

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTO - BENEFICIO ENTRE
PAVIMENTOS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO Y
ASFALTO EN FRÍO APLICADO SOBRE EMPEDRADOS,
MEDIANTE SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE KENLAYER.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

CADENA RUANO FRANKLIN SEBASTIAN
franklin.cadena@epn.edu.ec

GALARZA PAZMIÑO ANA BELÉN
ana.galarza@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. LUNA HERMOSA GERMÁN VINICIO MBA.
german.luna@epn.edu.ec

Quito, octubre 2020

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

Como director del trabajo de titulación “Análisis Comparativo de costo - beneficio entre pavimentos de hormigón con fibras de acero y asfalto en frío aplicado sobre empedrados, mediante simulación en el software Kenlayer”, desarrollado por Franklin Sebastián Cadena Ruano y Ana Belén Galarza Pazmiño , estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil mención en Estructuras, habiendo supervisado la realización de este trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.

ING. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA MBA.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Franklin Sebastián Cadena Ruano y Ana Belén Galarza Pazmiño, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**FRANKLIN SEBASTIÁN
CADENA RUANO**

**ANA BELÉN GALARZA
PAZMIÑO**

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mis padres Franklin y Zandra, mis hermanos Pablo y Sandrita, artífices de este logro en mi vida, juntos lo conseguimos.

A mis abuelitos, los que tengo a mi lado y a los que ya no, desde pequeño me brindaron su amor y sabiduría.

A Keren M., mi apoyo, que llegó en el momento ideal y con quien aprendí nuevas manera de apreciar la vida.

A mi familia, quienes me apoyaron en las buenas y malas.

FRANKLIN SEBASTIÁN CADENA RUANO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre y a mi familia por brindarme su apoyo en todo momento.

A Alberto S. porque depositó su confianza y amor en mí desde el inicio hasta el final de mi carrera.

ANA BELÉN GALARZA PAZMIÑO.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi madre Dolorosa quienes intercedieron por mí durante toda mi carrera, a mis padres, Franklin y Zandra, que sin lugar a duda me brindaron lo mejor de ellos, sus consejos y amor quedan en mí por siempre.

A mis hermanos, Pablo y Sandrita, desde pequeños nos apoyamos y siempre nos amaremos.

A mi familia que confió en mí, y me ayudaron en cada momento que los necesité.

Al Ing. Germán Luna, excelente profesor y ser humano, que no sólo aportó en mi formación técnica, sino también humana.

A mi compañera de tesis Ana Belén, que con su apoyo y amistad sincera logramos concluir con éxito este proyecto.

A mis amigos, en especial a Jorge S., Verónica T., Byron N., Cristian T., Francisco G., compartimos los mejores momentos de la vida.

FRANKLIN SEBASTIÁN CADENA RUANO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre, pilar fundamental en esta etapa y a lo largo de toda mi vida, que con su apoyo y cariño acogió todas mis dudas y temores, convirtiéndolos en certezas y valentías que fueron fuente principal en la culminación de este proyecto.

A mi padre que con su vasto conocimiento y afecto contribuyó en mi curso estudiantil y decisiones importantes que han marcado mi trayecto. A mi perrita Peluza, que forma parte de mi familia.

Al Ingeniero German Luna, que siendo nuestro tutor fue un gran guía y apoyo en la culminación de nuestros estudios y este proyecto de titulación.

Gracias a mi mejor amiga que considero una hermana, Paola, por ser un espacio de luz y apoyo desde el inicio, por estar presente en cada caída y logro, quien manifestó su gran cariño en todo momento.

Agradezco a Alberto, por brindarme tanto amor desde el primer día, aportando un gran tesoro en mi vida y en cada paso que he dado, por darme su mano, por ser mi compañero, mi motor y fuente de inspiración a lo largo de toda mi carrera.

A mi compañero de tesis y gran amigo Sebastián porque atravesando esta odisea junto con su familia, estuvo en momentos difíciles, siendo un soporte que, combinado con estudio y risas, dieron resultado este gran trabajo en equipo.

Y finalmente, gracias a mis amigos Verónica T., Sandrita C., Frank P. y Slyter M., Byron N., por estar presente en esta aventura universitaria, aportando su cariño y sincera amistad, dando un gran significado a este, nuestro primer gran triunfo.

ANA BELÉN GALARZA PAZMIÑO

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	vi
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	5
1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	6
CAPÍTULO II	7
2 FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS	7
2.1.1 PAVIMENTO FLEXIBLE	7
2.1.1.1 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE	8
2.1.1.2 MEZCLAS BITUMINOSAS COLOCADAS EN FRÍO	9
2.1.1.3 MEZCLAS BITUMINOSAS COLADAS EN CALIENTE	10
2.1.2 PAVIMENTO RÍGIDO	10
2.1.2.1 ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO	10
2.1.2.2 TIPOS DE PAVIMENTO RÍGIDO	12
2.1.2.3 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA)	14
2.2 CAPAS QUE FORMAN PARTE DE UN PAVIMENTO	17

2.2.1 SUBRASANTE.....	17
2.2.2 SUB-BASE.....	17
2.2.3 BASE	18
2.2.4 CAPA DE RODADURA.....	21
2.3 DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	21
2.3.1 ESTUDIO DEL TRÁFICO	21
2.3.2 ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS.....	22
2.3.2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD.....	22
2.3.2.2 LÍMITES DE CONSISTENCIA	22
2.3.2.3 GRANULOMETRÍA.....	24
2.3.2.4 DENSIDAD NATURAL DE UNA MUESTRA.....	27
2.3.2.5 ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO.....	29
2.3.2.6 CAPACIDAD DE SOPORTE O CBR.	32
2.3.2.7 ENSAYO DE PLACA IN SITU.....	34
2.4 CLASIFICACIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL.....	35
2.5 DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR EL MÉTODO AASHTO-93.....	37
2.5.1 VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE	37
2.5.1.1 COMPOSICIÓN DEL TRÁNSITO	37
2.5.1.2 VOLUMEN DEL TRÁFICO.....	38
2.5.1.3 TRÁFICO PROMEDIO DIARIO (TPD).....	38
2.5.1.4 TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA).....	39
2.5.1.5 PERIODO DE DISEÑO	39
2.5.1.6 TRÁFICO FUTURO	40
2.5.1.7 FACTOR DIRECCIONAL Y FACTOR DE CARRIL.....	41
2.5.1.8 NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (ESAL)	41
2.5.1.9 SERVICIABILIDAD	42
2.5.1.10 CONFIABILIDAD (R).....	43
2.5.1.11 DESVIACIÓN ESTÁNDAR TOTAL (SO).....	44
2.5.1.12 DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (ZR).....	44
2.5.1.13 MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE (MR)	45

2.5.1.14	NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO (SNR).....	45
2.5.1.15	NÚMERO ESTRUCTURAL PROPUESTO (SN)	46
2.5.1.16	COEFICIENTE ESTRUCTURAL (A)	47
2.5.1.17	DRENAJE (M)	47
2.6	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO CON METODOLOGÍA PCA (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION).....	48
2.6.1	VARIABLES DE DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO.....	49
2.6.1.1	RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA FLEXIÓN (MR).	49
2.6.1.2	SOPORTE DE LA SUBRASANTE Y SUB-BASE.....	50
2.6.1.3	PERIODO DE DISEÑO.....	52
2.6.1.4	PROYECCIÓN (FPROY).	52
2.6.1.5	FACTOR DE DIRECCIÓN (FD).	54
2.6.1.6	FACTOR CARRIL (FC).	54
2.6.1.7	FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA (LSF).....	55
2.6.1.8	TRÁFICO (ADT).....	56
2.6.1.9	REPETICIONES ESPERADAS.....	56
2.7	MANTENIMIENTO EN CAPAS DE RODADURA	56
2.7.1	MANTENIMIENTO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.	58
2.7.1.1	MANTENIMIENTO RUTINARIO.	59
2.7.1.2	MANTENIMIENTO PERIÓDICO.	61
2.7.2	MANTENIMIENTO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.	63
2.7.2.1	MANTENIMIENTO RUTINARIO.	63
2.7.2.2	MANTENIMIENTO PERIÓDICO.	63
2.8	SOFTWARE KENLAYER.....	65
2.8.1	GENERALIDADES	65
2.8.2	ESTRUCTURA DE KENLAYER	67
2.8.3	PARÁMETROS DE ENTRADA DE SOFTWARE KENLAYER.....	68
2.8.4	MÉTODOS DE ANÁLISIS EN KENLAYER.....	69
2.9	COSTOS EN LA CONSTRUCCIÓN	70
2.9.1	COSTOS DIRECTOS	70

2.9.1.1	COSTOS FIJOS.....	71
2.9.1.2	COSTOS POR CONSUMOS	72
2.9.2	COSTOS INDIRECTOS.....	74
	CAPÍTULO III	75
3	METODOLOGÍA	75
3.1	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	75
3.2	RECOPIACIÓN DE DATOS.....	76
3.2.1	INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DEL SECTOR DE ESTUDIO	76
3.2.2	INFORMACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TRÁFICO	78
3.2.3	INFORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	79
3.3	DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS.....	83
3.3.1	DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE BITUMINOSO DE ASFALTO COLOCADO EN FRIO CON METODOLOGÍA AASHTO.....	83
3.3.1.1	ESTUDIO DEL TRÁFICO	83
3.3.1.2	FACTOR DE EQUIVALENCIA (FCE)	88
3.3.1.3	FACTOR DIRECCIONAL Y FACTOR CARRIL.....	89
3.3.1.4	NÚMERO DE EJES TOTALES	90
3.3.1.5	SERVICIABILIDAD	90
3.3.1.6	CONFIABILIDAD.....	90
3.3.1.7	DESVIACIÓN ESTÁNDAR TOTAL (SO)	90
3.3.1.8	DESVIACIÓN ESTÁNDAR TOTAL (SO)	90
3.3.1.9	MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE	91
3.3.1.10	NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO (SNR).....	91
3.3.1.11	COEFICIENTES ESTRUCTURALES	93
3.3.1.12	DRENAJE.....	95
3.3.1.13	NÚMERO ESTRUCTURAL PROPUESTO (SN) Y ESPESOR DE LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO (D).....	95
3.3.2	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS SEGÚN METODOLOGÍA PCA	97
3.3.2.1	RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN.....	97

3.3.2.2	SUBRASANTE Y SUB-BASE	98
3.3.2.3	PERIODO DE DISEÑO.....	98
3.3.2.4	FACTOR DE PROYECCIÓN	98
3.3.2.5	FACTOR DE DIRECCIÓN	99
3.3.2.6	FACTOR DE CARRIL	99
3.3.2.7	FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA	99
3.3.2.8	CÁLCULO DEL TRÁFICO DE DISEÑO (ADTDISEÑO).....	99
3.3.2.9	CÁLCULO DEL NÚMERO DE REPETICIONES ESPERADAS.	100
3.3.2.10	CÁLCULO DEL ESPESOR DE PAVIMENTO RÍGIDO.....	100
3.4	INFORMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE CONFORMAN LAS DIFERENTES CAPAS DE RODADURA.....	108
3.4.1	PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS METÁLICAS.	108
3.4.2	PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO COLOCADO EN FRÍO.	110
3.5	MODELAMIENTO EN SOFTWARE KENLAYER.....	110
3.5.1	PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO COLOCADO EN FRÍO SIN ANÁLISIS DE DAÑO PARA EL ESPESOR DE DISEÑO.....	111
3.5.2	PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO COLOCADO EN FRÍO CON ANÁLISIS DE DAÑO EN 1 AÑO PARA EL ESPESOR DE DISEÑO.	118
3.5.3	PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS METÁLICAS SIN ANÁLISIS DE DAÑO PARA EL ESPESOR DE DISEÑO.....	123
3.5.4	PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS METÁLICAS CON ANÁLISIS DE DAÑO EN 1 AÑO PARA EL ESPESOR DE DISEÑO.	127
3.6	DESARROLLO DE LOS PRESUPUESTOS DE CONSTRUCCIÓN	130
3.6.1	PRESUPUESTO PARA PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO COLOCADO EN FRÍO	130
3.6.1.1	CANTIDADES DE OBRA.....	131
3.6.1.2	COSTOS DIRECTOS	132
3.6.1.3	PRECIOS UNITARIOS PARA EL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	134
3.6.1.4	PRECIOS UNITARIOS DE MANTENIMIENTO PARA EL PAVIMENTO FLEXIBLE	137

3.6.2 PRESUPUESTO PARA PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS METÁLICAS.....	139
3.6.2.1 CANTIDADES DE OBRA.....	139
3.6.2.2 COSTOS DIRECTOS	140
3.6.2.3 PRECIOS UNITARIOS PARA EL PAVIMENTO RÍGIDO.....	142
3.6.2.4 PRECIOS UNITARIOS DE MANTENIMIENTO PARA EL PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS.	145
CAPÍTULO IV	147
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	147
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DEL SITIO DE ESTUDIO.	147
4.2 VOLUMEN DE TRÁFICO Y NÚMERO DE REPETICIONES ESPERADAS.....	147
4.3 DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO.	148
4.4 SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE KENLAYER.....	149
4.4.1 PAVIMENTO FLEXIBLE BITUMINOSO COLOCADO EN FRÍO.....	150
4.4.2 PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO TIPO DRAMIX.....	166
4.5 ANÁLISIS DEL DAÑO A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DE LOS PAVIMENTOS.	180
4.6 ANÁLISIS DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.	182
CAPÍTULO V	185
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	185
5.1 CONCLUSIONES	185
5.2 RECOMENDACIONES.....	187
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189
ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tensiones críticas en una losa de pavimento de carretera bituminosa...	8
Figura 2. Sección Transversal de un Pavimento Flexible.....	9
Figura 3. Sección Transversal de un Pavimento Rígido.....	11
Figura 4. Composición de un pavimento articulado de concreto simple (JPCP)..	12
Figura 5. Composición de un pavimento articulado de concreto simple (JRCP)..	13
Figura 6. Composición de un pavimento articulado de concreto simple (CRCP).	13
Figura 7. Diferentes formas de fibras de acero.	15
Figura 8. Secciones de las fibras más comunes.	15
Figura 9. Gráfico límite líquido.....	23
Figura 10. Curva granulométrica.	27
Figura 11. Curva de compactación.....	32
Figura 12. Curva de presiones de penetración.....	33
Figura 13. Corrección de la curva esfuerzo vs penetración.....	35
Figura 14. Relación entre el esfuerzo flexural y la edad del concreto.	50
Figura 15. Relaciones aproximadas entre las clasificaciones de suelos y los valores de soporte.	51
Figura 16. Proporción de camiones en el carril derecho de una carretera dividida en carriles múltiples.....	55
Figura 17. Ciclo de vida de una carretera sin mantenimiento.....	57
Figura 18. Ciclo de vida de una carretera con mantenimiento.	58
Figura 19. Sellado de pavimentos.	59
Figura 20. Bacheo superficial de pavimentos.....	60
Figura 21. Bacheo profundo de pavimentos.....	61
Figura 22. Reparación de un pavimento rígido en todo el espesor.	64
Figura 23. Reparación de un pavimento rígido en parte del espesor.	65
Figura 24. Captura de pantalla de software KENPAVE.....	66
Figura 25. Estructura del programa KENLAYER con sus parámetros de entrada.	67

Figura 26. Características de los materiales (a)Linealidad; (b)Viscosidad; (c)Recuperable.....	69
Figura 27. Ubicación de la zona de estudio, provincia del Carchi, Cantón Espejo, parroquia La Libertad, sector Santa Rosa.	75
Figura 28. Mapa de precipitación parroquia La Libertad.	77
Figura 29. Mapa de temperatura parroquia La Libertad.	77
Figura 30. Conteo vehicular en dos sentidos.	78
Figura 31. Toma de muestra inalterada de suelo en la vía de estudio.	79
Figura 32. Ensayo límite líquido por el método de Casa Grande.	80
Figura 33. Ensayo límite plástico.....	80
Figura 34. Ensayo para obtener granulometría.	80
Figura 35. Tamizado para determinar el método de ensayo proctor.	81
Figura 36. Compactación de la muestra usando martillo manual.....	81
Figura 37. Ensayo California C.B.R.....	82
Figura 38. Ensayo de Placa o C.B.R. de campo.	82
Figura 39. Esquema estructura del pavimento flexible del proyecto	91
Figura 40. Cálculo SNr con programa DISAASHTO	92
Figura 41. Determinación del SN mediante nomograma.....	93
Figura 42. Variación del coeficiente de la capa de sub-base granular.	94
Figura 43. Gráfica para la estimación del coeficiente estructural la capa de concreto asfáltico.....	95
Figura 44. Espesores de diseño - Pavimento flexible.....	97
Figura 45. Ábaco para análisis de fatiga ejes simples.....	103
Figura 46. Ábaco para análisis de erosión ejes simples.....	104
Figura 47. Ábaco para análisis de fatiga ejes tándem.....	106
Figura 48. Ábaco para análisis de erosión ejes tándem.....	106
Figura 49. Espesores de diseño - Pavimento rígido.....	108
Figura 50. Menú Principal KENLAYER.....	111
Figura 51. Información General del software.....	112
Figura 52. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.....	113

Figura 53. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.....	113
Figura 54. Espesor de las capas de pavimento y coeficiente de Poisson	114
Figura 55. Tipo de interfaz entre capas.....	114
Figura 56. Información de la carga.....	115
Figura 57. Coordenadas radiales.	116
Figura 58. Módulo de elasticidad de cada capa.	116
Figura 59. Ventana de resultados KENLAYER.	117
Figura 60. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.....	117
Figura 61. Información general simulación pavimento flexible.	118
Figura 62. Coeficientes de fatiga para asfalto bituminoso.....	119
Figura 63. Coeficientes de deformación para asfalto bituminoso.	119
Figura 64. Repeticiones de carga para cada periodo.....	120
Figura 65. Repeticiones de carga para el periodo 1.....	121
Figura 66. Ventana de resultados KENLAYER.	121
Figura 67. Ventana de resultados KENLAYER.	122
Figura 68. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.....	122
Figura 69. Información general del software.	123
Figura 70. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.....	124
Figura 71. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.....	124
Figura 72. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.....	125
Figura 73. Módulo de elasticidad de cada capa.	125
Figura 74. Ventana de resultados KENLAYER.	126
Figura 75. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.....	126
Figura 76. Información general del software.	127
Figura 77. Repeticiones de carga para cada periodo.....	128
Figura 78. Repeticiones de carga para el periodo 1.....	128
Figura 79. Ventana de resultados KENLAYER.	129
Figura 80. Ventana de resultados KENLAYER.	129
Figura 81. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.....	130
Figura 82. Sección transversal pavimento flexible.	131

Figura 83. Detalle de cuneta y subdrenaje.....	131
Figura 84. Sección transversal pavimento rígido.....	139
Figura 85. TPDA y número de repeticiones.....	148
Figura 86. Diseño final pavimento flexible, [in].	148
Figura 87. Diseño final pavimento rígido, [in].	149
Figura 88. Esquema de aplicación de carga, [in].....	150
Figura 89. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible e= 4 [in].....	151
Figura 90. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible e= 4 [in].....	153
Figura 91. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 4 [in].	154
Figura 92. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible e= 3 [in].....	157
Figura 93. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible e= 3 [in].....	158
Figura 94. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 3 [in].	159
Figura 95. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].....	162
Figura 96. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].....	163
Figura 97. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].	164
Figura 98. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido e=8 [in].....	167
Figura 99. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido e=8 [in].....	168
Figura 100. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e=8 [in].....	169

Figura 101. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido e= 7 [in].	172
Figura 102. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido e= 7 [in].	173
Figura 103. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e= 7 [in].....	174
Figura 104. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido e= 9 [in].	177
Figura 105. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido e= 9 [in].	178
Figura 106. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e= 9 [in].....	179
Figura 107. Relación de daño a lo largo de la vida útil de los pavimentos.	182
Figura 108. Costo capitalizado a lo largo de la vida útil de cada tipo de pavimento.....	184

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Tamaño del agregado recomendado para hormigón reforzado con fibras de acero.....	17
Tabla 2	Áridos para Sub-base.....	18
Tabla 3	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 1.	19
Tabla 4	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 2.	20
Tabla 5	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 3.	20
Tabla 6	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 4.	21
Tabla 7	Serie de tamices para análisis granulométrico.	25
Tabla 8	Clasificación de suelo según granulometría.....	27
Tabla 9	Clasificación de suelos según CBR.....	33
Tabla 10	Clasificación funcional de las vías en base al TPDA.....	36
Tabla 11	Periodo de diseño.....	40
Tabla 12	Factor de distribución de carril.....	41
Tabla 13	Ecuaciones para obtener ejes equivalentes según el tipo de eje.	42
Tabla 14	Índice de serviciabilidad	43
Tabla 15	Niveles de confiabilidad sugeridos	43
Tabla 16	Desviación estándar total (So).....	44
Tabla 17	Desviación Estándar Normal	44
Tabla 18	Calidad de Drenaje.....	48
Tabla 19	Coeficientes de drenaje para Pavimentos Flexibles	48
Tabla 20	Efecto de la sub-base no tratada sobre los valores de k.	52
Tabla 21	Valores k de diseño para sub-bases tratadas con cemento	52
Tabla 22	Tasas anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección correspondientes.....	53

