan como la sección original de pavimento. Indica la existencia de un deterioro anterior.



La severidad **BAJA** ya que el parche está en muy buena condición y se desempeña de manera adecuada

6.6 Diseño del refuerzo

Después de haber concluido el análisis tanto de las fallas observadas en campo como de los núcleos extraídos del tramo ESPE - El Colibrí, se realizó el diseño del refuerzo mediante la guía AASHTO 93 descrito en el capítulo II.

6.6.1 Coeficientes estructurales adoptados según el estado del pavimento

Los coeficientes estructurales (a_i) de las capas fueron tomados de la Tabla 16 y Tabla 17, considerando el análisis de fallas en el pavimento y núcleos extraídos. Para la selección del coeficiente estructural de la capa asfáltica se tomó en cuenta los porcentajes de las fallas transversales y tipo piel de cocodrilo presentes en la capa asfáltica. En la Tabla 77 se presenta el porcentaje de falla transversal y tipo piel de cocodrilo calculado según el análisis realizado al tramo de vía y en la Tabla 78 se presenta los coeficientes seleccionados para cada una de las capas. Los coeficientes para las capas de base y sub base fueron seleccionados considerando una estructura sin falla.

Tabla 77

Porcentaje de falla transversal y piel de cocodrilo

Tipo de falla	Severidad	Porcentaje
Transversal	baja	0.96%
	media	0.35%
	alta	0.71%
Piel de cocodrilo	baja	0.00%
	media	2.95%
	alta	8.28%
Área total observada		3750 m ²
Ancho de vía		7.50 m

Tabla 78

Coeficientes estructurales y de drenaje adoptados

Capas	Coeficientes estructurales		Coeficientes de drenaje	
Asfáltica	a_1	0.20		
Base granular	a_2	0.12	m_2	1.15
Sub base granular	a_3	0.12	m_3	1.05

6.6.2 Espesor de la capas del pavimento

En la Tabla 79 se presentan los espesores de las capas del pavimento existente, mismas que sirvieron para el cálculo del número estructural efectivo del pavimento reforzado.

Tabla 79

Espesor de las capas del pavimento existente

Capas	Espesor			
Asfáltica	8	cm	3	plg
Base granular	15	cm	6	plg
Sub base granular	20	cm	8	plg

6.6.3 Cálculo número estructural requerido y el espesor del refuerzo

Tabla 80

Cálculo del número estructural y espesor del refuerzo

Período de diseño	10	años	VALOR		observación
PARÁMETROS					
1. Estructura existente					
	ai				
1.1 capa asfáltica	0.20	8.00	cm		espesor de la primera capa de la carpeta existente
1.2 base granular	0.12	15.00	cm		
1.3 sub base granular	0.12	20.00	cm		
2 subrasante					
2.1 Modulo resiliente (Mr)		13329	Psi		
3. Número estructural requerido para el tránsito futuro					
SN_f		4.22			valor calculado en el capítulo IV
4. número estructural efectivo del pavimento existente					
SN_{ef}		2.44			valor calculado con Ec. 41
5. Número estructural requerido para el refuerzo					
	$SN_{ref} = SN_f - SN_{ef}$				
Sn_{ref}		1.78			
6. Espesor del refuerzo					
	$D_{ref} = \frac{SN_{ef}}{a_1}$				
D_{ref}		4	plg		
D_{ref}		11	cm		

6.7 Desempeño del pavimento rehabilitado con inclusión del refuerzo

Para determinar si la inclusión del refuerzo en la carpeta del pavimento rehabilitado ha mejorado el desempeño del mismo, se aplicó el mismo análisis efectuado a una carpeta de pavimento nuevo. Con esto se determinó el número de ejes equivalentes necesario para causar el mismo daño esperado en una carpeta sin refuerzo. El nuevo espesor de la carpeta de refuerzo se determinó aplicando un retro cálculo en el método AASTHO para rehabilitación de pavimento, utilizando el módulo de elasticidad de la mezcla reforzada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 81

Resultados del espesor de la carpeta de rehabilitación según el tipo de refuerzo colocado

Tipo de fibra	MÉTODO AASTHO			
	Módulo de elasticidad mezcla con refuerzo (Psi)	a ₁	Espesor carpeta	
			plg	cm
Sin refuerzo	353000	0.400	4.46	11.00
Malla de fibra de vidrio	430000	0.434	4.11	10.44
Geotextil no tejido	401000	0.421	4.24	10.76
Fibra de vidrio y bórax	400659	0.420	4.25	10.79
Fibra de vidrio e isopreno	399000	0.418	4.27	10.84