Tabla 23	Factor de dirección según el sentido de la vía.	54
Tabla 24	Parámetros de entrada generales para KENLAYER.	68
Tabla 25	Principales productos del territorio en estudio.	76
Tabla 26	Cuadros de resumen conteo vehicular.	78
Tabla 27	Resumen Diario de vehículos. Entrada a la Libertad.	83
Tabla 28	Resumen Diario de vehículos. Salida a la Libertad.	84
Tabla 29	Volumen anual de tráfico. Entrada a La Libertad.	85
Tabla 30	Volumen anual de tráfico. Entrada a La Libertad.	85
Tabla 31	Cálculo del TPDA. Entrada a La Libertad.	86
Tabla 32	Cálculo del TPDA. Salida a La Libertad.	86
Tabla 33	TPDA Total.	87
Tabla 34	Composición de TPDA (Vehículos pesados), periodo de retorno 10 años.	88
Tabla 35	Factor equivalente para CAMION 2D.	88
Tabla 36	Factor de Equivalencia (FCE).	89
Tabla 37	Datos de resistencia para capa de rodadura de hormigón.	97
Tabla 38	Datos de ADT diseño y Repeticiones esperadas.	100
Tabla 39	Datos de carga vehicular y repeticiones esperadas de ejes simples.	101
Tabla 40	Esfuerzo equivalente – Concreto sin berma (Eje simple/Eje Tándem).	101
Tabla 41	Factor de erosión – Doweled Joint, Concreto sin berma (Eje simple/Eje Tándem).	102
Tabla 42	Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes simples.	103
Tabla 43	Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes simples.	104
Tabla 44	Datos de carga vehicular y repeticiones esperadas de ejes tándem.	105
Tabla 45	Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes tándem.	105
Tabla 46	Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes tándem.	107
Tabla 47	Resumen de resultados de pavimento rígido.	107
Tabla 48	Coeficiente de Poisson según la edad y el nivel de carga.	108
Tabla 49	Tabla de propiedades del hormigón con fibras de acero.	109
Tabla 50	Propiedades de los materiales.	109

Tabla 51 Número de repeticiones por periodo de 2 meses.....	120
Tabla 52 Costo horario de maquinaria.	132
Tabla 53 Costo horario de maquinaria pavimento flexible.....	134
Tabla 54 Rubros de construcción pavimento flexible.	135
Tabla 55 Análisis de precios unitarios pavimento flexible.....	135
Tabla 56 Presupuesto de construcción pavimento flexible.....	136
Tabla 57 Rubros de mantenimiento.	137
Tabla 58 Análisis de precios unitarios mantenimiento.....	137
Tabla 59 Presupuesto de mantenimiento del pavimento flexible.....	138
Tabla 60 Costo horario de maquinaria.	140
Tabla 61 Costos de maquinaria pavimento rígido.	142
Tabla 62 Rubros de construcción pavimento rígido.	142
Tabla 63 Análisis de precios unitarios pavimento rígido.....	143
Tabla 64 Presupuesto de construcción pavimento rígido.....	144
Tabla 65 Rubros de mantenimiento pavimento rígido.	145
Tabla 66 Análisis de precios unitarios de mantenimiento pavimento rígido.	145
Tabla 67 .Presupuesto de mantenimiento pavimento rígido.....	146
Tabla 68 .Presupuesto de mantenimiento pavimento rígido.....	147
Tabla 69 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].	150
Tabla 70 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].	152
Tabla 71 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].	153
Tabla 72 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in]. ...	155
Tabla 73 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].	155
Tabla 74 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].	156

Tabla 75 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].	157
Tabla 76 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].	159
Tabla 77 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].	160
Tabla 78 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].	160
Tabla 79 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].	161
Tabla 80 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].	162
Tabla 81 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].	164
Tabla 82 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].	165
Tabla 83 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].	165
Tabla 84 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].	166
Tabla 85 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].	167
Tabla 86 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].	169
Tabla 87 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].	170
Tabla 88 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].	170
Tabla 89 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].	171
Tabla 90 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].	172
Tabla 91 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].	174
Tabla 92 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].	174

Tabla 93 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].	175
Tabla 94 Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].	176
Tabla 95 Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].	177
Tabla 96 Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].	178
Tabla 97 Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].	179
Tabla 98 Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].	180
Tabla 99 Relación de daño a lo largo de la vida útil – Pavimento flexible e=5 [in].	181
Tabla 100 Relación de daño a lo largo de la vida útil – Pavimento rígido e=8 [in].	181
Tabla 101 Costo de mantenimiento rutinario y periódico – Pavimento flexible y rígido.	182
Tabla 102 Costo acumulado de construcción y mantenimiento – Pavimento flexible y rígido.	183

RESUMEN

Ecuador, siendo sus principales medios de desarrollo socio-económico la agricultura y la ganadería, no cuenta con un sistema de red vial rural de óptimas condiciones para el transporte de productos desde su origen hasta el punto de comercialización.

El presente trabajo desarrolla un análisis comparativo de costo – beneficio entre dos tipos de pavimentos, rígido usando hormigón con fibras de acero, y flexible empleando asfalto bituminoso colocado en frío, aplicado sobre empedrados existentes.

Para el diseño del pavimento flexible se utilizó el método empírico de la AASHTO-93, y para el diseño del pavimento rígido el método de la Portland Cement Association (PCA). Como apoyo al diseño se ha tomado las “Normas de Diseño Geométrico del MTOP”, las cuales son las que rigen en Ecuador.

Mediante la simulación que representa la estructura de cada pavimento, en el paquete computacional KENLAYER, se realizó una comparación de la deformación y esfuerzos en cada capa de la estructura y rango de daño, por medio de la aplicación de una carga de 8.2 toneladas de un eje estándar de diseño, que representa el paso del tráfico diario en la zona de estudio. Para el análisis del costo se realizó un presupuesto de cada tipo de pavimento para un kilómetro de longitud de vía, empleando el análisis de precios unitarios de cada rubro.

Palabras clave: Pavimento. Empedrado. Costo. Beneficio. Hormigón. Asfalto.

ABSTRACT

Ecuador, being its main means of socio-economic development, agriculture and livestock, does not have a rural road network system of optimal conditions for the transport of food from its origin to the point of commercialization.

This work develops a comparative cost-benefit analysis between two types of pavements, rigid using concrete with steel fibers and flexible using cold-placed bituminous asphalt, applied on existing cobblestones.

The empirical method of AASHTO-93 was used for the design of the flexible pavement, and for the design of the rigid pavement the Portland Cement Association (PCA) method. To support the design, the "Geometric Design Standards of the MTOP" have been taken, which are those that govern Ecuador.

By means of the simulation that represents the structure of each pavement, in the KENLAYER computer package, a comparison of the deformation and stresses in each layer of the structure and damage range was made, by applying a load of 8.2 tons of a standard design axis, which represents the passage of daily traffic in the study area. For the cost analysis, a budget was made for each type of pavement for a kilometer of track length, using the unit price analysis for each item.

Keywords: Pavement. Paved. Cost. Benefit. Concrete. Asphalt.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las carreteras rurales en el Ecuador no reciben la importancia necesaria, siendo el sector rural, lugar donde se encuentran dos de los principales factores de mejora en el ámbito social y económico del Ecuador, como son la agricultura y la ganadería. El mal estado de la red vial antes señalada incurre de manera negativa en el avance económico y de producción en el país, provocando un bajo acceso a los productos agrícolas y ganaderos producidos la mayoría en las zonas rurales del Ecuador. (MTOPE Ecuador, 2013).

El presente trabajo está enfoca en la red vial rural de la parroquia “La Libertad” ubicada en la provincia del Carchi, como un ejemplar representativo de las vías existentes en el cantón Espejo, la cual según el (Grupo ACME, 2015) *“La Parroquia La Libertad tiene aproximadamente 15 km de asfaltado, 3 km de adoquinado, 120 km entre empedrado y lastrado de los cuales hay un 40% de vías atendidas y caminos de tierra equivalentes al 60% restante”*, esto nos indica que la mayoría de vías son empedradas y deberían ser intervenidas para mejorar el servicio que prestan, ya que la mayoría del parque automotor que circula son vehículos pesados y provocan una mayor exigencia a la superficie de la vía, debido a esto los dos tipos de pavimentos, rígido y flexible serán comparados y colocados sobre el empedrado, que se empleará como base.

En varios países de Latinoamérica se realiza repavimentación con pavimento flexible colocados sobre los empedrados. En el caso de Ecuador sólo se han realizado análisis sobre cómo afecta el estado de las vías con el entorno social, mas no un diseño específico de pavimento rígido o flexible sobre empedrado. Existen investigaciones que citan la capacidad de las vías empedradas, en ellas se manifiestan datos importantes como es, el estado del suelo que conforma la subrasante que es pre-consolidado esto quiere decir que su densidad posee valores altos, contribuyendo con las propiedades mecánicas de la estructura. (Caiza, 2011)

1.2 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar comparativamente el costo y durabilidad de un pavimento de hormigón con fibras de acero tipo Dramix y un pavimento de asfalto en frío, mediante el uso del software KENLAYER simulando la estructura del pavimento, utilizando las propiedades del suelo, incluido el empedrado, y la nueva capa de rodadura que tendrá dos opciones de espesores según corresponda al tipo de pavimento, aplicando una carga cíclica de 8.2 toneladas de un eje estándar de diseño, el número de ciclos se definirá por análisis de tráfico; esto para determinar el espesor de la capa de rodadura mínimo, así como el tipo de pavimento más rentable y resistente a la hora de mejorar la serviciabilidad de las vías en zonas rurales.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las características del suelo del sitio de estudio, aplicando ensayos de laboratorio específicos para cada caso, alimentando al software con características lo más cercanas a las condiciones reales del sitio de estudio.
- Realizar un análisis de tráfico en el sector rural de la provincia del Carchi, cantón Espejo, parroquia La Libertad, mediante conteo in situ, para obtener el número de ciclos que se ingresaran en el software de simulación.
- Determinar los parámetros de deformación y esfuerzo, al igual que el rango de daño que proporciona el software, para el caso de los diferentes espesores de capa de rodadura, y así seleccionar el espesor óptimo que genere la menor cantidad de daños a la estructura.
- Detallar el presupuesto de construcción y mantenimiento para un kilómetro de longitud de los dos tipos de pavimento, mediante el análisis de precios unitarios, y así conocer el costo de implementación de los mismos.
- Comparar los dos tipos de pavimentos tanto en resistencia mecánica, serviciabilidad, costo de construcción y mantenimiento, aplicando gráficos estadísticos, con lo cual se podrá establecer qué tipo de estructura es la recomendada a la hora de realizar la pavimentación en redes viales empedradas.

1.3 ALCANCE

La finalidad del presente proyecto, es simular una nueva estructura para la vía actual (empedrado) de la parroquia La Libertad, ubicada en el cantón Espejo en la provincia del Carchi, más la superficie de rodadura a diseñar, tanto de asfalto colocado en frío como de hormigón con fibras de acero, mediante el modelamiento en el paquete computacional KENLAYER, en el cual se aplicará una carga dinámica de 8.2 toneladas de un eje estándar de diseño, definida por el tráfico que circula en el sector, para un periodo de diseño de 10 años. Cabe mencionar que el software KENLAYER, trabajará en el rango lineal, el cual se basa en la aplicación de la teoría multicapa de Burmister, así como el uso de elementos finitos como herramienta de análisis.

El espesor de la capa de rodadura de asfalto colocado en frío será diseñado con el método de la AASHTO 93, a partir de este espesor disminuirá 1 pulgada para el segundo modelo y se aumentará 1 pulgada para el tercer modelo; y el pavimento de hormigón con fibras de acero será diseñado con el metodología de la Portland Cement Association(PCA), además se variará el espesor tomando el mismo criterio antes mencionado. Para la simulación de la estructura con capa de rodadura flexible se optará por el asfalto bituminoso colocado en frío, y para el pavimento rígido se implementará la combinación hormigón con fibras de acero tipo Dramix. Posteriormente se presupuestará la construcción y mantenimiento para un kilómetro de longitud de cada tipo de pavimento, mediante la ayuda del análisis de precios unitarios.

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Con esta investigación se analizará cuál sistema de pavimentación tiene una mayor durabilidad, a su vez un costo de construcción y mantenimiento menor, esto dependerá de las condiciones a las cuales estarán expuestas, tanto climáticas, constructivas como mecánicas.

La resistencia estructural de los pavimentos es un punto importante dentro de la investigación, ya que teóricamente el pavimento rígido de hormigón reforzado con fibras disipa de mejor manera las cargas vehiculares, logrando que el área de distribución sea relativamente amplia, de esta forma se generan menores daños

con el pasar del tiempo. Mientras que los pavimentos flexibles, en este caso de asfalto colocado en frío, distribuyen las cargas en un área más pequeña.

En teoría, la ventaja que tendría el pavimento flexible de asfalto en frío, es en el tipo de base que necesita para ser colocado, ya que no es necesario tener una estructura multicapa bajo la misma, como es el caso del pavimento bituminoso en caliente. Además, al momento de realizar mantenimiento a la vía, su complejidad sería baja, ya que, desde el punto de vista constructivo, es más simple su reparación ante posibles daños, y la cantidad de material a usarse sería relativamente menor. (Hurtado, 2016)

El empedrado existente se convertiría en una base resistente ya que el asfalto en si mismo no es la fuente de fortaleza en una estructura de pavimento. (Carter, 2003)

En la mayoría de diseños de pavimentos porosos se utiliza como base grava de diámetros mayores a la que se usa comúnmente, esta técnica ayuda al drenaje para evitar daños en el pavimento debido al agua superficial. Con un diseño e instalación adecuados, los pavimentos de asfalto porosos pueden proporcionar una solución rentable para la gestión de aguas pluviales. (U.S. Department of Transportation , 2015). Para esta investigación se usará el mismo criterio excepto que se reemplazará esta grava con el empedrado ya existente.

Debido a que en el sitio de estudio se presentan precipitaciones muy a menudo, se debe controlar la humedad. El agua migra a la estructura del pavimento a través de combinaciones de infiltración en la superficie, entradas de borde, y desde el nivel freático subyacente. En ambientes fríos, la humedad puede sufrir ciclos estacionales de congelación/descongelación. La humedad dentro del sistema del pavimento casi siempre tiene efectos perjudiciales sobre el rendimiento del mismo. (U.S. Department of Transportation , 2006)

Los materiales utilizados para construir una base se eligen por sus capacidades inherentes de distribución de carga y drenaje, cuando se colocan correctamente. Aquí se consideran dos tipos diferentes de material: material granular sin unir y Cement Bound Material. Los materiales no unidos pueden aflojarse y eliminarse con bastante facilidad mientras que los materiales ligados se fijan y , por consiguiente, son más difíciles de aflojar y retirar. (AJ McCormanck and Son, 2019) Con base en esto se puede teóricamente afirmar que el empedrado servirá como

una base de gran capacidad, y al ser compactada por varios años trabajará como un material “ligado”.

Con el análisis costo-beneficio y experimentación se lograría tener un conocimiento más cercano de lo que hoy, en el país, sólo se conoce teóricamente, tomando en cuenta además las ventajas y desventajas de los dos sistemas de pavimentación planteados

1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

El método AASHTO-93 para diseño de pavimentos flexibles ha sido utilizado en muchos trabajos de investigación alrededor de todo el mundo, en el Ecuador se ha empleado en la mayoría de obras viales que se han realizado en los últimos años. La metodología de la AASHTO-93, detalla el diseño de la estructura de los pavimentos flexibles. (MTOE Ecuador, 2013). Por esta razón para estimar el espesor del pavimento flexible se usará este procedimiento como referencia.

En este estudio se analizará el costo, que es una variable muy importante, y la durabilidad de cada tipo de pavimento estudiado. Para obtener resultados de la estructura multicapa, se modelará en el software KENLAYER (Huang, 2004); el cual trabaja a partir de la teoría multicapa de Burmister mediante el estudio basado en elementos finitos; dos estructuras de pavimento, tanto rígido como flexible que representen la estructura del suelo incluido el empedrado sobre la cual se colocará la nueva capa de rodadura, dos opciones o espesores para pavimento rígido de hormigón con fibras de acero, y dos para pavimento flexible de asfalto en frío. Se determinará el mínimo espesor necesario para que no existan daños permanentes y significativos tanto en las capas inferiores, es decir suelo y empedrado, como en la capa de rodadura; mediante el uso del software se obtendrá deformaciones y esfuerzos para determinar cuál de los sistemas se acopla mejor a las condiciones del medio rural, para lo cual se le aplicará una carga cíclica de 8.2 toneladas a un eje estándar de diseño. Para establecer el número de ciclos se usará un estudio de tráfico.

El método de la Portland Cement Association (PCA) para el diseño de pavimentos rígidos, es muy confiable y sencillo de implementar, por lo que se lo usará para diseñar el grosor de la superficie de rodadura. Y se analizarán dos espesores más,

uno superior y otro inferior al de diseño, con variación de 1 pulgada, de manera similar se hará en el pavimento flexible.

La AASHTO-93 también propone diseños para pavimentos rígidos, el motivo por el cual se adopta el método de la PCA es porque este último se centra en la vida útil del pavimento; ya que el fin es proporcionar capas de rodadura que perduren. (González & Vanegas, 2016)

Algunos estudios avalan la ventaja económica del pavimento rígido de hormigón en cuanto a materiales que se necesitan para su construcción; así como el consumo de combustible es menor en pavimentos de hormigón, en un rango entre el 1% y el 6% en comparación con los pavimentos bituminosos. (CEMEX, 2015)

1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El Carchi es una provincia del Ecuador netamente agrícola y ganadera, en especial en el sector rural del cantón Espejo, parroquia La Libertad, debido a esto, las vías que conectan estos sectores con las ciudades donde se comercializan sus productos, son de vital importancia, así que deberían estar en buenas condiciones; sin embargo la realidad es muy diferente, ya que la mayoría de los caminos en las redes rurales tienen como capa de rodadura solamente empedrados, el cual es muy usado por su bajo costo y escaso mantenimiento. (Grupo ACME, 2015)

Por esto se plantea buscar una alternativa que brinde mejor serviciabilidad en el sector de La Libertad, usando como base estos empedrados, con costos no tan elevados para los administradores de estas redes viales ni para los usuarios de las mismas, y así contribuir con el desarrollo socio-económico del sector rural y por ende del país, manteniendo un estándar alto en la reconstrucción de las vías más deterioradas pero que son las más usadas.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

En la actualidad las vías se consideran como un elemento fundamental en el desarrollo económico de un país, puesto que el transporte de productos se lo realiza principalmente por vía terrestre, es por esto que las carreteras deben estar en buen estado para poder prestar un buen servicio. El pavimento es la parte más importante de una carretera o calle, ya que sin esta estructura no se puede tener tránsito cómodo y seguro. La capa de rodadura es la cara de una carretera, por lo que la percepción del usuario se basa en la calidad de ésta, mas no del diseño estructural de las capas internas. (Zambrano, 2016)

Uno de los factores que causa más daño al pavimento de una carretera, es el transporte pesado, el mismo que produce deformaciones y esfuerzos que a lo largo del tiempo hacen que disminuya la serviciabilidad de la carretera, tornando un ambiente de incomodidad y peligro para los vehículos que circulan en ella. (Zambrano, 2016)

2.1 Tipos de pavimentos

Existen diferentes tipos de pavimento según sus características mecánicas, de manera general estos son:

- Pavimentos flexibles
- Pavimentos semirrígidos
- Pavimentos rígidos
- Pavimentos articulados (Ramos & Muñiz, 2013)

Para el desarrollo de este trabajo, se usarán únicamente los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos.

2.1.1 Pavimento flexible

Son aquellos que tienen una capa superficial asfáltica sobre una base granular. La distribución de esfuerzos y deformaciones generadas en la estructura del pavimento por las cargas del tráfico se produce de tal manera que la capa superficial y base toman los esfuerzos verticales de compresión de la subrasante,

por medio de la absorción de esfuerzos cortantes. En este proceso se desarrollan esfuerzos de deformación y tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica, que ocasionará su agrietamiento por fatiga debido a la repetición de las cargas de tráfico. En el mismo instante la repetición de los esfuerzos y deformaciones verticales de compresión que actúan en toda la estructura del pavimento producirán la formación de asentamientos en la zona del paso de la rueda, cuando el tráfico es desviado y supera al tráfico de diseño, y los materiales del pavimento no son homogéneos produciendo además ondulaciones longitudinales, estos fenómenos se los puede ver en la Figura 1. (Facultad de Ciencias y Tecnología, 2004)

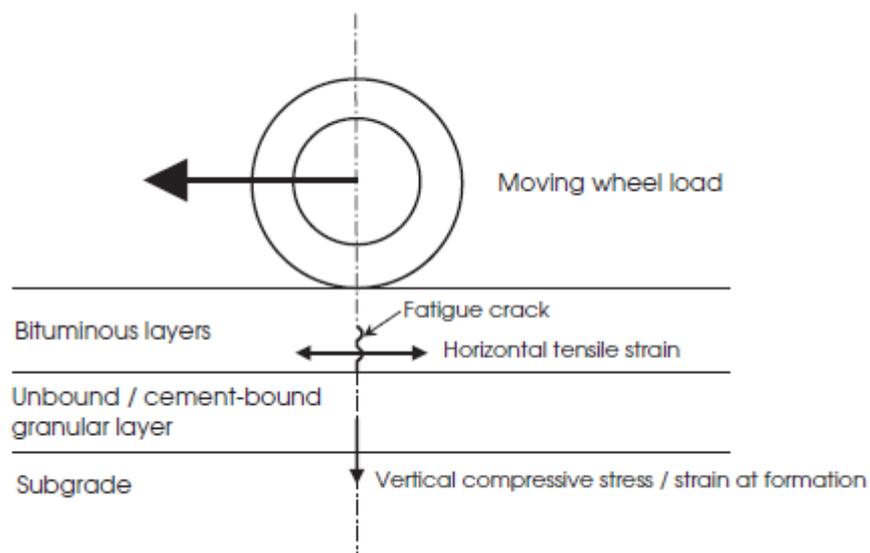


Figura 1. Tensiones críticas en una losa de pavimento de carretera bituminosa.

Fuente: (Rogers, 2003, pág. 232)

2.1.1.1 Estructura de pavimento flexible

El pavimento flexible consta de algunas capas, mostradas en la Figura 2, las cuales generalmente son: subrasante, subbase, base y capa de rodadura. La base y subbase son elementos estructurales que están ligados con la capa superior y su finalidad es distribuir las cargas del tráfico hacia la subrasante. (Burgos, 2014)

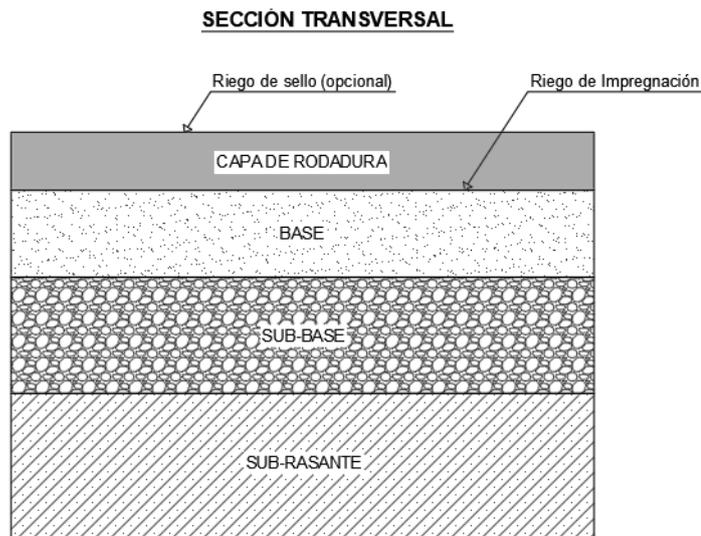


Figura 2. Sección Transversal de un Pavimento Flexible.

Obtenido de: (Burgos, 2014, pág. 34)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Algunas de las propiedades que tiene la estructura de un pavimento flexible son las siguientes:

- Impermeabilidad de la subrasante.
- Capacidad de absorber las cargas de tráfico, evitando deformaciones en la estructura.
- Tolerar erosiones producidas por agentes físicos y químicos.
- Generar seguridad y confort a los usuarios a través de una capa de rodadura adecuada.
- Flexibilidad para poder adaptarse a fallas que pueden generarse en el transcurso de su vida útil. (Burgos, 2014)

2.1.1.2 Mezclas bituminosas colocadas en frío

Las mezclas bituminosas colocadas en frío se caracterizan por la combinación de áridos gruesos con una emulsión bituminosa y en ocasiones aditivos para mejorar la adherencia árido-ligante. Estas mezclas pueden considerarse “ecológicas” ya que su elaboración no requiere el calentamiento previo de sus elementos, impidiendo emisiones de gases a la atmosfera y consumo elevado de energía. (Asociación técnica de emulsiones bituminosas, 2002)

2.1.1.3 Mezclas bituminosas coladas en caliente

Una mezcla bituminosa colocada en caliente se define como la combinación de materiales áridos y material ligante. Las características físicas de una mezcla están asociadas a las cantidades de material ligante y áridos que constituyan la misma. El proceso de construcción se basa en calentar el agregado pétreo y a su vez el ligante a temperaturas elevadas y posteriormente colocar la mezcla inmediatamente en el sitio de la obra. (Zúñiga, 2015)

2.1.2 Pavimento rígido

El pavimento rígido está formado por una losa de concreto simple o armado, colocada directamente sobre una base o subbase, debido a la rigidez de la losa y su alto módulo de elasticidad, absorbe gran cantidad de los esfuerzos que se generan sobre el pavimento, produciendo una distribución equitativa de las cargas de los neumáticos, que provocan tensiones casi nulas en la subrasante. (Robles, 2018)

El hormigón presenta muchas ventajas al momento de ser usado en la construcción, específicamente en construcción de carreteras tenemos las siguientes:

- Alta resistencia ante elementos corrosivos y medios agresivos, además de una alta resistencia al fuego.
- Facilidad al momento de su puesta en obra.
- Debido a su plasticidad se le puede proporcionar la forma geométrica que se requiera.
- Brinda la posibilidad de proporcionarle diferentes características según requiera el medio donde se construirá la obra.

La producción del hormigón se la puede realizar en cualquier lugar, ya que, sus elementos constitutivos se encuentran en cualquier lugar del mundo. (Burgos, 2014)

2.1.2.1 Estructura de un pavimento rígido

El pavimento rígido tiene por principal característica en su estructura, la presencia de una losa de hormigón armado o simple según sea necesario; esta capa de rodadura tiene una resistencia elevada a la flexión que es considerado el esfuerzo

mayor, pero también está expuesta a otros esfuerzos de menor magnitud, como los abrasivos que son ocasionados por el paso de las llantas vehiculares, de compresión y tracción que se generan al momento que la losa fleja bajo las cargas vehiculares, o por la misma contracción natural del hormigón. (Burgos, 2014)

A diferencia del pavimento flexible, el pavimento rígido consta de tres capas solamente, como se muestra en la Figura 3, una menos que el flexible.

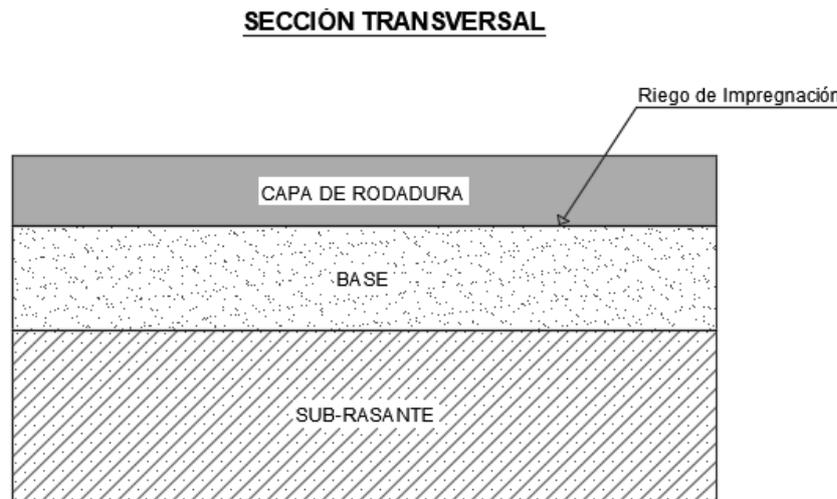


Figura 3. Sección Transversal de un Pavimento Rígido.

Obtenido de: (Burgos, 2014, pág. 54)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Originalmente la estructura del pavimento rígido, carecía de la capa base, debido al aumento del volumen de tráfico se presentó un fenómeno llamado bombeo, el cual hizo que el uso de una base bajo el pavimento se haga necesaria; la base solamente controlaría este fenómeno ya que la losa de hormigón es la que absorbe la mayoría de los esfuerzos que se producen debido a la carga vehicular. Las principales funciones de la capa base son las siguientes:

- Control de bombeo, este fenómeno consiste en la salida de material muy fino debido a la filtración de agua a través de las juntas del pavimento rígido. El agua filtrada satura y licúa las partículas finas de la subrasante ocasionando la evacuación hacia la superficie de estas partículas debido a la presión ejercida por las cargas de gran magnitud y frecuencia sobre la losa de hormigón.

- Mejora del drenaje, ya que la base es un material granular, facilita el drenaje debido a su porosidad y número de vacíos.
- Control de cambios de volumen, esta capa granular puede controlar los cambios de volumen que ocurran en la subrasante, permitiendo liberarse de estos esfuerzos extras a la losa de hormigón.
- Facilita la construcción, esta capa ayuda a tener una plataforma de trabajo de mayor regularidad, y debido a su drenaje no acumula agua en su superficie que interfiera con la construcción de la losa de hormigón. (Vega, 2018)

2.1.2.2 Tipos de pavimento rígido

En la tesis de grado de (Vega, 2018), menciona cuatro tipos de pavimento rígido, los cuales son: “*pavimento articulado de concreto simple (JPCP)*, *pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP)*, *pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP)* y *pavimento de concreto presforzado (PCP)*”.

- Pavimento articulado de concreto simple (JPCP), es el tipo de pavimento rígido más común, el control de grietas se lo realiza dividiéndolo en losas individuales separadas entre 4.5 y 9.0 metros, el JPCP no presenta ningún refuerzo de acero, pero si utiliza juntas transversales mediante el uso de pasadores o dovelas, y barras de unión como juntas longitudinales, ver Figura 4. (Vega, 2018)

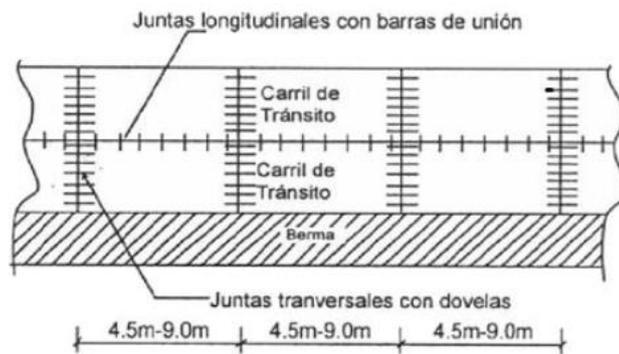


Figura 4. Diagrama de un pavimento JPCP.

Fuente: (Vega, 2018, pág. 14)

- Pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP), presenta refuerzo con acero el cual permite separar mucho más las juntas del pavimento (estimado

de 9.0 a 30.0 metros), más no aumenta la capacidad portante de la estructura. Este tipo de pavimento rígido debido a su gran separación entre juntas presentan juntas transversales y longitudinales, es decir pasadores y barras de unión, la cuantía de acero depende del espaciamiento entre juntas, se recomienda un espaciamiento máximo de 12.2 metros para obtener un diseño eficiente, ver Figura 5. (Vega, 2018)

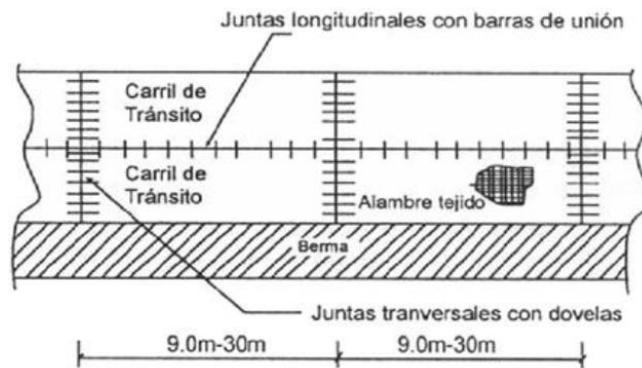


Figura 5. Diagrama de un pavimento JRCP.

Fuente: (Vega, 2018, pág. 15)

- Pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP), en este tipo de pavimento rígido no existe la presencia de juntas de contracción, esto hace que se generen grietas transversales que permanecen juntas debido al acero de refuerzo continuo, comúnmente estas grietas se forman en intervalos de 1.1 a 2.4 metros. El acero de refuerzo es útil al momento de controlar el ancho y el espacio entre juntas, pero no genera efecto alguno en la capacidad portante de la losa de hormigón, ver Figura 6. (Vega, 2018)

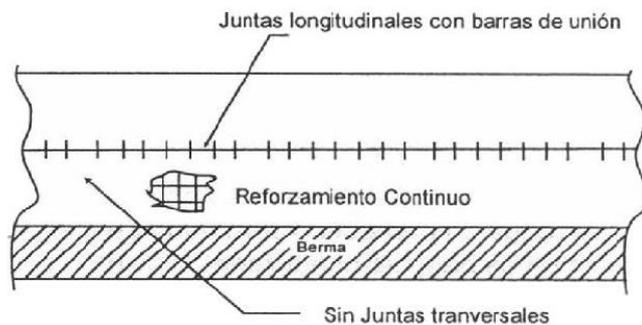


Figura 6. Diagrama de un pavimento CRCP.

Fuente: (Vega, 2018, pág. 16)

- Pavimento de concreto pre-esforzado (PCP), se conoce que el hormigón no posee gran capacidad de soportar esfuerzos de tracción, pero tiene gran capacidad ante esfuerzos de compresión, por esta razón al darle un pre-esfuerzo al hormigón se disminuye la tracción en la capa losa de hormigón debido al tránsito vehicular, así se logra que el espesor de la losa se reduzca. Este tipo de pavimento presenta baja probabilidad de agrietamiento y una cantidad reducida de juntas transversales, por esta razón resulta más económico y con una mayor vida útil. (Vega, 2018)

2.1.2.3 Hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA)

- **Fibras de acero:** Son pequeños pedazos de acero, su forma es alargada y delgada, es decir una de sus dimensiones es mucho mayor que las otras, su superficie puede ser lisa o corrugada esto depende de la marca y el tipo, es recomendable que las fibras sean corrugadas para obtener una mayor adherencia a la matriz cementante. (Silva, 2014)

Según la norma ASTM A820 existen cuatro tipos de fibras de acero, dependiendo de su fabricación, entre las cuales tenemos:

- Trefiladas: Son fibras de alambre conformadas en frío.
 - Láminas cortadas: Son fibras cortadas de chapas de acero.
 - Extractos fundidos: Son las fibras extraídas por fundición.
 - Otras fibras: Son fibras con otro proceso de fabricación diferentes a las ya citadas. (Silva, 2014)
- **Forma y sección de la Fibra de Acero:** En el mercado existen varios tipos de fibras de acero, por su forma, las más mencionadas son: planas, onduladas, con anclajes en los extremos, tipo omega, con puntas achatadas, etc., las cuales se pueden observar en la Figura 7. La forma de la fibra es de vital importancia en la adherencia con la matriz cementante, por esta razón las fibras con formas lisas y rectas se han visto reemplazadas por fibras con superficies rugosas y con terminaciones en gancho o con curvaturas. (Silva, 2014)

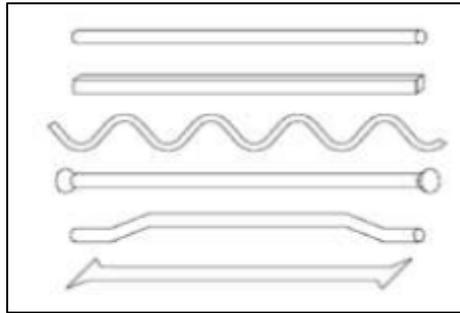


Figura 7. Diferentes formas de fibras de acero.

Fuente: (Silva, 2014, pág. 17)

Las secciones de las fibras de acero también tienen una clasificación determinada, las cuales se pueden observar en la Figura 8.

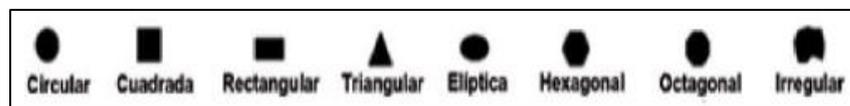


Figura 8. Clasificación de fibras.

Fuente: (Silva, 2014, pág. 17)

El hormigón al ser combinado con fibras de acero, mejora notablemente sus características físico-mecánicas. Al hormigón reforzado con fibras (HRFA) se lo compara directamente con el hormigón armado tradicional, debido a su desempeño.

Las ventajas más notables que adquiere el hormigón al incorporarse fibras de acero a su mezcla son:

- Mayor control de fisuración.
- Mejor resistencia a la abrasión.
- Disminución de la deformada bajo cargas permanentes.
- Mayor tenacidad.
- Ductilidad.
- Mayor durabilidad.
- Facilidad constructiva. (Silva, 2014)

En el campo de los pavimentos, al añadir altas cantidades de fibras de acero al hormigón, se soluciona la omisión de juntas en carreteras. Los resultados obtenidos a través de la historia han sido excelentes debido a que, las fibras controlan las tensiones que se generan por la ausencia de juntas de corte, además de

proporcionar diversas ventajas que elevan el rendimiento y durabilidad de las carreteras de alto tráfico. Dichas ventajas son:

- Incremento de la resistencia a la flexo-tracción en el hormigón.
 - Incremento de la resistencia a la fatiga del hormigón, es decir mayor durabilidad de la carretera frente a tráfico de maquinaria pesada.
 - Mayor resistencia a los impactos.
 - Control de apertura por posible fisura al momento de la retracción del hormigón.
 - Disminución de los gastos de mantenimiento de la carretera a lo largo de su vida útil. (Escámez, 2018)
- **Componentes del HRFA:** El HRFA requiere los mismos componentes que un hormigón típico, con la diferencia que, debido a la combinación con fibras de acero, algunos componentes deben cumplir con ciertas especificaciones que en un hormigón típico no son tan relevantes. (Silva, 2014)
- **Cemento y agua:** El tipo de cemento depende son de las condiciones o diseño que se requiera, más no de la combinación con fibras metálicas. Para el agua no existen condiciones diferentes a las de un hormigón típico, pero es necesario aumentar el volumen de pasta, esto se puede lograr si se aumenta el volumen de conglomerante en la relación agua-cemento, ya sea aumentando la cuantía de cemento o mediante el uso de algún aditivo extra. (Silva, 2014)
 - **Áridos:** Entre las características principales que deben poseer los áridos son una buena resistencia, no debe ser poroso, ya que se debe limitar la capacidad de absorción, además al agregar fibras de acero se debe controlar que exista mayor porcentaje de árido fino y menor de árido grueso, y su granulometría la (American Concrete Institute Committee 544, 2002) nos presenta la Tabla 1. (Silva, 2014)

Tabla 1

Tamaño del agregado recomendados para hormigón reforzado con fibras de acero.

U. S. standard sieve size	Percent Passing for Maximum Size of				
	$\frac{3}{8}$ in. (10 mm)	$\frac{1}{2}$ in. (13 mm)	$\frac{3}{4}$ in. (19 mm)	1 in. (25 mm)	$1\frac{1}{2}$ in. (38 mm)
2 (51 mm)	100	100	100	100	100
$1\frac{1}{2}$ (38 mm)	100	100	100	100	85-100
1 (25 mm)	100	100	100	94-100	65-85
$\frac{3}{4}$ (19 mm)	100	100	94-100	76-82	58-77
$\frac{1}{2}$ (13 mm)	100	93-100	70-88	65-76	50-68
$\frac{3}{8}$ (10 mm)	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
#4 (5 mm)	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
#8 (2.4 mm)	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
#16 (1.1 mm)	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
#30 (600 μ m)	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
#50 (300 μ m)	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
#100 (150 μ m)	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
#200 (75 μ m)	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

Obtenido de: (American Concrete Institute Committee 544, 2002, pág. 8)

2.2 Capas que forman parte de un pavimento

2.2.1 Subrasante

La estructura del pavimento esta soportada por la subrasante, una de sus características más desfavorables es su susceptibilidad a la deformación, por lo que es necesario fortalecerla mediante el uso de materiales que tengan una mayor resistencia mecánica y a la vez bajos niveles de deformación.

Es necesario hacer ensayos de laboratorio para obtener el tipo de suelo, capacidad de drenaje y capacidad portante, las cuales determinaran en gran medida el espesor del pavimento. (Herrera, 2014)

2.2.2 Sub-base

Según el (MTOP Ecuador, 2013) en la Norma Vial Ecuatoriana menciona que “Se denomina sub-base a la capa granular localizada entre la subrasante y la base granular en los pavimentos flexibles, y la capa que normalmente debe colocarse inmediatamente debajo de un pavimento rígido.”

Las características que deben tener los agregados para ser considerados sub-base son: mediante el ensayo de abrasión de los Ángeles deberá tener un coeficiente de desgaste máximo de 50%, la cantidad de muestra que pase el tamiz N°40 debe

tener un índice de plasticidad menor a 6 y también un límite líquido que no sobrepase 25, y un CBR igual o mayor al 30%. (MTOPEcuador, 2013)

Las sub-bases se pueden clasificar en:

- **Sub-base Clase 1:** Son formadas mediante trituración de rocas y clasificados según los límites de la granulometría Clase 1 (Ver Tabla 1). Tomando en cuenta que la trituración del árido grueso no debe ser menor a 30%.
- **Sub-base Clase 2:** Se obtienen de la pulverización o tamizado de gravas, a su vez presenta material fino como arena para alcanzar una granulometría Clase 2 (Ver tabla 1). Al igual que la Sub-base Clase 1, la trituración del árido no debe ser menor a 30%.
- **Sub-base Clase 3:** Está formada por áridos gruesos, adquiridos mediante cribado de gravas o roca mezclada con material fino, alcanzando la granulometría Clase 3 (Tabla 2). (MTOPEcuador, 2013)

Tabla 2
Áridos para Sub-base

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
3" (76.2mm)			100
2" (50.4mm)		100	-
1 1/2" (38.1mm)	100	70-100	-
N°4 (4.75mm)	30-70	30-70	30-70
N°40 (0.425mm)	10-35	15-40	-
N°200 (0.075mm)	0-15	0-20	0-20

Obtenido de: (MTOPEcuador, 2013, pág. 341)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.2.3 Base

Se coloca esta capa para proporcionar una mejor transmisión de esfuerzos hacia la sub-base y la subrasante, tratando así de reducir el espesor de la capa de rodadura ya que es el que tiene mayor costo. Entre sus características principales esta la fricción necesaria entre sus partículas y presencia de vacíos, que garantizan una buena resistencia y durabilidad ante agentes externos como el agua. (Burgos, 2014)

- **Base Clase 1:** Está formada por agregados finos y gruesos, triturados en su totalidad, son graduados uniformemente dependiendo de si son tipo A o tipo B (Tabla 3).
- **Base Clase 2:** Está compuesta por fragmentos de roca triturada, de la cual el 50% de material grueso en peso es triturado, deberá cumplir con la granulometría que indica la Tabla 4.
- **Base Clase 3:** Está compuesta por fragmentos de roca triturada, de la cual al menos el 25% de material grueso en peso es triturado, deberá cumplir con la granulometría que indica la Tabla 5.
- **Base Clase 4:** Está formada por material obtenido de la trituración de gravas o cribado de rocas fragmentadas naturalmente, cumpliendo los límites granulométricos (Tabla 6).