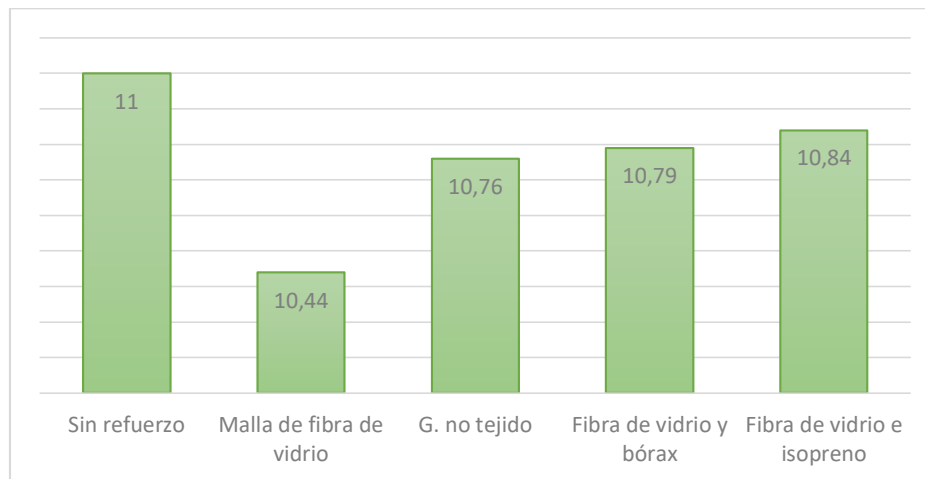


Figura 113. Espesor de la carpeta de rehabilitación según el tipo refuerzo colocado (cm)

El espesor de la carpeta asfáltica de refuerzo calculado para una mezcla asfáltica sin refuerzo es de 11cm=4.46plg pero según el tipo de fibra utilizada para reforzar la carpeta se obtiene una optimización en el espesor: la mezcla reforzada con malla de fibra de vidrio tiene un espesor de carpeta de 10.44cm lo que representa una disminución en el espesor del 5.09% con respecto a la no reforzada (0.22plg=0.56cm), la mezcla asfáltica reforzada con geotextil no tejido tiene un espesor de carpeta de 10.76cm que representa una disminución en el espesor de 2.16% (0.09plg=0.24cm), mezcla asfáltica reforzada con fibra de vidrio con anhídrido polivinilico - bórax tiene un espesor de carpeta 10.79cm que representa una disminución en el espesor de 1.93% (0.08plg=0.21cm) y fibra de vidrio con isopreno tiene un espesor de carpeta de 10.84cm que representa una disminución en el espesor de 1.46% (0.06plg=0.16cm).

Tabla 82

Resultados aumento de número de ejes equivalentes y tiempo de vida útil del pavimento rehabilitado con carpeta reforzada

Tipo de fibra	Método Racional (carpeta espesor 11 cm)						Tiempo de vida útil (años)
	Capa	Parámetro	Valor admisible	Valor calculado	$\frac{\text{valor de servicio}}{\text{valor admisible}}$, (%)	W18	
Sin refuerzo	Asfáltica	E_r	2.785E-04	2.142E-04	76.91	1.96E+07	10
	Asfáltica existente	E_r	5.255E-04	2.513E-04	47.82		
	Subrasante	E_z	3.154E-04	2.820E-04	89.40		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.529	0.300	56.71		
	Estructura	Δ_z (mm)	0.439	0.430	97.89		
Malla de fibra de vidrio	Asfáltica	E_r	2.507E-04	2.010E-04	80.19	2.33E+07	11.7
	Asfáltica existente	E_r	5.078E-04	2.366E-04	46.59		
	Subrasante	E_z	3.022E-04	2.731E-04	90.37		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.509	0.291	57.18		
	Estructura	Δ_z (mm)	0.421	0.417	99.00		
Geotextil no tejido	Asfáltica	E_r	2.593E-04	2.058E-04	79.36	2.23E+07	11.24
	Asfáltica existente	E_r	5.123E-04	2.419E-04	47.22		
	Subrasante	E_z	3.056E-04	2.763E-04	90.43		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.514	0.294	57.24		
	Estructura	Δ_z (mm)	0.425	0.421	99.00		
Fibra de vidrio con bórax	Asfáltica	E_r	2.594E-04	2.058E-04	79.34	2.23E+07	11.24
	Asfáltica existente	E_r	5.123E-04	2.419E-04	47.22		
	Subrasante	E_z	3.056E-04	2.763E-04	90.43		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.514	0.294	57.24		
	Estructura	Δ_z (mm)	0.425	0.421	99.00		