Tabla 3

Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 1.

TAMIZ		BASE CLASE 1 TIPO A		BASE CLASE 1 TIPO B	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2"	50mm		100		100
1 ½"	37.5mm	70	100	70	100
1"	25mm	55	85	60	90
¾"	19mm	50	80	45	75
3/8"	9.5mm	35	60	30	60
N°4	4.75mm	25	50	20	50
N°10	2mm	20	40	10	25
N°40	0.425mm	10	25	2	12
N°200	0.075mm	2	12		

Obtenido de: (MTOPEcuador, 2013, pág. 373)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 4

Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 2.

TAMIZ		BASE CLASE 2	
		Mín.	Máx.
2"	50mm		100
1 ½"	37.5mm	70	100

1"	25mm	55	85
¾"	19mm	47	75
3/8"	9.5mm	35	65
Nº4	4.75mm	25	55
Nº10	2mm	15	45
Nº40	0.425mm	5	25
Nº200	0.075mm	0	10

Obtenido de: (MTOPEcuador, 2013, pág. 374)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 5

Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 3.

TAMIZ		BASE CLASE 3	
		Mín.	Máx.
2"	50mm		100
1"	25mm	70	100
¾"	19mm	60	90
3/8"	9.5mm	40	75
Nº4	4.75mm	30	60
Nº10	2mm	15	45
Nº40	0.425mm	10	30
Nº200	0.075mm	0	15

Obtenido de: (MTOPEcuador, 2013, pág. 374)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 6

Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 4.

TAMIZ		BASE CLASE 4	
		Mín.	Máx.
2"	50mm		100
1"	25mm	60	90
Nº4	4.75mm	20	50
Nº200	0.075mm	0	15

Obtenido de: (MTOPE Ecuador, 2013, pág. 374)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.2.4 Capa de rodadura

La función principal de esta capa es preservar la estructura del pavimento, protegiéndola de filtraciones de agua que puedan ocurrir sobre o bajo esta capa, además contribuye en la absorción de cargas, brindándole mayor soporte al pavimento. (Burgos, 2014)

2.3 Datos necesarios para el diseño de pavimentos

Para diseñar un pavimento es necesario realizar algunos trabajos técnicos, que se utilizan para caracterizar el sitio donde se ubicará el proyecto vial, dando una idea de cómo se comportará la estructura del pavimento, estos son:

2.3.1 Estudio del tráfico

Uno de los factores que afecta directamente en el diseño de una vía es el estudio del tráfico, con el fin de compararlo con la capacidad máxima que la vía pueda resistir. Los datos obtenidos sobre el tráfico son actuales y deben incluir los volúmenes y tipos de vehículos, basados en estudios de tráfico futuro. (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

Para el estudio de vías en zonas rurales en nuestro país, la apreciación del tráfico es complicada e incierta y se da de manera frecuente, ya que Ecuador cuenta con extensas zonas poco desarrolladas. Los proyectos de vías en estas zonas están ligados a la tasa de crecimiento poblacional y a proyectos de ganadería, riego,

hidroeléctricas, comercio etc., por consecuencia el tráfico futuro debe ser analizado a partir de estos parámetros antes mencionados. (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

2.3.2 Estudio de mecánica de suelos

Estos permiten establecer algunos factores importantes como es la capacidad portante que tiene la subrasante del sitio donde se construirá la vía, esto incluye el módulo de resiliencia y módulo de reacción de la subrasante, tanto para pavimentos flexibles y rígidos. (Vega, 2018)

Los estudios que comúnmente se realizan previo al diseño de un pavimento tanto flexible como rígido son:

- Contenido de humedad.
- Límites de consistencia.
- Granulometría.
- Capacidad de soporte o CBR.

2.3.2.1 Contenido de humedad

El suelo es capaz de mantener agua en su estructura, la textura y estructura de las partículas definirán la cantidad de la misma. El contenido de humedad de un suelo se relaciona con la cantidad de agua que se retiene dentro de la porosidad existente en el suelo, y la masa que tienen las partículas del suelo. (Botía, 2015)

El contenido de humedad del suelo se calcula con la Ecuación 2.1:

$$W(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s - W_r} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

W_h = Masa de Recipiente + Suelo Húmedo [g].

W_s = Masa de Recipiente + Suelo Seco [g].

W_r = Masa del Recipiente [g]. (Botía, 2015)

2.3.2.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia o de Atterberg se centran en el estudio del comportamiento de suelos finos, estos límites son: cohesión, viscosidad, contracción, plástico y líquido. Para realizar la caracterización del suelo,

comúnmente se utilizan el Plástico y Líquido, ya que son parámetros esenciales. (Botía, 2015)

Se define al Límite Líquido en porcentaje de contenido de agua en el suelo, en el cual inferior a este posee un comportamiento plástico, en el caso que la humedad sobrepase este límite, el suelo se comportará semejante a un fluido viscoso. Este parámetro ayuda a terminar problemas de variación de volumen, presencia de asentamientos por consolidación y junto con el Límite Plástico definir la densidad máxima. (Botía, 2015)

Para obtener el Límite Líquido, se realiza el ensayo con el aparato de Casa Grande, del cual se obtiene una determinada cantidad de golpes de la cuchara de Casa Grande para que la muestra de suelo se encuentre en este límite, dependiendo del contenido de humedad de la misma, En la norma ASTM D 4318- 00 se encuentra el método de este ensayo. Posteriormente al ensayo se obtendrá un gráfico semilogarítmico semejante al de la Figura 9, del cual el Límite Líquido es el correspondiente al corte de la línea de tendencia a los 25 golpes. (Botía, 2015)

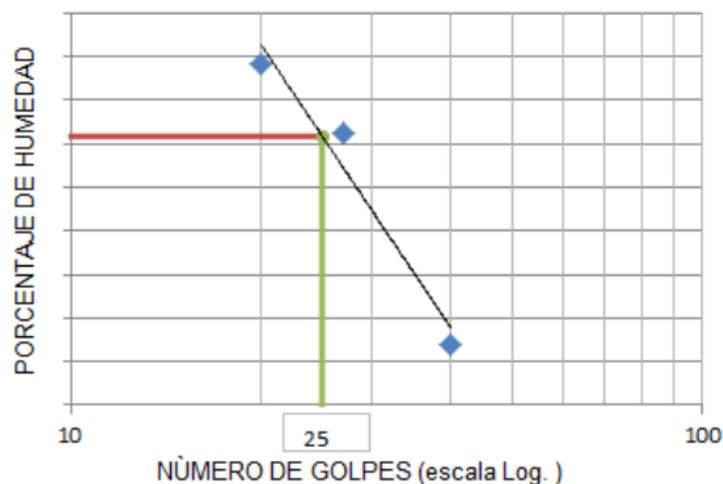


Figura 9. Gráfico límite líquido

Fuente: (Botía, 2015, pág. 46)

El Límite Plástico se ubica entre el estado plástico del material y el semi-sólido, este se define en porcentaje de contenido de humedad, como el instante en que al formar cilindros de suelo de alrededor 3mm de diámetro, estos comienzan a agrietarse. (Botía, 2015)

La expresión para determinar el Límite Plástico luego del ensayo se define la Ecuación 2.2.

$$LP = \frac{W1 + W2 + \dots + Wn}{n} \quad (2. 2)$$

Donde:

LP = Limite Plástico

W = Humedad Natural

n = Número de puntos de humedad tomados (Botía, 2015)

El índice plástico es la resta entre el Límite Líquido y el Límite Plástico, si se tiene un índice plástico bajo, quiere decir que el suelo es muy sensible a los cambios de humedad, haciendo el cambio de un estado semisólido a un estado líquido con pequeños incrementos de humedad, por otro lado si el índice plástico es alto, la cantidad de humedad que se debe añadir para que ocurra este cambio de estado es alta. (Botía, 2015)

El índice plástico lo calculamos con la Ecuación 2.3.

$$IP = LL - LP \quad (2. 3)$$

Donde:

IP = Índice de Plasticidad

LL = Limite Líquido

LP = Límite Plástico. (Botía, 2015)

2.3.2.3 Granulometría

Este ensayo radica en la agrupación de partículas de suelo que posean el mismo rango de tamaño, ya que no es posible obtener la medida exacta de un partícula de suelo, este procedimiento se realiza mediante la vibración que separa la muestra de suelo en grupos de partículas, las mismas que se pesan y se las considera como porcentaje de peso retenido de la muestra total, todo esto por medio del uso de tamices con diferentes aberturas cuadradas, las cuales se muestra en la Tabla 7. Como una convención se ha tomado el tamiz N°200 (0.075mm) como límite entre las partículas finas y gruesas.

Mediante una curva de distribución, la cual en el eje de las abscisas se tiene el diámetro de las partículas y en el eje de las ordenadas el porcentaje retenido de suelo, se muestra la variación de tamaños de las partículas que forman el suelo en

estudio. Cuando se tiene una curva de distribución bien graduada, es decir que hay una heterogeneidad de las partículas, se dice que el suelo es favorable esto en términos geotécnicos; caso contrario el suelo tendrá un comportamiento desfavorable. (Botía, 2015)

Tabla 7

Serie de tamices para análisis granulométrico.

TAMIZ	DIÁMETRO (mm)
3"	76.200
2 ½"	63.500
2"	50.800
1 ½"	38.100
1"	25.400
¾"	19.050
½"	12.700
3/8"	9.530
N°4	4.750
N°10	2.000
N°20	0.840
N°40	0.420
N°50	0.297
N°60	0.250
N°70	0.210
N°80	0.180
N°100	0.149
N°200	0.075

Obtenido de: (Botía, 2015, pág. 56)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Los cálculos que se realizan para obtener la curva granulométrica son:

- Porcentaje retenido mediante la Ecuación 2.4.

$$\%Retenido = \frac{Mr}{M_T} * 100 \quad (2.4)$$

Donde:

Mr = Masa retenida en el tamiz.

$M_T =$ Masa total.

- Porcentaje retenido acumulado mediante la Ecuación 2.5.

$$\% \text{Retenido Acumulado} = \text{Suma de porcentajes mayores o iguales} \quad (2.5)$$

- Porcentaje que pasa mediante la Ecuación 2.6.

$$\% \text{ que Pasa} = 100 - \% \text{Retenido Acumulado} \quad (2.6)$$

- Coeficiente de uniformidad mediante la Ecuación 2.7.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.7)$$

Donde:

D_{60} = Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 60 %.

D_{10} = Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 10 %.

- Coeficiente de curvatura mediante la Ecuación 2.8.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})} \quad (2.8)$$

Donde:

D_{60} = Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 60 %.

D_{10} = Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 10 %.

D_{30} = Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 30 %.

De acuerdo a la Tabla 8 obtenemos el tipo de agregado y su graduación.

Tabla 8

Clasificación de suelo según granulometría.

Cu > 4 y Cc entre 1 y 3	GW
Cu > 6 y Cc entre 1 y 3	SW
Si no cumple	GP o SP
GW	GRAVA BIEN GRADADA
SW	ARENA BIEN GRADADA
GP	GRAVA MAL GRADADA
SP	ARENA MAL GRADADA

Obtenido de: (Botía, 2015, pág. 62)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Una vez obtenidos los datos granulométricos, se obtiene la curva granulométrica, un ejemplo de dicha curva se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Curva granulométrica.

Fuente (Botía, 2015, pág. 63):

2.3.2.4 Densidad natural de una muestra.

Densidad de muestra del suelo o densidad aparente es utilizada para calcular la porosidad y relación de huecos, el peso del suelo por unidad de volumen, así como también el grado de compactación del suelo. Este ensayo se lo debe realizar inmediatamente en el proceso de muestreo ya que el suelo puede perder humedad y existirá un mayor error en los resultados del ensayo.

Existen dos métodos de ensayo para la medición de la densidad, los mismo que se emplean en suelos que conservan su forma durante el procedimiento, también puede aplicarse a materiales como suelo de cemento, suelo de cal y suelo de bentonita. (ASTM D 7263, 2009)

Método A. En este método se mide el volumen de la muestra cubierto por cera mediante el valor de la cantidad de agua desalojada. Este método aplica solamente en muestras en que la cera no penetra la superficie exterior. Se calcula mediante la Ecuación 2.9. (ASTM D 7263, 2009)

$$\rho_m = \frac{M_t}{\left[\left(\frac{M_c - M_{sub}}{\rho_m}\right) - \left(\frac{M_c - M_t}{\rho_p}\right)\right]} \quad (2.9)$$

Donde:

Mt = Masa húmeda del espécimen total del suelo, g

Mc = Masa de la muestra recubiertas de cera, g

Msub = Masa de la muestra parafinados sumergidos, g

Pm = Densidad del agua a la temperatura de ensayo, g

Pp = Densidad del total (húmedo) muestra de suelo, g. (ASTM D 7263, 2009)

Método B. Este procedimiento se basa en la medición directa de las dimensiones (altura, diámetro, longitud, ancho) y masa de la muestra que generalmente se moldea en una forma cilíndrica o cubica. Se calcula mediante la Ecuación 2.10. (ASTM D 7263, 2009)

$$\rho_m = \frac{M_t}{V} \quad (2.10)$$

Donde:

V = Volumen de la muestra de suelo húmedo, cm

Para formas cilíndricas

Se calcula mediante la Ecuación 2.11.

$$V = \frac{\pi * d^2 * h}{4000} \quad (2. 11)$$

Donde:

d = Diámetro medio de la muestra, mm

h = Altura media espécimen, mm

Para formas cúbicas

Se calcula mediante la Ecuación 2.12.

$$V = \frac{l * w * h}{4000} \quad (2. 12)$$

Donde:

l = Longitud media, mm

w = Anchura media, mm

h = Altura media, mm. (ASTM D 7263, 2009)

2.3.2.5 **Ensayo de compactación - proctor modificado.**

La compactación es la reducción de la relación de espacios de vacío en una masa de suelo, y por ende es el acercamiento de las partículas del mismo. La compactación en los suelos ocasiona que las propiedades mecánicas del mismo mejores, tales como, la resistencia al corte, menos deformaciones, incremento del peso específico seco y una mejora en la permeabilidad. (Botía, 2015)

El objetivo de este ensayo radica en obtener una curva que se la denomina curva de compactación, la cual relaciona el contenido de agua en el suelo con su peso seco unitario, estos datos se obtienen a partir de ensayos realizados en moldes de 4 o 6" de diámetro. (Botía, 2015)

El ensayo de proctor modificado en laboratorio se aplica dependiendo del porcentaje retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ ", es decir tenemos varios métodos según sea el caso, para esto tenemos:

- **Método "A":** Este método se usa cuando el 20% o menos del peso total del suelo se retiene en el tamiz #4 (4.75mm), el molde a usar es de 4" de diámetro, el material a usar es el que pasa por el tamiz #4, el número de capas son 5 y el número de golpes por capa es 25.

- **Método “B”:** Este método se usa cuando más del 20% del peso total del suelo se retiene en el tamiz #4 (4.75mm) y 20% o menos en el tamiz 3/8” (9.5mm), el molde a usar es de 4” de diámetro, el material a usar es el que pasa por el tamiz 3/8”, el número de capas son 5 y el número de golpes por capa es 25.
- **Método “C”:** Este método se usa cuando el 20% del peso total del suelo se retiene en el tamiz 3/8” (9.5mm) y menos del 30% es retenido en el tamiz 3/4” (19.0mm), el molde a usar es de 6” de diámetro, el material a usar es el que pasa por el tamiz 3/4”, el número de capas son 5 y el número de golpes por capa es 56. (Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, 2006)

Una vez que se determina el método a usar, se prepara la muestra para realizar el ensayo, según sea el método se aplica la energía de compactación (número de golpes) utilizando un pisón de 4536 gramos con una altura de caída de 457.2 milímetros, se debe proporcionar cantidades de agua para obtener al menos 4 especímenes con contenido de humedad lo más cercano al óptimo, estos contenidos de humedad normalmente varían alrededor del 2% entre ellos. Se deben pesar los moldes sin el collarín para cada contenido de humedad, estos datos son los que se reflejan en la curva de compactación. (Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, 2006)

Terminado el ensayo se procede a realizar los siguientes cálculos:

- Área del molde utilizando la Ecuación 2.13.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (2. 13)$$

Donde:

A = Área del molde.

D = Diámetro del molde.

- Volumen del molde mediante la Ecuación 2.14.

$$V = A * H \quad (2. 14)$$

Donde:

V = Volumen del molde.

H = Altura del molde.

- Porcentaje de humedad mediante la Ecuación 2.15.

$$W(\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s - W_r} * 100 \quad (2.15)$$

Donde:

W_r = Masa del recipiente.

W_h = Masa de recipiente más suelo húmedo.

W_s = Masa de recipiente más suelo seco.

- Densidad húmeda mediante la Ecuación 2.16.

$$\rho_{hum} = \frac{W_{hum}}{V} \quad (2.16)$$

Donde:

ρ_{hum} = Densidad húmeda.

W_{hum} = Peso de la muestra húmeda.

V = Volumen del molde.

- Densidad seca mediante la Ecuación 2.17.

$$\rho_s = \frac{\rho_{hum}}{1 + W} \quad (2.17)$$

Donde:

ρ_s = Densidad seca.

W = Porcentaje de humedad. (Botía, 2015)

Una vez realizado los cálculos, se procede a graficar la curva de compactación, podemos observar un ejemplo de dicha curva en la Figura 11.

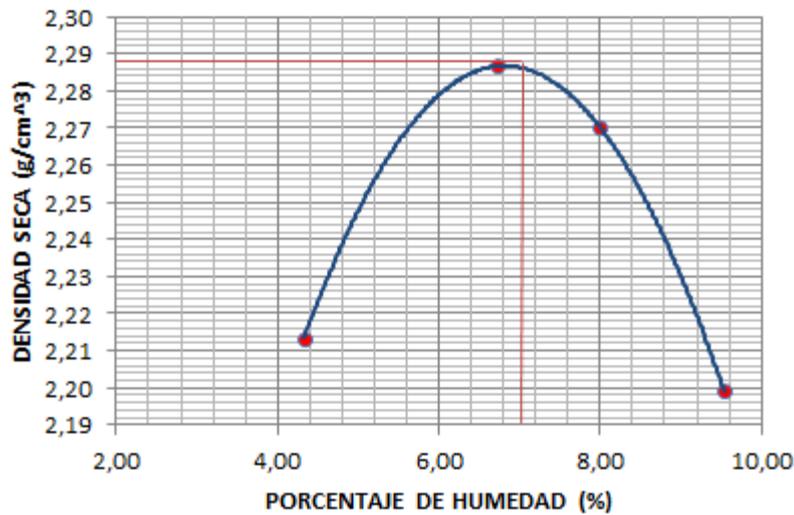


Figura 11. Curva de compactación.

Fuente: (Botía, 2015, pág. 153)

2.3.2.6 Capacidad de soporte o CBR.

El California Bearing Ratio también llamado “CBR”, es un método desarrollado por la División de Carreteras de California en 1929, teniendo como finalidad clasificar la capacidad del suelo, para así poder ser utilizado como un material de base o sub-base. El procedimiento para este ensayo en laboratorio se lo realiza bajo condiciones de humedad y densidad controladas, con las cuales se mide la resistencia al corte de una muestra de suelo en su estado actual.

Este método es clave en el cálculo de los espesores que conforman los pavimentos flexibles, ya que evalúa la resistencia que puede tener los materiales que serán usados como base y sub-base en dichas estructuras, así como también obtener datos del suelo bajo la estructura como la pérdida de resistencia provocada por la saturación del mismo. Mediante la Tabla 9 se observa la clasificación general para el suelo en base a valores de CBR. (Botía, 2015)

Tabla 9

Clasificación de suelos según CBR

Valor CBR	Clasificación General	Usos
0-3	Muy Pobre	Subrasante
3-7	Pobre a Regular	Subrasante
7-20	Regular	Sub-base
20-50	Bueno	Base, Sub-base
>50	Excelente	Base

Obtenido de: (Botía, 2015, pág. 133)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Como menciona (Botía, 2015), “El valor de CBR se obtiene mediante la relación de la carga unitaria aplicada durante el ensayo y necesaria para lograr un valor de penetración del pistón de penetración y la densidad dada con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener una profundidad igual de penetración en una muestra estándar de material en condiciones de trituración.”

Para este ensayo se puede utilizar muestras tanto inalteradas como compactadas en laboratorio, se realiza la compactación de estas muestras utilizando el contenido de humedad óptimo. (Botía, 2015)

Luego de haber realizado el ensayo de CBR y el procesamiento de datos, se obtiene una curva de Carga vs Penetración similar a la Figura 12.

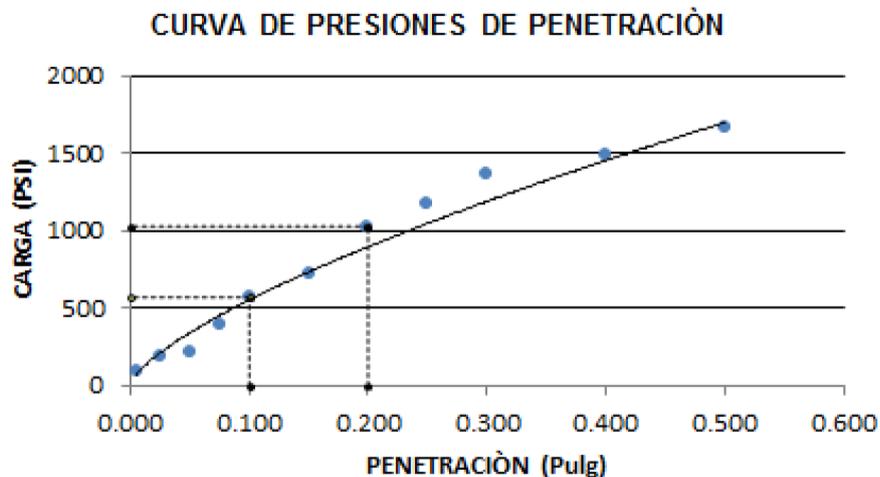


Figura 12. Curva de presiones de penetración.

Fuente: (Botía, 2015, pág. 142)

2.3.2.7 Ensayo de placa in situ.

El ensayo de placa o ensayo CBR in situ generalmente es usado para el estudio y diseño de pavimentos, que tiene como finalidad determinar la resistencia relativa de la subrasante, subbase y otros materiales de base bajo condiciones de humedad y densidad controladas. (ASTM D 4429 –04, 2012)

Para realizar el ensayo de placa y obtener datos para diseño, sin considerar la humedad, se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Grado de saturación es 80% o mayor.
- El material es grueso y no cohesivo, ya que no afecta los cambios en la humedad.
- El suelo no ha sido modificado durante los dos últimos años. (ASTM D 4429 –04, 2012)

Si el suelo donde fue realizado el ensayo es modificado es decir nivelado, cambio en la humedad o compactado, probablemente los resultados del ensayo serán inválidos. (ASTM D 4429 –04, 2012)

Para realizar este ensayo se requiere de algunos equipos que se detallan a continuación:

- **Gato mecánico de tornillo:** Sera operado manualmente y consta de una palanca giratoria para poder aplicar la carga al pistón de penetración que cumple con algunas especificaciones como:
 - Capacidad máxima 2700 kg
 - Altura mínima de elevación: 50mm
 - Relación de velocidad alta, 2.4 revoluciones para 1mm de penetración
 - Relación de velocidad media, 5 revoluciones para 1mm de penetración
 - Relación de velocidad baja, 14 revoluciones para 1mm de penetración
- **Anillos de carga:** se requieren dos anillos calibrados con amplitud de carga de 0 a 8.8 kN y otro de 0 a 22.6 kN.
- **Pistón de penetración:** diámetro de 50.8 ± 0.1 mm y área 19.35cm³ y longitud aproximada de 101mm.
- **Diales:** Se requieren dos diales para medir deformaciones, que cuenten con un soporte o abrazadera para la estabilidad y posición del dial.

- **Platina de sobrecarga:** Platina de acero de $250 \pm 0.5\text{mm}$ de diámetro y un peso de $4.54 \pm 0.01\text{ kg}$.
- **Pesas de sobrecarga:** dos pesas de $4.54 \pm 0.01\text{kg}$ y $216 \pm 1\text{ mm}$ de diámetro.
- **Vehículo de carga:** El vehículo funciona como la reacción a la carga aplicada, la cual debe ser aproximadamente de 31 kN (6970 lb). El ensayo requiere una altura mínima desde el suelo hasta el chasis de aproximadamente 0.6m (2 pies). (ASTM D 4429 –04, 2012)

Una vez terminado el ensayo, se obtienen datos con los cuales se realiza la curva Esfuerzo-Penetración para cada incremento de penetración que se realizó. En ciertos casos la curva presenta una sección cóncava en su inicio esto se debe a irregularidades de la superficie u otros factores, en este caso se debe realizar una corrección como se indica en la Figura 13. (ASTM D 4429 –04, 2012)

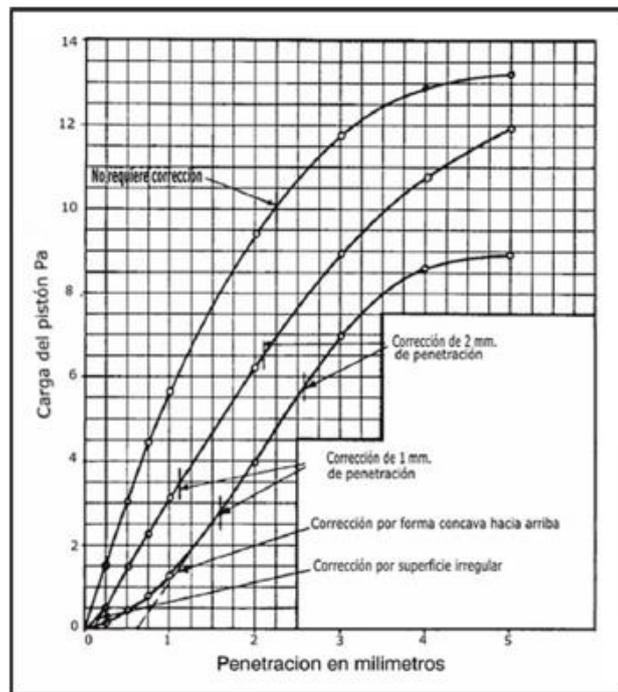


Figura 13. Corrección de la curva esfuerzo vs penetración.

Fuente: (ASTM D 4429 –04, 2012)

2.4 Clasificación de la red vial nacional

Las carreteras en el Ecuador se clasifican de la siguiente manera:

- Por capacidad (en función del TPDA)
- Por jerarquía en la red vial

- Por condiciones orográficas
- Por número de calzadas
- En función de la superficie de rodamiento (MTOPEcuador, 2013)

Las vías deberían ser diseñadas con características funcionales y geométricas de acuerdo a la cantidad de vehículos que circulan por las mismas, es decir por etapas de acuerdo al incremento del tráfico y presupuesto, por ende, la clasificación por capacidad es la más recomendable para el diseño (Tabla 10). (MTOPEcuador, 2013)

Tabla 10

Clasificación funcional de las vías en base al TPDA_d

Clasificación Funcional de las Vías en base al TPDA _d			
Descripción	Clasificación Funcional	Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA _d) al año de horizonte	
		Límite Inferior	Límite Superior
Autopista	AP2	80000	120000
	AP1	50000	80000
Autovía o Carretera Multicarril	AV2	26000	50000
	AV1	8000	26000
Carretera de 2 carriles	C1	1000	8000
	C2	500	1000
	C3	0	500

Obtenido de: (MTOPEcuador, 2013, pág. 64)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

TPDA = Tráfico Promedio Diario Anual.

TPDA = TPDA correspondiente al año horizonte o de diseño.

En esta clasificación considera un TPDA_d para el año horizonte se define como:

TPDA_d = Año de inicio de estudios + Años de Licitación, Construcción + Años de Operación.

C1 = Equivale a carretera de mediana capacidad.

C2 = Equivale a carretera convencional básica y camino básico.

C3 = Camino agrícola / forestal. (MTOPEcuador, 2013)

2.5 Diseño de pavimento flexible por el método AASHTO-93

La metodología de diseño AASHTO se basa en los resultados de los ensayos de carretera llamados AASHO (AASHO Road Test), desarrollado en Illinois-Estados Unidos al final de los años 50 y comienzo de los 60, obteniendo resultados que relacionaban el daño con la demanda de las carreteras experimentadas. Posteriormente en 1986 el subcomité de diseño de la AASHTO publicó la guía actual de diseño de pavimentos, luego de una revisión en 1993 se obtuvo la guía definitiva sin mayores cambios.

El método AASHTO introduce conceptos mecanicistas que priman la serviciabilidad como una medida de su capacidad en el diseño de pavimentos, de tal manera que la misma brinda una superficie lisa y suave para el usuario. (Vega, 2018)

2.5.1 Variables de diseño de pavimento flexible

2.5.1.1 Composición del tránsito

Para diseñar de pavimentos es tomada en cuenta la funcionalidad vehicular, ya que en el mercado hay diferentes tipos de tamaños y pesos de los mismos los cuales afectan directamente en el daño producido en el pavimento.

Existen dos clases generales de vehículos las cuales son; vehículos livianos que constituyen motos, automóviles, camionetas de ruedas sencillas en el eje trasero, y vehículos pesados como camiones, buses, con doble llanta en los ejes traseros. En el diseño de carreteras se debe establecer un control del tipo de vehículo que se afecta en la misma, a estos se los llama “vehículo de diseño” cuyo peso y dimensiones están especificadas en el Anexo 1. (MTOPEcuador, 2013)

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas clasifica los tipos vehículos de diseño de la siguiente manera:

- Vehículo Liviano (A)
- Buses y busetas (B):
- Camiones (C): para camión de dos ejes (C-1), camión de tres ejes (C-2), y de cuatro o más ejes (C-3)
- Remolques (R). (MTOPEcuador, 2013)

Para entender mejor su clasificación generalmente los vehículos se diferencian por el tipo y número de ejes.

- Eje simple. Formado por dos ruedas en cada extremo del eje
- Ejes Tándem. Formado por dos ejes simples con ruedas dobles y separación de centro de 1 a 2.45m
- Ejes Trídem. Formado por tres ejes simples de ruedas dobles y separación de centro de 1 a 2.45m. (Morales, Orozco, & Campos, 2012)

2.5.1.2 Volumen del tráfico

El volumen de tráfico en una carretera depende de varios factores, como son el número y tipo de vehículos que circulan por un punto determinado durante un período de tiempo específico. Para obtener datos del volumen de tráfico es indispensable colocar aforos de conteo vehicular.

Los datos de volumen vehicular son necesarios para determinar el TPDA (Tráfico Promedio Diario Anual), capacidad práctica y serviciabilidad de la vía. Según estos datos se puede evaluar si la carretera necesita un mejoramiento o su ampliación. (Armijos, Iza, & Quiñonez, 2012)

2.5.1.3 Tráfico promedio diario (TPD)

Se define como el volumen promedio de vehículos que circulan por una vía en un día, se lo obtiene del número total de vehículos que pasan por la estación de conteo durante un día completo, esto en un periodo mayor a un día y menor a un año, dividido para el número de días de dicho periodo. (Molina & King, 2015)

El uso de estaciones permanentes en ocasiones no es factible, por esta razón el muestreo se lo debe realizar por lo menos de 4 días en la semana incluyendo sábado y domingo, para poder estimar el tráfico promedio semanal, utilizando un factor de variación que se lo denomina factor horario (FH) la cual se puede obtener con la Ecuación 2.18. (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

$$FH = \frac{VALOR\ MAX\ DIARIO}{\#TOTAL\ DIARIO} \quad (2.18)$$

Para el caso de no obtener datos de un día completo de 24 horas, se utiliza el factor horario que estima las horas faltantes de aforo, mediante el uso de la Ecuación 2.19.

$$TPD = TTD * FH \quad (2.19)$$

Donde:

TPD = Tráfico Promedio Diario.

TTD = Tráfico Total Diario aforo diario en menos de 24h.

FH = Factor Horario que compensa las horas faltantes de aforo vehicular. (Armijos, Iza, & Quiñonez, 2012)

2.5.1.4 Tráfico promedio diario anual (TPDA)

Según el (T.A.M.S-ASTEC, 2003), el TPDA comprende las siguientes premisas:

- *“En vías de un solo sentido de circulación, el tráfico será el contado en ese sentido.”*
- *“En vías de dos sentidos de circulación, se tomará el volumen de tráfico en las dos direcciones. Normalmente para este tipo de vías, el número de vehículos al final del día es semejante en los dos sentidos de circulación.”*
- *“Para el caso de Autopistas, generalmente se calcula el TPDA para cada sentido de circulación, ya que en ellas interviene lo que se conoce como FLUJO DIRECCIONAL que es el % de vehículos en cada sentido de la vía: esto, determina composiciones y volúmenes de tráfico diferentes en un mismo período.”*

Para obtener datos de TPDA cercanos a la realidad, es necesario disponer de conteos en estaciones permanentes, que permita identificar variaciones diarias, semanales y estacionales. Del mismo modo es recomendable disponer de una base de datos de varios años, para así poder predecir el crecimiento de tráfico futuro. (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

2.5.1.5 Periodo de diseño

Se relaciona con la importancia de la vía de estudio, y los requerimientos de las entidades a cargo según los contratos, sin embargo, en la Tabla 11 la AASHTO 93, recomienda que:

Tabla 11*Periodo de diseño*

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño (años)
Urbanos de alto volumen de tránsito	30-50
Interurbana de alto volumen de tránsito	20-50
Pavimentado de bajo volumen de tránsito	15-25
Afirmado de bajo volumen de tránsito	10-20

Obtenido de: (AASHTO-93, 1993, págs. II-7)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.5.1.6 Tráfico futuro

Es el pronóstico del volumen de tráfico que se espera después de realizar el mejoramiento de la capa de rodadura de una carretera, éste se compone de:

- **Tráfico generado:** Se obtiene luego de realizar el mejoramiento de la capa de rodadura.
- **Tráfico atraído:** Se genera por influencia de otras carreteras después que la vía es mejorada.
- **Tráfico por desarrollo:** se genera por consecuencia del desarrollo socio-económico del sector donde se encuentra la carretera. (Caiza, 2011)

Existen varios criterios para poder determinar el tráfico futuro, de los cuales se puede nombrar al factor poblacional, de producción, etc.

Si no se dispone de la tasa de crecimiento de la producción para el cálculo del tráfico futuro, se recurre a información estadística sobre el crecimiento poblacional o al consumo de combustible, y se lo calcula con la Ecuación 2.20. (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

$$Tf = Ta(1 + i)^n \quad (2.20)$$

Donde:

Tf = Tráfico futuro o proyectado

Ta = Tráfico actual

I = Tasa de crecimiento del tráfico (en caso de no contar con datos, utilizar la tasa de crecimiento poblacional o de combustibles)

n = Número de años proyectados

2.5.1.7 Factor direccional y factor de carril

El factor direccional se lo denomina la relación del número de vehículos pesados que circulan en un sentido, generalmente este factor es la mitad del total de tránsito cuando se tienen ambas direcciones y si no es el caso el factor depende del conteo de tráfico realizado. Ver Tabla 12. (Perez & Andagua, 2015)

Tabla 12
Factor de distribución de carril

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional
1 calzada	1 sentido	1	1
	1 sentido	2	1
	1 sentido	3	1
	1 sentido	4	1
	2 sentidos	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5
2 calzadas con separador central	2 sentidos	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5
	2 sentidos	3	0.5
	2 sentidos	4	0.5

Obtenido de (Perez & Andagua, 2015, pág. 89)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.5.1.8 Número de Ejes Equivalentes (ESAL)

Las cargas de los vehículos que actúan en un pavimento causan deformaciones y tensiones las cuales dependen del espesor del mismo y reaccionan de diferente manera a distintas cargas, y por ende las fallas serán distintas. Teniendo en cuenta estas diferencias, la carga del tránsito es simplificada a un número de ejes equivalente tipo AASHTO de 80 kN, la cual produce el mismo daño que toda la composición del tráfico, este cambio se lo hace a través de los Factores Equivalentes de Cargas. (Morales, Orozco, & Campos, 2012)

Los factores equivalentes de carga (FEC) son factores de equivalencia que simbolizan el daño generado por distintas cargas y a su vez por el tipo de vehículo pesado con sus respectivos ejes, sobre la capa de rodadura. (Perez & Andagua, 2015)

De la Tabla del Apéndice D de la AASHTO 93 se muestra las siguientes simplificaciones para el cálculo de los factores equivalentes. Mostrados en la Tabla 13. (Perez & Andagua, 2015)

Tabla 13

Ecuaciones para obtener ejes equivalentes según el tipo de eje.

Tipo de Eje	Eje Equivalente ($EE_{8.2tn}$)
Eje Simple de ruedas simples (EE_{S1})	$EE_{S1} = \left[\frac{P}{6.6}\right]^4$
Eje Simple de ruedas dobles (EE_{S2})	$EE_{S2} = \left[\frac{P}{8.2}\right]^4$
Eje Tándem (1 eje ruedas dobles + 1 eje ruedas simple) (EE_{TA1})	$EE_{TA1} = \left[\frac{P}{14.8}\right]^4$
Eje Tándem (2 ejes ruedas dobles) (EE_{TA2})	$EE_{TA2} = \left[\frac{P}{15.1}\right]^4$
Ejes Trídem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE_{TR1})	$EE_{TR1} = \left[\frac{P}{20.7}\right]^4$
Ejes Trídem (3 ejes ruedas dobles) (EE_{TR2})	$EE_{TR2} = \left[\frac{P}{20.7}\right]^4$
P=peso real por eje en toneladas	

Obtenido de (Perez & Andagua, 2015, pág. 17)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El Número de repeticiones de Ejes Equivalentes 8.2 ton se lo calcula de acuerdo a la ecuación 2.21. (MTOPEsmeraldas, 2012)

$$N = To * FDT * FEC * FC * 365 * n \quad (2.21)$$

Dónde:

To = Tráfico inicial

FDT = Factor de distribución de tráfico por carril

LEFT = Factor de equivalencia de carga total.

FRS = coeficiente de reparto por sentido. (MTOPEsmeraldas, 2012)

2.5.1.9 Serviciabilidad

La serviciabilidad es el valor de 0 a 5 que indica el grado de comodidad que tiene el pavimento para el paso de un vehículo, o también se lo define como el índice de

serviciabilidad inicial menos la serviciabilidad final (Tabla 14). (Perez & Andagua, 2015)

Tabla 14
Índice de serviciabilidad

Índice de Serviciabilidad	Condición
5-4	Muy buena
4-3	Buena
3-2	Regular
2-1	Mala
1-0	Muy mala

Obtenido de (Perez & Andagua, 2015, pág. 91)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Según el grado de confort o índice de serviciabilidad inicial (P_o) y final (P_t) que se elija, se calcula la pérdida de servicio según la Ecuación 2.22

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad (2.22)$$

2.5.1.10 Confiabilidad (R)

Este factor depende en que sector se encuentra la zona de estudio, y se lo define como la probabilidad de que el pavimento no presente fallas estructurales para el periodo de diseño ya establecida.

Se lo estima mediante la Tabla 15. (García, 2015)

Tabla 15
Niveles de confiabilidad sugeridos

Clasificación	Nivel de confiabilidad Recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85-99.9	80-99.9
Arterias colectoras	80-99	75-95
Colectoras de tránsito	80-95	75-95
Carreteras locales	50-80	50-80

Obtenido de (García, 2015, pág. 9)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.5.1.11 Desviación estándar total (So)

Según menciona Perez & Andagua, “La desviación estándar total es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de los otros factores que afectan el comportamiento del pavimento; como, por ejemplo, construcción, medio ambiente, incertidumbre del modelo. La AASHTO-93 recomienda para los pavimentos flexibles, valores entre 0.40 y 0.50”. (Tabla 16). (Perez & Andagua, 2015).

Tabla 16
Desviación estándar total (So)

Desviación estándar total (So)	
Pavimento	Rango
Rígido	0.3-0.4
Flexible	0.4-0.50

Obtenido de (Perez & Andagua, 2015, pág. 90)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.5.1.12 Desviación estándar normal (-Zr)

La Desviación Estándar Normal, simboliza el valor de la confiabilidad escogida, para un conjunto de datos en una distribución normal. Ver Tabla 17. (Perez & Andagua, 2015)

Tabla 17
Desviación Estándar Normal

Confiabilidad R%	Desviación Estándar Normal
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
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.75

Obtenido de (Perez & Andagua, 2015, pág. 89)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.5.1.13 Módulo Resiliente de la Subrasante (M_r)

Los materiales utilizados en la elaboración de pavimentos no tienen un comportamiento elástico ya que poseen una deformación plástica; por otra parte, después de aplicar varias repeticiones de carga, el suelo toma una deformación recuperable, por lo que a este comportamiento se lo llama resiliencia. (Vega, 2018) Para caracterizar el suelo de la Subrasante, para el diseño de pavimentos, se requiere de un parámetro dinámico, el cual está en función del CBR y según la AASHTO-93 se lo obtiene utilizando la Ecuación 2.23. (MTOPEsmeraldas, 2012)

$$M_r = 2555 * CBR^{0.64} \quad (2.23)$$

2.5.1.14 Número estructural requerido (SN_r)

En la guía AASHTO-93 de diseño de pavimentos asfálticos utiliza una ecuación la cual está en función de varias variables de diseño como el tránsito, desviación estándar, confiabilidad e índice de serviciabilidad etc., ecuación que sirve para

determinar el número estructural (SN), el cual es un factor importante para la determinación de los espesores de la estructura del pavimento. (García, 2015)

Se calcula mediante la Ecuación 2.24.

$$\log W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 \frac{\log \frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.4 + \frac{1094}{(SNr + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log M_R - 8.07 \quad (2.24)$$

Donde

W_{18} = Número estimado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el período de diseño.

Z_R = Desviación estándar normal

S_0 = Error estándar combinado de la predicción del tráfico y de la predicción del comportamiento estructural

ΔPSI = Diferencia entre índice de servicio inicial y final

M_R = Módulo resiliente (en libras/pulgada²)

SN = Número estructural. (García, 2015)

2.5.1.15 Número estructural propuesto (SN)

Este parámetro sirve para determinar la capacidad portante de la estructura del pavimento durante el período de vida útil seleccionado, ofreciendo durabilidad y serviciabilidad. (García, 2015)

Se lo calcula con la Ecuación 2.25.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (2.25)$$

Donde:

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.

D_1, D_2, D_3 = Espesores (en centímetros) de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.

m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase, respectivamente.

Para el diseño de la capa de rodadura debe cumplir la siguiente condición, caso contrario se deberá rediseñar el espesor de las capas ya calculadas. (García, 2015)

$$SN_r \leq SN$$

Donde:

SN_r: Número estructural requerido

SN: Número estructural propuesto. (García, 2015)

El cálculo del espesor de las capas del pavimento se muestra en las Ecuaciones 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.30. (AASHTO-93, 1993)

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (2.26)$$

$$SN^*1 = a_1 * D^*1 \quad (2.27)$$

$$D^*2 = \frac{SN_2 - SN^*1}{a_2 * m_2} \quad (2.28)$$

$$SN^*1 + SN^*2 \geq SN_2 \quad (2.29)$$

$$D^*3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*1 + SN^*2)}{a_3 * m_3} \quad (2.30)$$

a₁, a₂, a₃ = Coeficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.