→
CONTINUA

fibra de vidrio con isopreno	Asfáltica	E_r	2.599E-04	2.060E-04	79.25	2.22E+07	11.19
	Asfáltica existente	E_r	5.126E-04	2.421E-04	47.23		
	Subrasante	E_z	3.058E-04	2.765E-04	90.42		
		σ_z (Kg/cm ²)	0.514	0.294	57.24		
	Estructura	Δ_z (mm)	0.426	0.421	99.00		

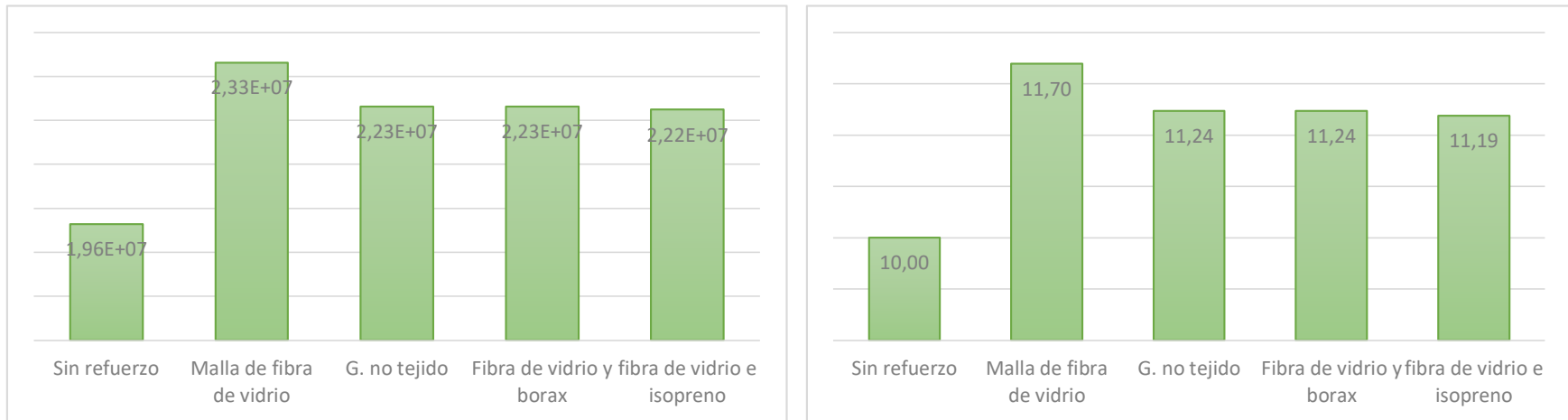


Figura 114. izq. Número de ejes equivalentes según tipo de refuerzo; der. Tiempo de vida útil según tipo de refuerzo (años)

La carpeta asfáltica de refuerzo fue diseñada para un período de diseño de 10 años. La inclusión del refuerzo en la carpeta generó un incremento en este valor teniendo: con la malla de fibra de vidrio un aumento de 1.70 años, el geotextil no tejido y la fibra de vidrio con anhídrido polivinilico - bórax un aumento de 1.24 años y la fibra de vidrio con isopreno un aumento 1.19 años.

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- **De la caracterización de los materiales**

Para elaborar la mezcla asfáltica es necesario caracterizar los materiales que la componen con el fin de controlar el cumplimiento de las propiedades índice y mecánicas descritas en la norma MTOP 001F-2002 sección 810-2. Como material ligante se utilizó un asfalto grado AC-20 sin aditivo con un grado de penetración entre 60 y 70, material que al ser sometido a los ensayos de caracterización cumple con los requisitos de dicha norma.

Para el caso del material pétreo se caracterizó dos materiales: árido triturado procedente de los depósitos aluviales del río Pita que cumple con todos los requisitos de la norma MTOP 001F-2002 sección 811-2, y árido de origen volcánico (andesitas) que no cumplió con los requerimientos de adherencia entre árido y asfalto observado en el ensayo de peladura (ASTM D 3625).