D₁, D₂, D₃ = Espesores (en centímetros) de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.

m₂, m₃ = Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase, respectivamente. (AASHTO-93, 1993)

2.5.1.16 Coeficiente estructural (a)

El coeficiente estructural de capa es una medida de la capacidad relativa del espesor de un determinado material para funcionar como un componente estructural del pavimento. (Vega, 2018)

2.5.1.17 Drenaje (m)

El drenaje es un factor importante en el comportamiento de capas de base y subbase a lo largo de la vida útil y se lo expresa mediante niveles de saturación como se muestra en la Tabla 18 y 19. (MTOP Esmeraldas, 2012)

Tabla 18
Calidad de Drenaje

Calidad de drenaje	Tiempo en que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	El agua no evacua

Obtenido de (MTOPEsmeraldas, 2012, pág. 10)
Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 19
Coefficientes de drenaje para Pavimentos Flexibles

Calidad del drenaje	Tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos 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	1
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1-0.8	0.8
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.8	0.8-0.6	0.6
Muy Pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.4	0.4

Obtenido de (MTOPEsmeraldas, 2012, pág. 10)
Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.6 Diseño de pavimento rígido con metodología de la PCA (Portland Cement Association)

El método de la PCA (Portland Cement Association) en el cual se basa este aparatado del documento de investigación fue publicado en 1984, este método tiene como objetivo el encontrar un espesor mínimo de pavimento rígido para tener un menor costo inicial y un menor costo en mantenimiento. El criterio de la PCA considera dos puntos importantes en el diseño, estos son la fatiga y la erosión. (Cabrera & Urgiles, 2017)

El análisis de la fatiga cumple la misión de proteger al pavimento de grietas generadas por esfuerzos debido a las constantes repeticiones de carga, este criterio centra su atención en diseños de pavimento con poco tráfico sin presencia

pasadores de junta, y en pavimentos con tráfico mediano con adición de pasadores de junta. (Cabrera & Urgiles, 2017)

El análisis de erosión trata de limitar los efectos de la deflexión que se produce en los bordes, juntas y esquinas del pavimento, de esta manera la erosión al momento de su construcción es mínima. Este criterio menciona que pueden existir fallas en la capa de rodadura por la gran extracción de partículas ubicadas en el estrato inferior o de soporte, las diferencias de elevaciones en las juntas son otro motivo para que exista dicho bombeo de partículas hacia la superficie. El análisis de la erosión se centra especialmente en el tráfico pesado. (Cabrera & Urgiles, 2017)

2.6.1 Variables de diseño del pavimento rígido.

2.6.1.1 Resistencia del Hormigón a la Flexión (MR).

La resistencia del hormigón viene ligada directamente con el agotamiento y así poder prevenir fisuras bajo cargas repetitivas de tráfico pesado. Los esfuerzos que aparecen en un pavimento son de compresión y flexión, sin embargo, la relación de los esfuerzos y resistencia de compresión son mínimos y no influyen estos para el diseño final de la capa de rodadura. Con la flexión ocurre todo lo contrario ya que esta relación de esfuerzo y resistencia es mucho más representativa, en algunos casos superando el 0,5. Por esta razón la resistencia a la flexión se usa para el diseño del espesor del pavimento. (Fernández E. , 2009)

Hay que tener en cuenta la edad del hormigón al momento del diseño, tomando en cuenta el tiempo que transcurrirá hasta la apertura de la vía al público, en la Figura 14 se muestra dicha relación. (Fernández E. , 2009)

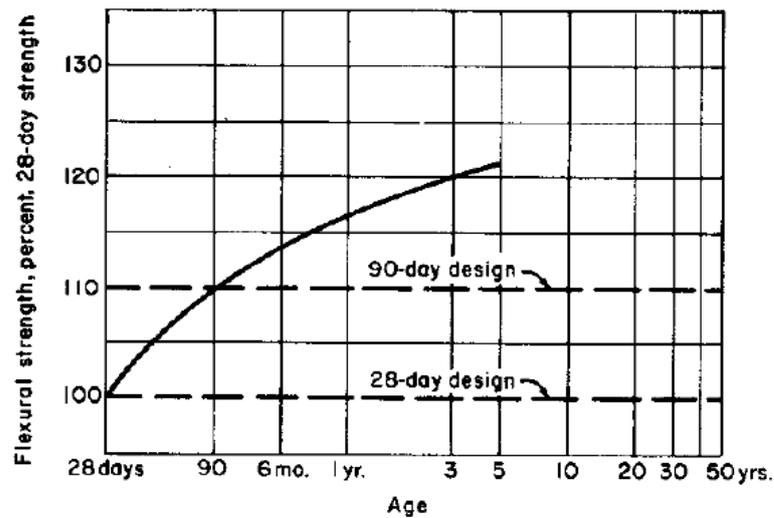


Figura 14. Relación entre el esfuerzo flexural y la edad del concreto.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 6)

2.6.1.2 Soporte de la subrasante y sub-base.

Son términos que son determinados por el módulo de reacción (k) de Westergaard, el cual se calcula dividiendo una carga que es aplicada en una determinada área para la deflexión ocasionada por dicha carga. (Fernández E. , 2009)

Para determinar el valor de k , se puede realizar un ensayo in situ, pero este ensayo tiene la desventaja de ser muy costoso y llevar mucho tiempo, por esta razón este valor es estimado mediante correlaciones de otros ensayos más simples como es el California Bering Ratio (CBR) o las pruebas de valores R . Se permite realizar esta relación ya que no es necesario tener el valor exacto de k , la variación normal no afectará apreciablemente en el espesor del pavimento. En la Figura 15 mostramos como el manual de la PCA permite relacionar las clasificaciones de suelo con los valores de soporte. (Fernández E. , 2009)

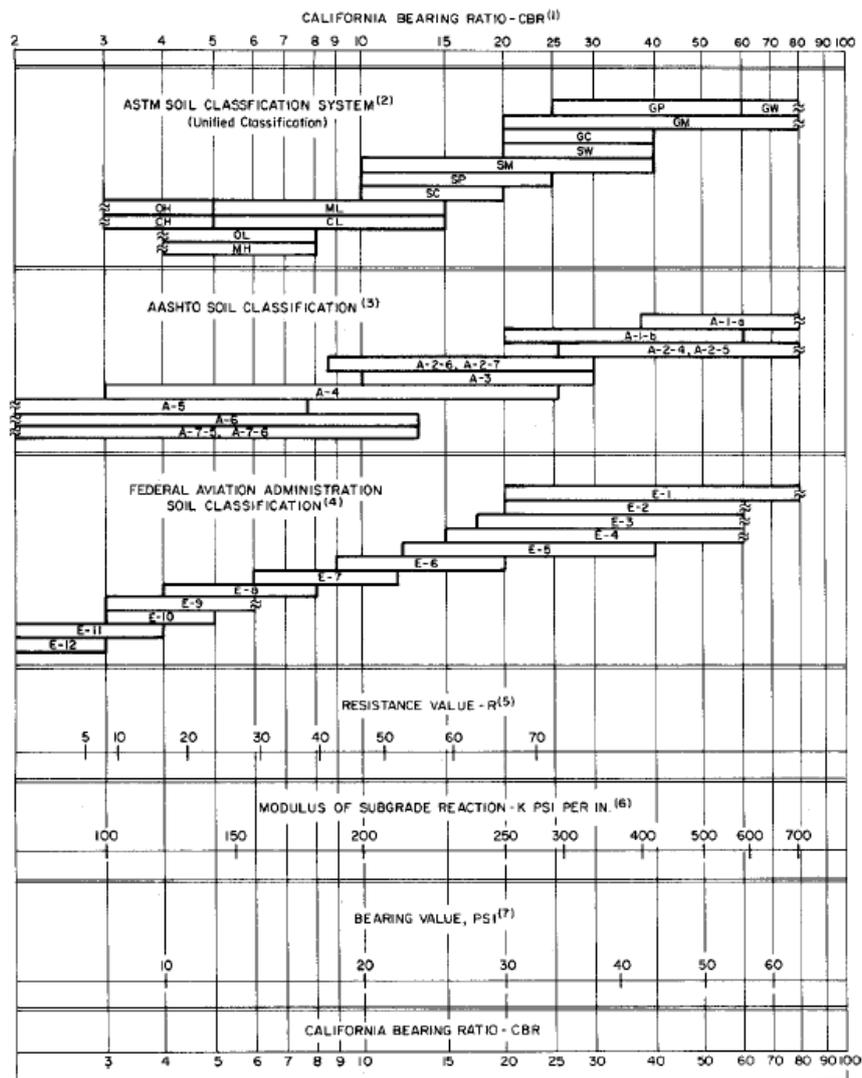


Figura 15. Relaciones aproximadas entre las clasificaciones de suelos y los valores de soporte.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 7)

Existen tablas donde se proporciona el valor del módulo de reacción conjunto de la subrasante y la sub-base, dependiendo del espesor de la sub-base y el módulo de reacción del suelo, el manual de la PCA nos proporciona estos datos que podemos observar en la Tabla 20. Además, si existen suelos demasiado pobres se puede optar por tratarlos con cemento, para este caso la PCA nos presenta la Tabla 21, donde observamos el valor del módulo de reacción conjunto. (Fernández E. , 2009)

Tabla 20*Efecto de la sub-base no tratada sobre los valores de k.*

Valor de k de la subrasante [pci]	Valor k de la sub-base, [pci]			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	12 pulg.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Obtenido de (Fernández E. , 2009, pág. 5)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 21*Valores k de diseño para sub-bases tratadas con cemento.*

Valor de k de la subrasante [pci]	Valor k de la sub-base, [pci]			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	12 pulg.
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

Obtenido de (Fernández E. , 2009, pág. 6)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.6.1.3 Periodo de diseño.

Depende de qué clase de carretera se vaya a diseñar, además el tema económico y de mantenimiento juegan un papel importante al momento de elegir el periodo de diseño, comúnmente se usa un periodo de 20 años, aunque hay casos que se opta por 40 años; hay que tomar en cuenta que el espesor dependerá mucho de esta decisión, ya que el número de veces que se aplicará la carga va ligado a este periodo. La selección de un periodo de diseño para un proyecto es netamente criterio ingenieril y económico. (Fernández E. , 2009)

2.6.1.4 Proyección (Fproy).

La PCA en su manual indica un método para determinar el factor de proyección, esto mediante la aplicación tasas de crecimiento del tráfico para cada año y factores de proyección de tráfico, la Tabla 22 indica la relación entre tasas de crecimiento y factor de proyección para periodos de 20 y 40 años. (Fernández E. , 2009)

Tabla 22

Tasas anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección correspondientes.

Tasa anual de crecimiento de tráfico	Factor de proyección 20 años	Factor de proyección 40 años
1	1.1	1.2
1½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2½	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3½	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5½	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Obtenido de (Fernández E. , 2009, pág. 10)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El factor de proyección es usado para determinar el ADT (Average daily traffic) de diseño, ya que este factor es multiplicado por el ADT obtenido en el conteo vehicular.

Existen diversos parámetros que influyen en el porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular y por ende en el factor de proyección, estos son:

- **Tráfico desviado:** es el aumento en el tráfico existente por razón del mejoramiento de la vía.
- **Crecimiento común del tráfico:** es el aumento normal debido al consumo de vehículos motorizados.
- **Tráfico generado:** es el aumento debido a la llegada de vehículos, lo cual no hubiera ocurrido si no se hubiera construido la nueva vía.
- **Desarrollo del tráfico:** es el aumento del tráfico ocurrido por el cambio del uso del suelo, debido a los nuevos servicios que genera la nueva construcción. (Fernández E. , 2009)

La combinación de estos parámetros da paso a tasas anuales de crecimiento entre el 2% y el 6%, aproximadamente. En zonas rurales no es recomendable utilizar tasas altas de crecimiento, así la PCA menciona que la tasa de crecimiento puede estar debajo del 2% por año. (Fernández E. , 2009)

Si el periodo de diseño no es de 20 o 40 años, no se podrá utilizar la Tabla 19 que nos proporciona la PCA, por tanto, se puede utilizar la Ecuación 2.31 para determinar el factor de proyección, esta ecuación es la que la PCA utiliza para generar la Tabla 19. (Cabrera & Urgiles, 2017)

$$F_{proy} = \frac{(1 + r)^n - 1}{r * n} \quad (2.31)$$

Donde:

F_{proy} = Factor de proyección.

n = Periodo de diseño.

r = Tasa anual de crecimiento vehicular. (Cabrera & Urgiles, 2017)

2.6.1.5 Factor de dirección (FD).

Se lo utiliza para poder identificar las carreteras de uno y dos sentidos, para lo cual los caminos de un solo sentido su factor de dirección es 1. En la Tabla 23 se puede encontrar los factores correspondientes según su sentido. (Cabrera & Urgiles, 2017)

Tabla 23

Factor de dirección según el sentido de la vía.

Sentido de la vía	Factor de dirección
2	50%
4	45%
6	40%

Obtenido de (Cabrera & Urgiles, 2017, pág. 9)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.6.1.6 Factor carril (FC).

Este factor indica la cantidad de tráfico que circula en el carril más cargado que comúnmente es el derecho, la PCA proporciona la Figura 16 donde se puede notar que este factor tiene relación directa con la cantidad de carriles que existe en cada sentido de la vía y el ADT de diseño, cabe mencionar que es factor se utiliza en

vías que tienen 2 y 3 carriles en un sentido de la carretera. (Cabrera & Urgiles, 2017)

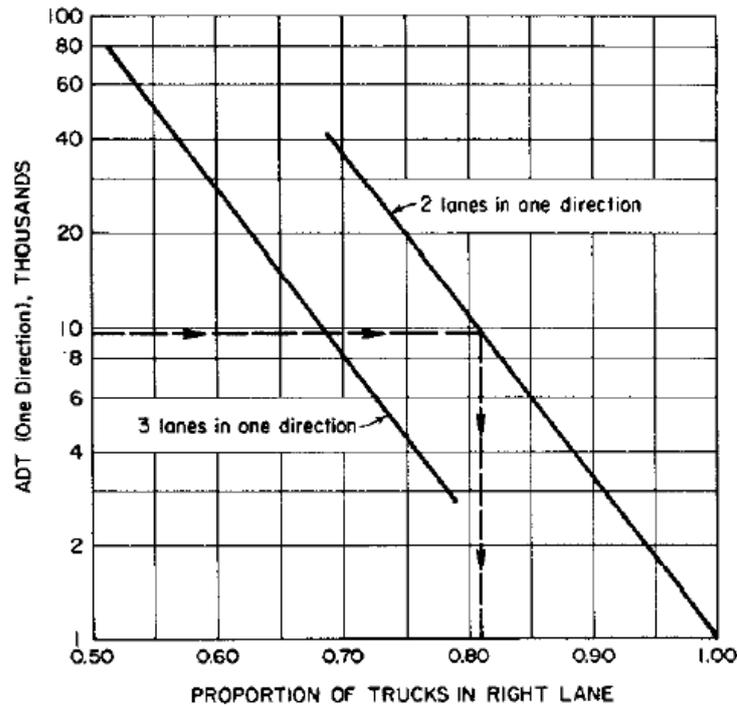


Figura 16. Proporción de camiones en el carril derecho de una carretera dividida en carriles múltiples.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 9)

2.6.1.7 Factor de seguridad de carga (LSF).

La PCA menciona que para el diseño del pavimento es necesario utilizar un factor de seguridad, se recomienda los siguientes factores:

- Proyectos interestatales y de múltiples carriles, con flujo vehicular ininterrumpido con altos volúmenes de tráfico de camiones, se utiliza un LSF=1.2.
- Carreteras y calles arteriales con volumen de tráfico de camiones moderado, se usa un LSF=1.1.
- Carreteras, calles residenciales, y las cuales posean bajo volumen de tráfico de camiones, se usa un LSF=1.0. (Fernández E. , 2009)

En casos especiales es justificado el uso de un LSF=1.3, para poder mantener un buen estado de servicio del pavimento durante todo el periodo de diseño, por ejemplo, en una vía libre urbana con alto tráfico y carente de ruta alternas de circulación. (Fernández E. , 2009)

2.6.1.8 Tráfico (ADT).

La información sobre la cantidad y carga de los vehículos, es el dato más importante y de mayor influencia sobre el diseño del espesor del pavimento. Esta información depende de:

- Tráfico promedio diario en ambas direcciones, de todos los vehículos o también llamado average daily traffic (ADT).
- Tráfico promedio diario en ambas direcciones de camiones o llamado average daily truck traffic (ADTT).
- Cargas axiales de camiones. (Fernández E. , 2009)

El ADT se obtiene de conteos o de mapas de volumen de tráfico del sector, el ADT de diseño resulta de aplicar la Ecuación 2.32. (Fernández E. , 2009)

$$ADT_{diseño} = ADT * F_{proy} * FD \quad (2. 32)$$

Donde:

ADT_{diseño} = Tráfico promedio diario de diseño.

ADT = Tráfico promedio diario en ambas direcciones.

F_{proy} = Factor de proyección.

FD = Factor por dirección. (Fernández E. , 2009)

2.6.1.9 Repeticiones esperadas.

Para el cálculo se debe utilizar algunos de los factores ya mencionados, para luego aplicar la Ecuación 2.33. (Cabrera & Urgiles, 2017)

$$N = ADT_{diseño} * FC * n * 365 \quad (2. 33)$$

Donde:

N = Número de repeticiones esperadas.

ADT_{diseño} = Tráfico promedio diario de diseño.

FC = Factor carril.

n = Periodo de diseño. (Cabrera & Urgiles, 2017)

2.7 Mantenimiento en capas de rodadura

El mantenimiento en una vía es de vital importancia, para poder conservar la mayor cantidad de tiempo sus características en óptimas condiciones, con el fin de proporcionar una buena serviciabilidad. El mantenimiento de la capa de rodadura

depende del tipo de la misma, es decir, para un pavimento flexible se deberá hacer un tipo de mantenimiento y para un pavimento rígido otro, en este apartado se menciona los diferentes tipos de mantenimiento dependiendo de la capa de rodadura.

El mantenimiento se diferencia por el tiempo que transcurre entre cada uno de ellos, de esta manera, se tiene el mantenimiento rutinario que como su nombre lo indica se lo realiza rutinariamente, con un tiempo de recurrencia menor (diario, semanal); el mantenimiento periódico se lo realiza con un espacio de tiempo más amplio (anual). (Boada, 2020)

Un pavimento sin mantenimiento rutinario, se verá muy afectado en un plazo de tiempo mucho menor en comparación a uno que lo tenga, en la Figura 17 se puede observar el ciclo de vida de una vía con mantenimiento continuo, y en la Figura 18 una sin mantenimiento continuo. (Boada, 2020)

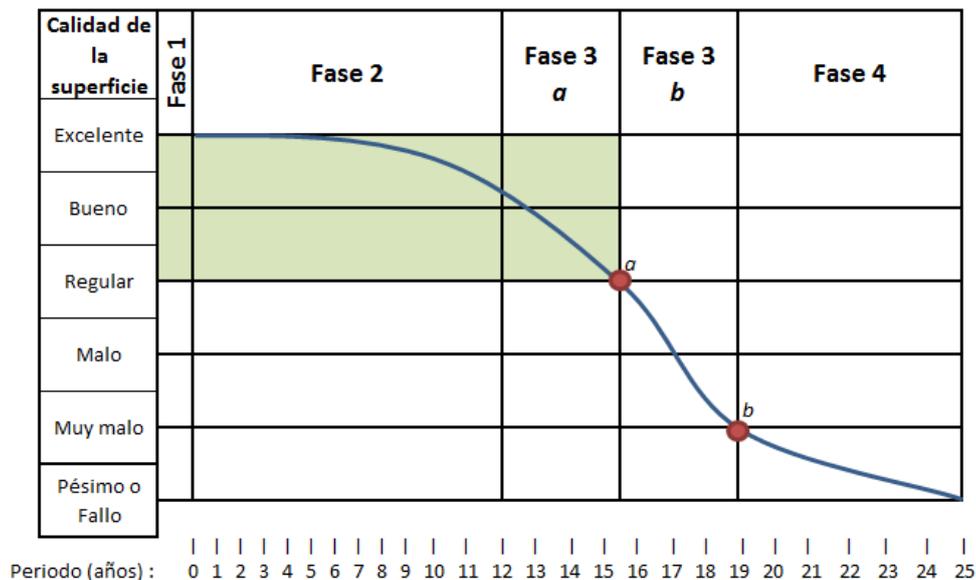


Figura 17. Ciclo de vida de una carretera sin mantenimiento.

Fuente: (Boada, 2020, pág. 10)

Fase 1. La construcción o reconstrucción de la vía.

Fase 2. Deterioro lento y poco visible en la vía.

Fase 3. Deterioro acelerado y quiebre en la vía.

Fase 4. Descomposición total de la vía.

Punto “a”: es el punto crítico de intervención (Representa el 75% de la vida útil). Por cada dólar invertido en mantenimiento, equivaldrá a 5 o 6 dólares gastados en el Punto “b” (Representa el 12% de la vida útil). (Boada, 2020)

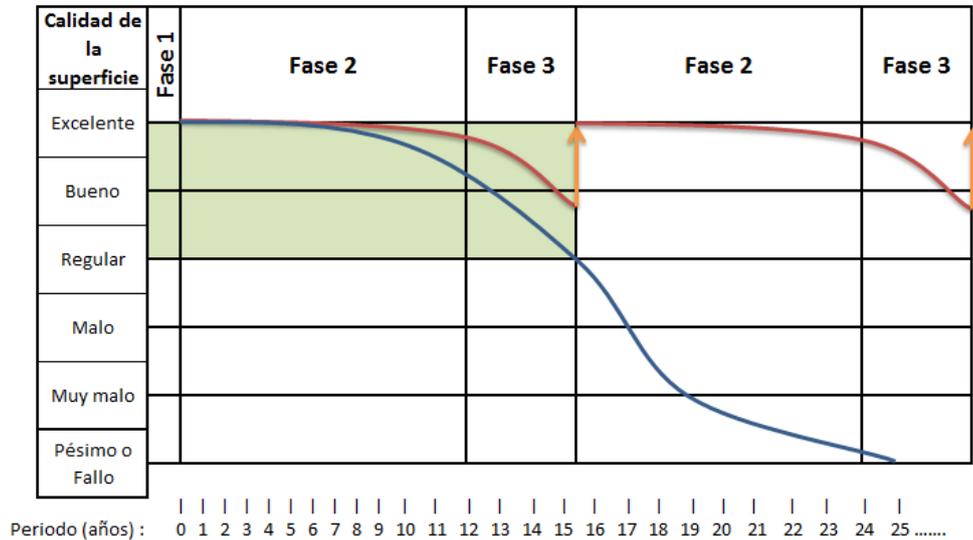


Figura 18. Ciclo de vida de una carretera con mantenimiento.

Fuente: (Boada, 2020, pág. 11)

La curva roja representa una vía con mantenimiento rutinario, la flecha amarilla indica que la vía tuvo mantenimiento periódico, y la curva azul es el deterioro de una vía sin mantenimiento. (Boada, 2020)

2.7.1 Mantenimiento de un pavimento flexible.

El mantenimiento del pavimento flexible se encarga de todo tipo de trabajos tanto localizados de limitada dimensión, como de aquellos en los cuales se debe realizar una reconstrucción parcial o total de la superficie de la vía. Por ejemplo, la impermeabilidad de la capa de rodadura, en especial cuidado en el borde del pavimento que es más propenso a infiltración de agua, si existiera infiltración las capas inferiores se verían seriamente afectadas; parte de este mantenimiento es la de mantener y si es necesario renovar la calidad de la capa de rodadura para que brinde a sus usuarios confort y seguridad. (Farinango, 2014)

El problema más común radica en los baches, estos son comúnmente generados por la baja calidad de los materiales que constituyen el pavimento, la infiltración de agua a estratos inferiores, disgregación del material por el paso del tráfico y la aparición de grietas o las llamadas “piel de cocodrilo”. (Farinango, 2014)

2.7.1.1 Mantenimiento rutinario.

Este tipo de mantenimiento es realizado diariamente y es muy necesario para poder conservar el estado de la estructura del pavimento, y alargar la vida útil de la misma. (Farinango, 2014)

El mantenimiento rutinario cuenta algunas actividades, las principales son el sellado de grietas, el bacheo tanto superficial como profundo y el reperfilado de bermas. (Farinango, 2014)

- **Sellado de grietas:** Esta acción radica en sellar con asfalto algunos de las fisuras que se generan en el pavimento flexible (Ver Figura 19), este procedimiento tiene como fin disminuir la humedad y por ende la oxidación del asfalto. Este sellado es efectivo en las siguientes condiciones: (MTOPEcuador, 2013)
 - Grietas de fatiga de la estructura del pavimento que no presenta conexión entre ellas ni rastros de agua y/o finos.
 - Grietas de borde las cuales poseen forma semicircular que presentan, además se generan hasta unos 30 centímetros del borde.
 - Grietas que forman bloques rectangulares entre 0.1 y 10 m², no importa su ancho para su sellado.
 - Grietas longitudinales paralelas al eje de la vía, las cuales no dependen de su ancho y pueden ser selladas.
 - Grietas reflejadas, es decir grietas de una capa de rodadura inferior que haya servido de base, su ancho es indiferente para el sellado.
 - Grietas entre la berma y el pavimento. (MTOPEcuador, 2013)



Figura 19. Sellado de pavimentos.

Fuente: (Botasso, González, & Rodríguez, 2015)

- **Bacheo superficial:** Consiste en el reemplazo de áreas de pavimento las cuales estén estropeadas, esto si únicamente afecta a la capa asfáltica de rodadura (Ver Figura 20). Este bacheo va dirigido a fallas que no sean por causas estructurales, las más comunes son: (MTOPEcuador, 2013)
 - Áreas donde existan grietas y fisuras conectadas entre sí, tan afectadas de tal manera que exista desprendimiento de trozos de pavimento.
 - Baches poco profundos, sea estos menores a 50 mm de profundidad.
 - Desplazamiento de áreas de pavimento o las llamadas “arrugas”. (MTOPEcuador, 2013)



Figura 20. Bacheo superficial de pavimentos.

Fuente: (Diario abc, 2015)

- **Bacheo profundo:** Esta operación consiste en el tratamiento de superficies gravemente afectadas de un pavimento asfáltico (Ver Figura 21), estas fallas afectan a la mayoría de las capas estructurales del pavimento, o al menos parte de la base y sub-base. Este procedimiento involucra a fallas estructurales ocasionadas por fisuras y/o debilitamiento de la base, sub-base y/o subrasante, las más comunes son: (MTOPEcuador, 2013)
 - Áreas agrietadas por fatiga del pavimento, estas grietas están conectadas entre sí y además conforman figuras de ángulos agudos inferiores a los 30 centímetros en el lado mayor generalmente se las conoce como “piel de cocodrilo”.
 - Baches con una profundidad de 5 centímetros o más.

- Partes deformadas por las fallas de alguna de las capas bajo la superficie o debido al efecto del tráfico pesado.
- Lugares con presencia de humedad bajo el pavimento que surge a través de grietas, se puede percibir por la aparición de finos en la superficie y su acumulación en el pavimento o las bermas.
- Grietas de borde muy afectadas, la capa de rodadura presenta fisuras y desgaste de su material superior al 10% de la extensión de la grieta. (MTOPEcuador, 2013)



Figura 21. Bacheo profundo de pavimentos.

Fuente: (Solórzano, Salas, Sequeira, & Loria, 2015)

- **Reperfilado de bermas en caminos con pavimento asfáltico:** Esta operación consiste en la reconfiguración de bermas no pavimentadas, esto incluye las cunetas, para lo cual se deben asemejar en lo posible al diseño original. (MTOPEcuador, 2013)

2.7.1.2 Mantenimiento periódico.

Este mantenimiento se lo realiza por intervalos de tiempo de un año por lo menos, su objetivo es prevenir daños en la vía, esto para no realizar rehabilitaciones costosas, es recomendable realizar este mantenimiento a los elementos que más desgaste sufren con el uso continuo. (Farinango, 2014)

Entre las principales actividades periódicas de mantenimiento se tiene:

- **Sellos bituminosos:** Esta operación consiste en colocar asfalto mediante riego el cual puede estar mezclado con agregados, en este apartado constan los sellos como riego de neblina, lechada asfáltica y tratamiento superficial simple, sello localizado con gravilla y sello localizado con lechada. (MTOPEcuador, 2013)

Ecuador, 2013). Esta actividad de mantenimiento comúnmente se la realiza cuando:

- Corrección de fisuras pequeñas y resquebrajamiento del pavimento, para esto se toma en cuenta la temperatura al momento de reparar los defectos.
 - Pulimento superficial, esto ocurre cuando el ligante se desgasta y deja al descubierto material grueso en la capa de rodadura ocasionando problemas en la fricción con el neumático.
 - Deterioro de la capa de rodadura mezcla asfáltica, debido a materiales poco tenaces que se fracturan y provocan desgaste en el asfalto.
 - Corrección de la carencia de asfalto en una mezcla, esta falla se produce durante la construcción. (MTOPEcuador, 2013)
- **Nivelación de bermas granulares no revestidas:** Esta operación tiene por objetivo reparar las bermas que no se encuentran revestidas con asfalto, las cuales se encuentren desniveladas respecto al borde del pavimento o que no estén en un plano liso con pendiente uniforme y adecuada. Es importante esta actividad ya que un desnivel entre a berma y el pavimento produce inestabilidad al vehículo que se acerque o sobrepase la pista de circulación, por esta razón es inaceptable un desnivel mayor a 40 mm; cabe mencionar que sin este mantenimiento la carretera no tendrá apoyo lateral y podrá sufrir daños. (MTOPEcuador, 2013)
 - **Imprimación reforzada:** Esta actividad se refiere a la elaboración de un recubrimiento el cual sea de tipo imprimación con refuerzo sobre una base granular, para esta imprimación se debe utilizar asfaltos cortados de curado medio tipo Volumen 3. (MTOPEcuador, 2013)
 - **Reposición de capa de rodadura de concreto asfáltico:** Se refiere a la colocación en sectores deteriorados localizados de mezcla asfáltica en caliente, tanto para rechapado como para reposición de asfalto. Se debe remover el asfalto existente mediante excavación, para que la nueva capa mantenga la rasante existente longitudinal y transversalmente. (MTOPEcuador, 2013)

2.7.2 Mantenimiento de un pavimento rígido.

De la misma manera que en el pavimento flexible, el mantenimiento de un pavimento rígido conlleva a la preservación del mismo, para que el usuario disfrute de confort y seguridad al momento de usar la vía, como ya se vio en apartados anteriores para pavimento rígidos también existen actividades de rutina y periódicas, a continuación se nombrarán las que proporciona el (MTOPE Ecuador, 2013).

2.7.2.1 Mantenimiento rutinario.

Son actividades que se las debe realizar con frecuencia para mantener el buen estado de la carretera, de la misma manera que en los pavimentos flexibles. Estas actividades son:

- **Sellado de juntas y grietas:** Esta operación consiste en mantener el sello entre juntas de construcción y de resellar las grietas existentes en el pavimento de hormigón. Si no se mantienen las juntas selladas es difícil que el pavimento llegue a la vida útil de diseño, además se debe garantizar que las juntas no experimenten ningún trabajo, es decir las cargas se deben transmitir de losa a losa sin que existan desplazamientos entre ellas, si no se cumple con esta condición se debe reparar estas juntas antes de resellarlas. (MTOPE Ecuador, 2013)

2.7.2.2 Mantenimiento periódico.

- **Reparación en todo el espesor:** Su objetivo es reemplazar una parte deteriorada de la vía la cual debe tener al menos el ancho de la misma, y además tener no menos de 0.5 m de longitud, si el área afectada involucra juntas de contracción, se debe colocar barras de traspaso de carga. Este procedimiento es usado en losas que presenten estos daños:
 - Grietas en cualquier sentido a la vía que muestren indicios de no estar trabajando, es decir que no exista transferencia de cargas entre pedazos.
 - Juntas o grietas con saltaduras en las esquinas que sean de hasta un tercio del espesor de la losa. Ver Figura 22.

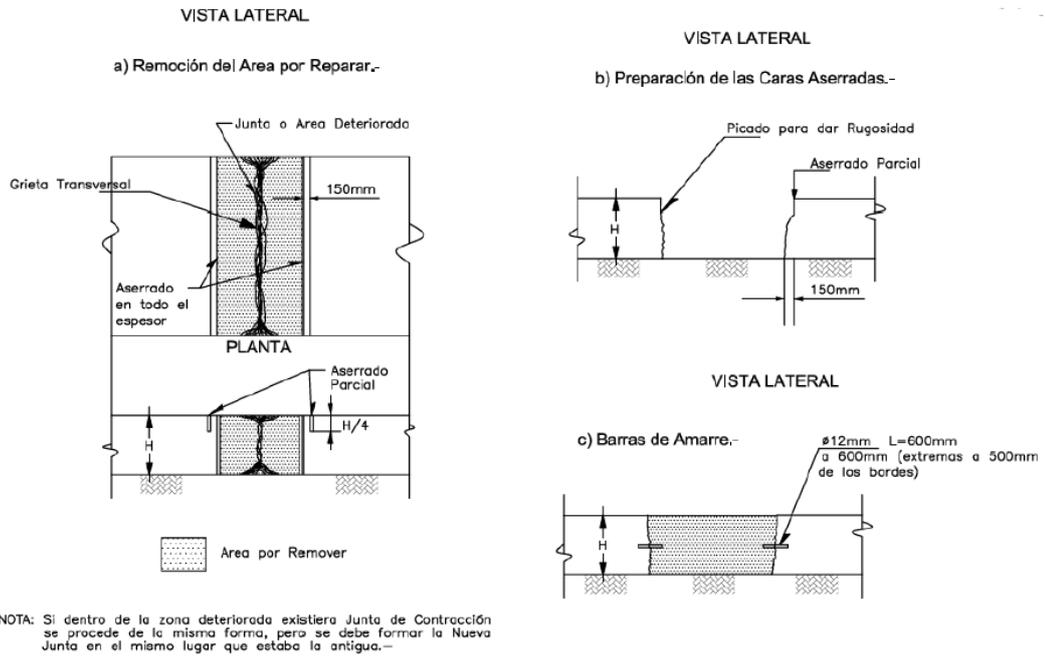


Figura 22. Reparación de un pavimento rígido en todo el espesor.

Fuente: (MTOPEcuador, 2013, pág. 152)

- **Reparación de espesor parcial:** Este procedimiento se refiere a la reparación de juntas de contracción y longitudinales, estas presentan saltaduras en las esquinas que solo afectan a la parte superior de la losa, esta saltadura crea una superficie irregular por el deterioro del pavimento se acelera. Ver Figura 23. (MTOPEcuador, 2013)

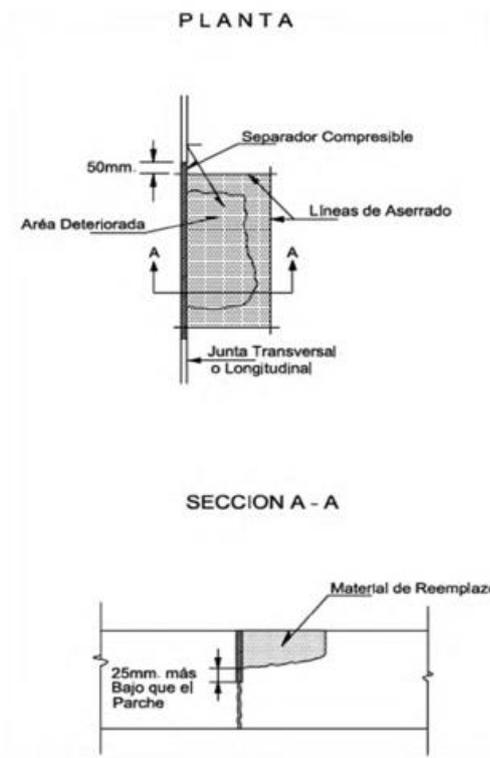


Figura 23. Reparación de un pavimento rígido en parte del espesor.

Fuente: (MTOPE Ecuador, 2013, pág. 161)

2.8 Software KENLAYER

2.8.1 Generalidades

KENLAYER es parte del programa computacional KENPAVE, el cual fue desarrollado por el Dr. Yang H. Huang en la Universidad de Kentucky en el año 1993, dicho programa es usado en la solución de sistemas multicapas elásticos bajo cargas circulares. El principio de cálculo está basado en la teoría elástica multicapa de Burmister, este software trabaja con la metodología de superposición de efectos en el cálculo de esfuerzos y deformaciones producidas por llantas cercanas entre sí o en el caso de ejes tipo dual y dual tándem. (Kumar, 2013)

El programa computacional KENLAYER es superior a otros programas ya que su capacidad de análisis de las estructuras de pavimentos abarca el campo lineal-elástico, no lineal-elástico y visco-elástico, hasta puede combinar todos los anteriores. Está en la capacidad de realizar análisis de daño para evaluar la vida de diseño del pavimento, mediante el análisis de las fisuras por fatiga y las

deformaciones permanentes. (Kumar, 2013) La Figura 24 muestra el inicio de la interfaz del programa computacional.



Figura 24. Captura de pantalla de software KENPAVE.

Fuente: Software KENPAVE

2.8.2 Estructura de KENLAYER

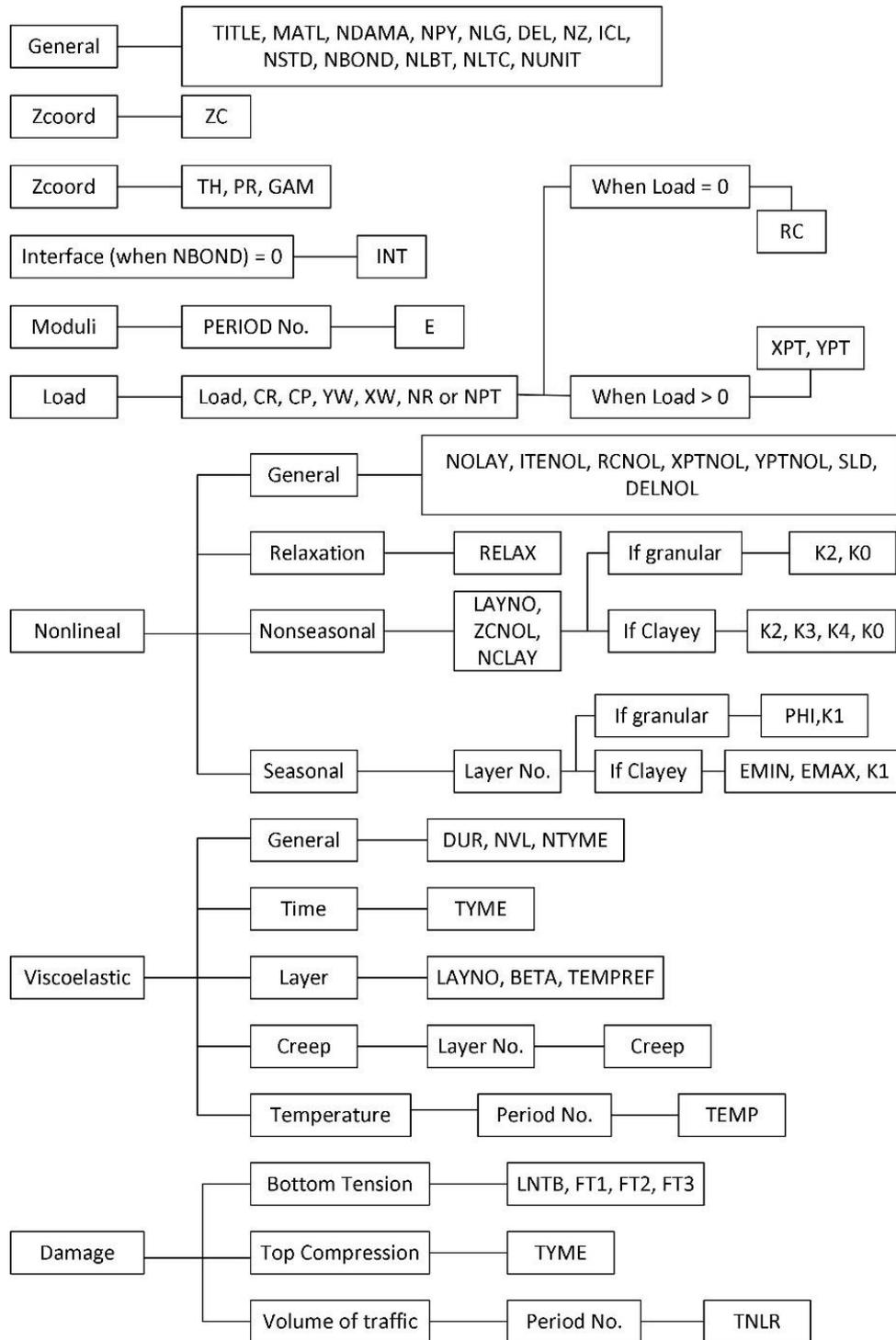


Figura 25. Estructura del programa KENLAYER con sus parámetros de entrada.

Fuente: (Kumar, 2013, pág. 26)

La Figura 25 muestra la estructura del programa computacional KENLAYER, indicando el proceso que se debe seguir para ingresar los datos de alimentación.

2.8.3 Parámetros de entrada de software KENLAYER

En el apartado anterior se observan algunos nombres claves en el proceso de ingreso de datos, a continuación, en la Tabla 24 se detalla que significa cada nombre clave.

Tabla 24

Parámetros de entrada generales para KENLAYER.