- **Del diseño de la mezcla asfáltica**

La mezcla asfáltica "patrón" fue diseñada para tráfico pesado obteniendo las siguientes proporciones en peso: 49.59% de árido grueso, 50.41% de árido fino y para alcanzar un 4% de vacíos de aire en la mezcla se determinó 6.1% el porcentaje óptimo de asfalto. Para esta fórmula maestra se obtuvo una estabilidad de 3273.13 lb y 11.52 mm de flujo, cumpliendo con los valores límites de la norma (mínimo permitido para la estabilidad 1800 lb y el flujo en el rango de 8 – 14 mm en el ensayo Marshall).

- **De la determinación de la posición del refuerzo en la carpeta asfáltica**

El espesor de la carpeta asfáltica se obtuvo del diseño del pavimento teórico para una vía de primer orden calculado mediante el método AASHTO 93, para un período de diseño de 10 años (valor que depende del desempeño de los materiales y tipo de vía) y 1.96×10^7 ejes equivalentes

(tomando como referencia para la investigación el conteo vehicular de la Autopista General Rumiñahui). Se obtuvo los siguientes espesores para la estructura del pavimento: 20cm para la carpeta asfáltica, 15cm para la base y 5cm para la sub base.

Mediante el método racional se analizó la deformación, esfuerzo y deflexión en el pavimento, obteniendo que la carpeta asfáltica alcanzará un 58.10% de deformación radial a tracción en la base y en la superficie de la estructura del pavimento se tendrá un 80.09% de deflexión (porcentajes con respecto a los valores admisibles del pavimento).

La posición óptima teórica del refuerzo se determinó mediante la elaboración de modelos del pavimento con el refuerzo en varias posiciones ($1/6$, $1/3$, $1/2$, $2/3$ del espesor medido desde la superficie de la carpeta asfáltica y en la base de la carpeta) usando el programa Bisar 3.0, obteniéndose que la posición óptima teórica se encuentra localizada en la base de la carpeta asfáltica.

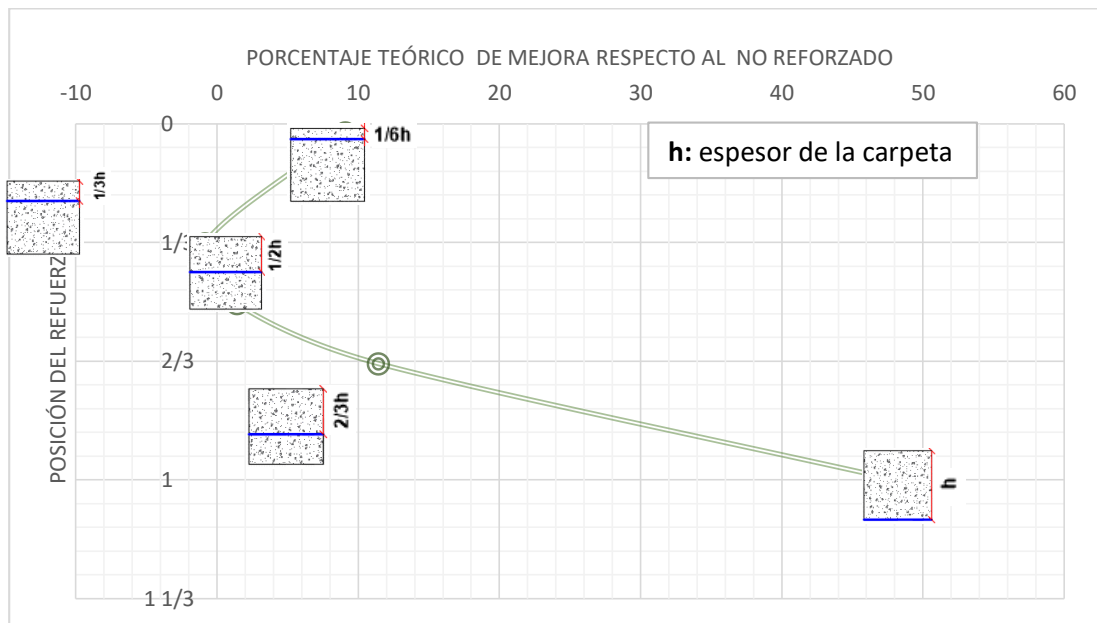


Figura 115. Curva teórica del comportamiento de la mezcla asfáltica con el refuerzo en varias posiciones

- **Del análisis comparativo de las probetas con refuerzo y sin refuerzo.**

Los resultados obtenidos para las probetas con refuerzo en el ensayo Marshall son el flujo y la estabilidad. En el caso de la estabilidad se observa un incremento del valor según el tipo de refuerzo colocado. La malla de fibra de vidrio brinda una mejora a la falla del 30.31%, el geotextil no tejido: 18.37%, la fibra de vidrio y bórax: 18.26% y la fibra de vidrio e isopreno: 24.33%, todas comparadas respecto a la mezcla sin refuerzo. Siendo la malla de fibra de vidrio y fibra de vidrio con isopreno las que genera un mejor desempeño de la mezcla.

El incremento en el valor del flujo Marshall indica que la mezcla reforzada soporta una mayor deformación antes de la falla brindando a la mezcla mayor flexibilidad según el tipo de refuerzo colocado. Para el caso del geotextil no tejido, fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax generan un incremento del flujo en un 4.17%, la malla de fibra de vidrio un 7.06% y la fibra de vidrio e isopreno un 9.95%.

Mediante el ensayo de tracción indirecta se evaluó el potencial de agrietamiento de la mezcla por medio de la deformación a tracción. La mezcla no reforzada presenta 1.41% de deformación unitaria mientras que, la inclusión del refuerzo en la mezcla asfáltica permite soportar mayor deformación antes de la rotura, siendo la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax la que admite hasta un 24% más deformación antes de la falla con respecto a la mezcla no reforzada.

- **Del desempeño del hormigón asfáltico**

La inclusión del refuerzo en la carpeta asfáltica genera una optimización en su espesor. Así, la mezcla reforzada con malla de fibra de vidrio presenta una disminución del espesor de la carpeta en un 7.83% con respecto a la no reforzada ($0.63\text{plg} = 1.59\text{ cm}$). Las fibras como el geotextil no tejido, fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax y fibra de vidrio e isopreno presentan un disminución del espesor de la carpeta de 4.99% ($0.40\text{plg} = 1.02\text{cm}$), 4.76% ($0.38\text{plg} = 0.97\text{ cm}$) y 4.31% ($0.35\text{plg} = 0.88\text{cm}$) respectivamente.

Según lo calculado mediante el método racional la inclusión del refuerzo en la carpeta asfáltica incrementa el tiempo de vida útil del pavimento: mezcla sin refuerzo 10 años de vida útil, mezcla con malla de fibra de vidrio genera un aumento de 2.2 años de vida útil respecto a la no reforzada,

la mezcla con geotextil no tejido y fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax generan un aumento de 1.4 años de vida útil y la mezcla con fibra de vidrio e isopreno genera un aumento de 1.3 años de vida útil.

Las fibras elaboradas como alternativa de refuerzo al ser sometidas al ensayo de elongación presentaron los siguientes resultados: fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax posee una consistencia más rígida, módulo de elasticidad de 2889.57 MPa, desplazamiento máximo de 0.87 mm presentando una rotura frágil al momento de la falla y la fibra de vidrio con isopreno posee un módulo de elasticidad de 839.02 MPa, desplazamiento máximo de 0.55mm presentando un comportamiento dúctil con capacidad de recuperación.

Las fibras elaboradas como alternativa de refuerzo son funcionales ya que generan mejoras tanto en la estabilidad como en el flujo de la mezcla asfáltica por lo tanto la selección de la fibra más adecuada para un proyecto dependerá de las características del corredor vial, ya que al tener tramos con diferentes características de subrasante existirá zonas donde sea necesario proporcionar mayor rigidez (refuerzo fibra de vidrio con bórax) y en otras se necesitará mayor elasticidad - estados de recuperación (fibra de vidrio con isopreno).

Las fibras se podrían utilizar en diferentes tipos de mezclas. En el caso de la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax al ser rígida es ideal para el refuerzo de una mezcla asfáltica densa, mientras que la fibra de vidrio con isopreno al ser flexible y recuperable ayudaría a mejorar la capacidad de la mezcla asfáltica abierta y en un pavimento articulado evitaría la formación de zonas de deformación.

El costo aproximado de elaboración de las fibras como alternativa de refuerzo es:

Especificación	Descripción	Unidad de medida	Costo de elaboración
406-1 (E)	Fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax	m ²	2.48 USD
406-1 (E)	Fibra de vidrio con isopreno	m ²	1.41 USD

- **Caso de aplicación:**

En la evaluación funcional del tramo de vía ESPE- El Colibrí se determinó que la carpeta asfáltica presenta 14cm de espesor, los componentes de la estructura del pavimento corresponden a un material granular y mediante el análisis de fisuras se encontró que la carpeta asfáltica existente superó los límites de fatiga y presenta fisuras que se irradian desde la superficie hasta la base de la carpeta.

En los núcleos obtenidos por método destructivo se verificó que el pavimento fue intervenido presentando dos capas de carpeta asfáltica (capa inferior 8 cm, capa superior 6cm) y al ser sometidos a ensayos de granulometría, peladura y contenido de asfalto se determinó que la mezcla cumple con la granulometría para una faja granulométrica de ½”, posee más de 95% de adherencia entre asfalto - agregado y el contenido de asfalto en la capa superior es 5.90% y en la capa inferior es 5.83%.

El espesor de la carpeta de rehabilitación es de 4.46plg=11.00 cm y, según esta investigación, al incluir un refuerzo se observa una reducción en la misma. De acuerdo con el tipo de refuerzo colocado se tiene: malla de fibra de vidrio disminución de 5.09% del espesor de la carpeta (0.22plg=0.56cm), geotextil no tejido disminución de 2.16% (0.09plg=0.24cm), fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax disminución de 1.93% (0.08plg/0.21cm), fibra de vidrio con isopreno disminución de 1.46% (0.06plg=0.16cm).

La carpeta de rehabilitación fue diseñada para un período de diseño de 10 años. La inclusión del refuerzo en la carpeta generó un incremento en este valor teniendo: con la malla de fibra de vidrio un aumento de 1.70 años, el geotextil no tejido y la fibra de vidrio con anhídrido polivinílico - bórax un aumento de 1.24 años y la fibra de vidrio con isopreno un aumento 1.19 años.

7.2 Recomendaciones

La presente investigación se realizó en mezclas asfálticas densas en caliente las mismas que son muy frecuentes en vías del país. Pero en el Ecuador existen zonas con alta pluviosidad, lo que hace necesario el uso de mezclas asfálticas abiertas (mezclas drenantes) que permitan el drenaje del agua. Por esto, se recomienda estudiar el comportamiento de los refuerzos utilizados en esta investigación en pavimentos con mezcla abierta. Además realizar estudios orientados a determinar el comportamiento de una mezcla asfáltica con refuerzo para pavimentos sometidos a cargas dinámicas de alto impacto.

Realizar un análisis de mezclas de alto desempeño ya que de esto depende la determinación del tiempo de vida útil del pavimento a ser diseñado.

Se recomienda realizar una evaluación económica de la industrialización de las fibras elaboradas como alternativa de refuerzo (fibra de vidrio con Anhídrido polivinílico - bórax, fibra de vidrio con isopreno), ya que con esto se generarán plazas de trabajo y su implementación permitirá abaratar aún más los costos de mantenimiento en las vías ya que hasta el momento los geosintéticos utilizados en el país con este fin son importados.

Comprobar la tendencia del comportamiento de la mezcla asfáltica con refuerzo obtenida en la presente investigación mediante la aplicación de ensayos dinámicos o pruebas in situ.

Tomar en cuenta el factor de ajuste por presión de neumáticos, experimentando conjuntamente con la inclusión del refuerzo de fibras propuestas en esta tesis.

Realizar ensayos que determinen la deformación de la mezcla asfáltica cuando el refuerzo es colocado a un $1/3$ de la altura de la probeta (eje neutro), con la finalidad de experimentar si en esta posición disminuye la fatiga de la mezcla tomando en cuenta el factor de presión de inflado y presión de contacto de los neumáticos.

Realizar pruebas de desempeño con variaciones de temperatura para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica reforzada frente a cambios térmicos.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *Design of Pavement structures*. Washington: AASHTO.
- Apuntes de Ingeniería Civil*. (09 de 2010). Obtenido de <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/09/tipos-de-pavimentos.html>
- Ballester, F., Castro, D., & Gil, M. (30 de 10 de 2000). *Definición, función y clasificación de los geotextiles*. España: Universidad de Cantabria.
- Bardales, C., & Cheng, G. (2013). Elaboración de las curvas de ciclo de vida de las carreteras CA-1, CA-2 y CA-3. El Salvador.
- Cáceres, A. (30 de 11 de 2007). Análisis de la metodología superpave para diseño de mezclas asfálticas en México. Cholula, Puebla, Mexico.
- Coronado, J. (2002). *Manual centroamericano para diseño de pavimentos*.
- Corredor, G. (2008). Experimento Vial de la AASHO y guías de diseño AASHTO. Perú.
- Corros, M., Urbáez, E., & Corredor, G. (agosto de 2008). *Maestría en vías terrestres, módulo III*. Obtenido de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-de-evaluacion1.pdf>
- Díaz, J., Escobar, O., & Olivio, E. (2009). Aplicación de los geosintéticos en la estructura de los pavimentos y en obras de drenaje para carreteras. Republica de El Salvador.
- Forero, A. (2012). Rehabilitación de Pavimentos Fisurados por Reflexión implementando sistemas de Membrana Antifisura. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Geotex. (16 de 03 de 2017). *Geotex - Geosintéticos*. Obtenido de <https://www.geosinteticos.net/historia-los-geosinteticos>
- Geotexan. (20 de 11 de 2012). *Geotexan*. Obtenido de <https://geotexan.com/geosinteticos/>
- Giordani, C., & Leone, D. (2015). *Pavimentos*. Obtenido de https://www.firro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf
- Guiller, Thenoux, G., & Barrera, E. (2002). Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Santiago de Chile: Dirección de vialidad Ministerio de Obras Públicas.
- Higuera, C. (2007). *Mecánica de pavimentos*. Tunja: Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia.
- Higuera, C. (2015). *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- INEN 696. (2011). *Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso (NTE INEN 696)*. Quito: INEN.
- INEN 857. (2010). *Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito.
- INEN 860. (2011). *Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles*. Quito.
- Instituto del asfalto. (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22)*. Estados Unidos de America.
- Instituto Mexicano del transporte. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. México.

- International Geosynthetic Society. (s.f.). *Funciones de los geosintéticos*. Obtenido de <http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Functions/Espanol.pdf>
- INV E 733. (2007). *Grvedad específica Bulk y densidad de mezclass asfálticas compactadas no absorbentes empleando especimenes saturados y supericie seca*. Bogotá: INVIAS.
- Jimenez, C. (2009). *Diseño de pavimentos flexibles: Metodo del insntituto de ingeniería de la UNAM*. Mexico.
- Juárez, E., & Rico, A. (2004). *Mécanica de suelos: teoria y aplicaciones de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Merino, D. (2016). Desarrollo para un sistema de protección paara taludes mediante la membrana de recubrimiento de ahnidriodo polivinilo de boráx, en obras de infraestructura lineal y zonas de riesgo de deslizamientos. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Minaya, S., & Ordóñez, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima: ICG-Instituto de la construcción y gerencia.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- MOP. (2001). *Disño de pavimentos flexibles*. Quito.
- MOPC. (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de repación*. Obtenido de <http://mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>
- Morea, F. (06 de 09 de 2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas*.
- MTOP 001F. (2002). *Específicaciones generales para la contrucción de caminos y puentes*. Quito.
- PAVCO. (junio de 2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. Bogotá, Colombia: Norte Gráfico.
- Rodríguez, E. (2009). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av, Luis Montero, distrito de Castilla*. Piura.
- Rondon , H., & Reyes, F. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 41-65.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Eco ediciones.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Tensar. (2008). *GlasGrid-Sistema de refuerzo de pavimento*. Estados Unidos.
- Thenoux, G., & Carrillo, H. (2001). *Análisis de Casos de Ahuellamiento en mezclas Asfálticas Chilenas*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile .
- Tránsito Uasd. (3 de 10 de 2012). *Ingeniería de Tránsito*. Obtenido de <http://ingenieriadetransitouasd.blogspot.com/2012/10/historia-de-las-carreteras.html>
- Yarango, E. (2014). *Rehabilitacion de la carretera de acceso a la sociedad mienra cerro verde (S.M.C.V) desde la prog. KM 0+000, en el distrito de Uchumayo, Arequipa, Arequipa. . Lima, Perú.*