MATL	Tipo de material	NBOND	Enlace de interfaz
NDAMA	Análisis de daño	NLBT	Número de capas para tensión baja
NPY	Número de periodos por año	NLTC	Número de capas para compresión alta
DEL	Tolerancia para integración numérica	NUNIT	Sistema de unidades
NL	Número de capas	CP	Presión de contacto
NZ	Número de coordenadas en Z para el análisis	XPT	Coordenadas X del punto de análisis
ICL	Ciclos máximos de integración numérica	YPT	Coordenadas Y del punto de análisis
NSTD	Tipos de respuesta	ZC	Coordenadas Z o verticales
RC	Coordenadas radiales	LAYNO	Número de capas de la capa no lineal en la que el módulo elástico depende del esfuerzo
LOAD	Tipo de carga	ZCNOL	Coordenadas Z de puntos para calcular el módulo de elasticidad de la capa no lineal
NR	Número de coordenadas radiales a ser analizadas bajo rueda simple	NCALY	Tipo de capas no lineales
NOLAY	Número de capas	DUR	Duración de carga
ITENOL	Máximo número de iteraciones	NVL	Número de capas viscoelásticas
RCNOL	Coordenadas radiales para análisis no lineal	NTYME	Número de duraciones de tiempo para cumplimientos de fluencia
XPTNOL	Coordenadas X para análisis no lineal	SLD	Pendiente de duración de carga
YPTNOL	Coordenadas Y para análisis no lineal	DELNOL	Tolerancia para análisis no lineal

Obtenido de (Kumar, 2013, pág. 27)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

2.8.4 Métodos de análisis en KENLAYER

Existen tres métodos de análisis dentro de este software, establecidos por la naturaleza de cada material, estos son, lineal, no lineal y viscoelástico. Además, está el análisis de daños el cual puede incorporar cualquiera de los tres métodos antes mencionados, para la predicción de la vida útil del diseño del pavimento. En la Figura 26 se muestra el comportamiento de los materiales lineales, no lineales y viscoelásticos con una carga aplicada. (Kumar, 2013)

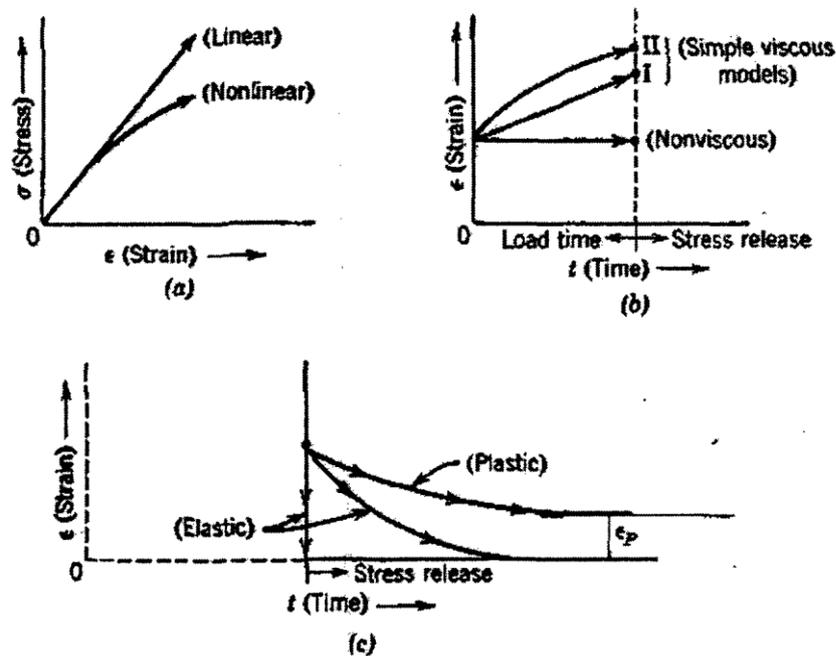


Figura 26. Características de los materiales (a)Linealidad; (b)Viscosidad; (c)Recuperable.

Fuente: (Kumar, 2013, pág. 28)

El método en el cual este proyecto se centra es el análisis elástico lineal, el cual se expresa como un modelo elástico multicapas el cual obtiene tensiones, deformaciones y desplazamientos en cualquier punto de una estructura del pavimento, resultado de la aplicación de una carga ubicada en la superficie. Los modelos elásticos multicapas suponen que cada capa del pavimento es homogénea, isotrópica y linealmente elástica, en resumen, las propiedades del material son idénticas a lo largo de la capa en cada dirección y vuelven a su forma original luego de retirar la carga. (Kumar, 2013)

El análisis de daños en KENLAYER, el cual es causado por el agrietamiento a causa de la fatiga y la deformación permanente, es un método que ayuda a evaluar la vida útil del diseño del pavimento, este análisis se basa en la tensión horizontal

en la parte inferior de alguna de las capas especificadas en el programa y la compresión vertical en la superficie generalmente de la subrasante. El procedimiento es evaluar las proporciones de daño para la fatiga y la deformación permanente. (Kumar, 2013)

En la Ecuación 2.34, D_r representa la relación de daños entre el número de repeticiones previsto y el número permitido, esto se calcula para cada grupo de carga en cada período y se suma durante el año. (Kumar, 2013)

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \quad (2.34)$$

Donde:

D_r : Relación de daños al final de un año.

n : Número previsto de repeticiones de carga para carga en el período i .

N : Número permitido de repeticiones de carga basado en las ecuaciones dadas en la Tabla 25 para N_f y N_r .

p : Número de períodos en cada año.

m : Número de grupos de carga. (Kumar, 2013)

La vida de diseño es evaluada para la fisuración por fatiga y para la deformación permanente, el valor más pequeño de los dos es el que controla el diseño, esto se logra utilizando la Ecuación 2.35. (Kumar, 2013)

$$Vida \text{ útil de diseño} = \frac{1}{Rango \text{ de daño máximo}} \quad (2.35)$$

2.9 Costos en la construcción

El estudio de costos es un factor muy importante a la hora de la construcción de obras, que tiene por finalidad saber el precio total de las mismas. Para la elaboración de los costos es imprescindible realizar el análisis de precios unitarios para cada rubro con sus incidencias directas e indirectas. (Calle, 2014)

2.9.1 Costos Directos

Son los costos en el análisis de precios unitarios para cada rubro en la construcción de un proyecto, el cual consiste en la suma de los costos de material, mano de obra y equipos necesarios para su elaboración. (Farinango, 2014)

- Mano de Obra: Equipo que actúa en la construcción de un proyecto y necesarios para la realización de un rubro. Mismo que está clasificado por categorías según su preparación.
- Equipo y maquinaria: es el costo por hora de maquinaria, equipo de construcción necesarios para la elaboración de un trabajo de acuerdo con las normas de calidad y especificaciones dadas por la entidad a cargo.

Entre los componentes del costo horario de la maquina están: (Farinango, 2014)

2.9.1.1 Costos fijos

- a) Depreciación:** disminución del valor inicial de la maquinaria, como producto de su uso durante el tiempo de vida económica. Se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.36. (Farinango, 2014)

$$D = \frac{Va - Vr}{Vu * Vuh} \quad (2.36)$$

Donde

D = Depreciación

Va = Valor de Adquisición

Vr = Valor Residual

Vu = Vida Útil en años

h_{año} = Horas año. (Farinango, 2014)

- b) Inversión:** interés del capital invertido en el equipo o maquinaria de construcción. Se obtiene de acuerdo con la Ecuación 2.37. (Farinango, 2014)

$$I = \frac{(Va + Vr) * i}{2 * H_{año}} \quad (2.37)$$

Dónde:

I = Inversión

Va = Valor de Adquisición

Vr: = Valor Residual

i = Tasa de Interés

Haño = Horas año. (Farinango, 2014)

c) Seguros: son los gastos en seguros que cubren los riesgos a los que están sometidos la maquinaria y equipo de construcción a los daños que sufran. Se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.38. (Farinango, 2014)

$$S = \frac{(Va + Vr) * s}{2 * H_{año}} \quad (2.38)$$

Dónde:

S = Seguros

Va = Valor de Adquisición

Vr = Valor Residual

s = Tasa de Seguros

Haño: Horas año. (Farinango, 2014)

d) Mantenimiento: es el precio por hora por concepto de mantenimiento de la maquinaria para conservar en buen estado durante la ejecución del proyecto. Se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.39. (Farinango, 2014)

$$MM = km * D \quad (2.39)$$

Dónde:

MM = Mantenimiento

D = Depreciación

km = 0.23. (Farinango, 2014)

2.9.1.2 Costos por consumos

a) Repuestos: repuestos para reparaciones necesarias en las maquinarias o equipo, que incluye el personal y equipos auxiliares. Se lo obtiene de acuerdo con la Ecuación 2.40. (Farinango, 2014)

$$R = kr * D \quad (2.40)$$

Dónde:

R = Repuestos

D = Depreciación

kr = 0.7425. (Farinango, 2014)

b) Combustibles: costo del consumo horario de Diesel de la maquinaria. Se lo obtiene de acuerdo con la Ecuación 2.41. (Farinango, 2014)

$$DIESEL = kd * PT * \$/galón \quad (2.41)$$

Dónde:

DIESEL = Gasto en Diesel

PT = Potencia

\$/galón = Costo Actual del Diesel

kd = 0.04. (Farinango, 2014)

c) Lubricantes: costo horario de grasas y lubricantes, para cambios periódicos en el mantenimiento de los motores de los equipos utilizados. Se lo obtiene de acuerdo con la Ecuación 2.42. (Farinango, 2014)

$$L = (kl * lub + kg * gra) * PT \quad (2.42)$$

Donde

kl = 0.00132

kg = 0.001. (Farinango, 2014)

d) Neumáticos: costo horario del desgaste de neumáticos de la maquinaria utilizada. Se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.43. (Farinango, 2014)

$$N = \frac{V_n}{H_{año}} \quad (2.43)$$

Dónde:

N = Gasto en Neumáticos

Vn = Valor de Neumáticos

Haño = Horas año

e) Matricula MTOP: permisos de funcionamiento que el contratista debe cancelar. Se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.44. (Farinango, 2014)

$$MAT = 0.001 \frac{V_a}{H_{año}} \quad (2.44)$$

Dónde:

MAT = Matriculación

Va = Valor de Adquisición

Haño = Horas año. (Farinango, 2014)

2.9.2 Costos Indirectos

Son los costos necesarios para la realizar el proyecto, no comprendidos en los costos directos, como por ejemplo impuestos, garantías, imprevistos, gastos de oficina entre otros. Éstos están representados como un parte de los costos directos de la obra. (Farinango, 2014)

Están comprendidos dentro de los siguientes parámetros:

- Beneficios Sociales y de Trabajo.
- Amortización o alquiler de maquinaria, equipo y herramientas.
- Gastos generales en los que están comprendidos los siguientes rubros
 - a) Alquiler de oficinas, teléfono, limpieza y otros.
 - b) Sueldos de personal administrativo.
 - c) Material de oficina.
 - d) Gastos de movilidad
 - e) Gastos en la compra de documentos de Licitación y otros.
 - f) Gastos notariales.
 - g) Gastos de garantía
 - h) Pago de impuestos. (Calle, 2014)

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación de la zona de estudio

Los datos que se utilizaron en este proyecto de investigación se obtuvieron del sector Santa Rosa, parroquia La Libertad, cantón Espejo, provincia del Carchi.

La ubicación exacta de la zona de estudio es: Latitud: 0°39'28.30"N; Longitud: 77°57'34.86"O; Elevación: 3013 m.s.n.m. Ver Figura 27.

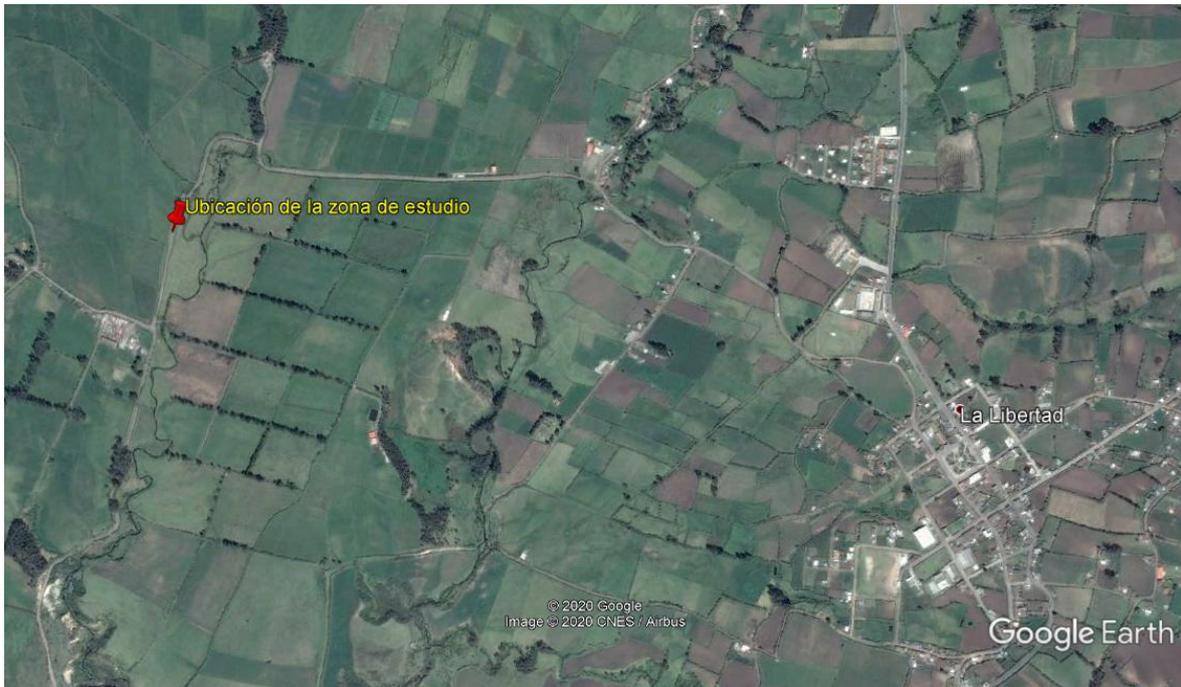


Figura 27. Ubicación de la zona de estudio, provincia del Carchi, Cantón Espejo, parroquia La Libertad, sector Santa Rosa.

Fuente: (Tomado de Google Earth)

Este sector es uno de los principales productores agropecuarios de la provincia del Carchi, por esta razón el proyecto de investigación experimental se lo desarrollo en dicho entorno. Según datos proporcionados en el Plan de Desarrollo Territorial de la Parroquia Rural La Libertad, muestra datos sobre los principales productos cultivados en la zona descritos en la Tabla 25. (Grupo ACME, 2015)

Tabla 25*Principales productos del territorio en estudio.*

Cultivos permanentes	Cultivos transitorios o barbecho	Descanso	Pastos cultivados	Pasto natural	Páramo	Monte y bosque	Otro uso	Total
3%	10%	1%	27%	31%	12%	14%	2%	100%

Obtenido de: Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural La Libertad , 2015, pág. 118

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

De estos datos se puede notar que la mayoría del territorio está compuesto de zonas productivas, ya sea de cultivos transitorios, como de pastos que servirán de alimento para el ganado vacuno es su mayoría, por lo cual es necesario una red vial de buena calidad para poder transportar los productos hacia las grandes ciudades. De visitas realizadas al sector se observó que las vías de transporte se encuentran en precarias condiciones, en su mayoría empedrados, que no satisfacen con la demanda de transporte pesado que circula en esta zona.

3.2 Recopilación de datos

Los datos necesarios fueron recolectados mediante trabajo de campo en la zona, ensayos en laboratorio tras toma de muestras y el uso de información meteorológica, fueron indispensables en el desarrollo de la investigación.

Los detalles de esta recopilación de información se encuentran en los apartados siguientes de este documento.

3.2.1 Información meteorológica del sector de estudio

La información recolectada acerca de las precipitaciones de la zona, así como también de la temperatura, indicaron que en la parroquia La Libertad se generan precipitaciones que varían entre 750 – 1250 mm, (Ver Figura 28) las cuales son decrecientes de Sur a Norte, ocasionando que la zona más húmeda sea el centro de la parroquia, zona en la cual se incluye la ubicación del proyecto de investigación. Por otro lado, la temperatura fluctúa entre 4 – 10 °C, (Ver Figura 29) mostrando claramente que el clima es húmedo y frío, por lo cual los materiales que deben usarse en este sector se deben acoplar a estas rigurosas condiciones climáticas. Estos datos se obtuvieron del Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural La Libertad , 2015.

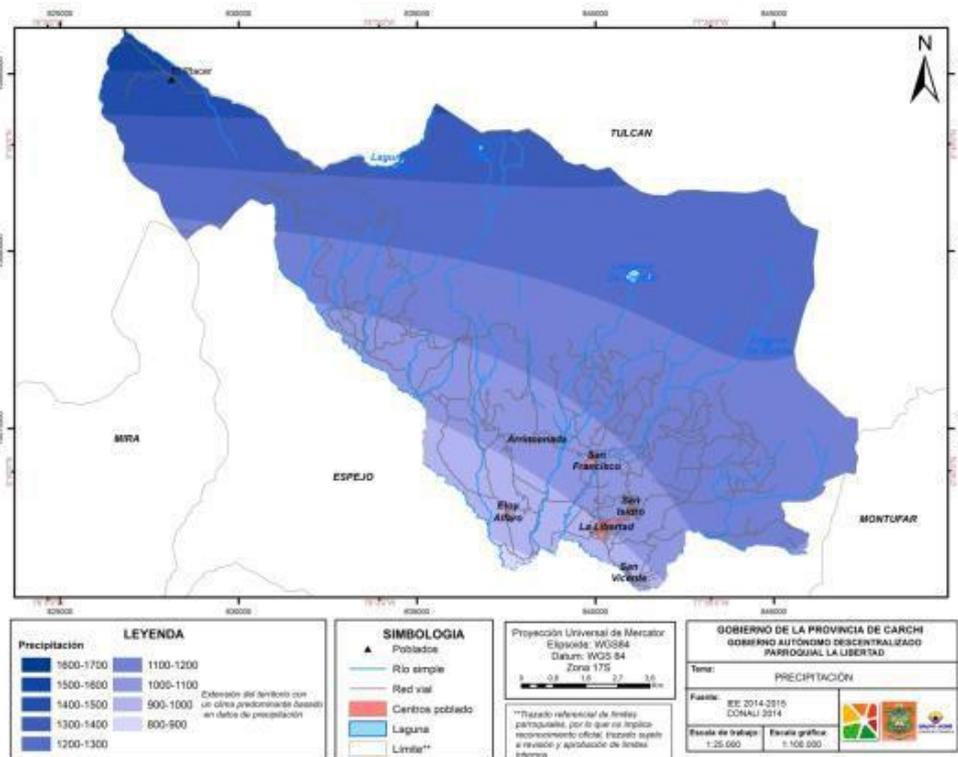


Figura 28. Mapa de precipitación parroquia La Libertad.

Fuente: (Grupo ACME, 2015, pág. 52)

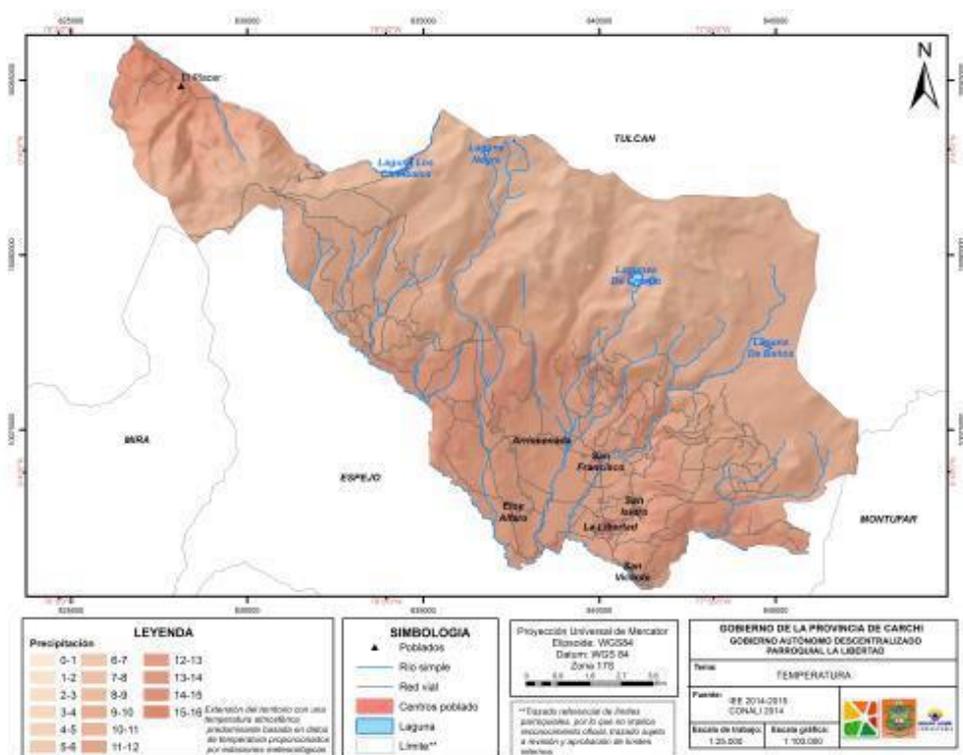


Figura 29. Mapa de temperatura parroquia La Libertad.

Fuente: (Grupo ACME, 2015, pág. 53)

3.2.2 Información del estado actual del tráfico

Para obtener los datos de tráfico actual en el sector de estudio, se realizó un aforo manual en la vía de estudio, ya que en este sector no se dispone de conteos automatizados. La metodología que se utilizó en el conteo es la siguiente:

- Se buscó información acerca de la clasificación, tipos de vehículos existentes y número de ejes, con estos datos se realizó una hoja formato para el registró de la cantidad de vehículos por hora que circulaban en la vía.
- Se realizó el conteo por 12 horas durante 4 días (viernes, sábado, domingo y lunes), de los cuales el sábado fue festivo en la parroquia La Libertad.
- Se realizó un conteo en ambos sentidos como se muestra en la Figura 30, en el Anexo 2 se encuentran los formatos para realizar el conteo manual.



Figura 30. Conteo vehicular en dos sentidos.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- Para finalizar se realizó el procesamiento de los datos y se los tabuló, se observa un ejemplo en la Tabla 26 y su continuación en el Anexo 3.

Tabla 26

Cuadros de resumen conteo vehicular.

FECHA:		VIERNES, 28/06/2019				
AFORO NUM.:		1				
SENTIDO DE CONTEO:		SALIDA LA LIBERTAD				
ESTADO DEL TIEMPO:		NUBLADO				
DIA FESTIVO:		NO				
TIEMPO	Vehículos ligeros	CAMIÓN 2D	CAMIÓN 2DB	CAMIÓN 3A	Buses BP-5	TOTAL
07h00-08h00	5	1	1	0	0	7
08h00-09h00	5	0	1	0	1	7

09h00-10h00	4	0	1	0	0	5
10h00 - 11h00	4	1	1	0	0	6
11h00 - 12h00	5	1	1	0	0	7
12h00 - 13h00	2	1	1	0	0	4
13h00 - 14h00	6	1	1	0	1	9
14h00 - 15h00	5	0	1	0	1	7
15h00 - 16h00	6	1	1	0	1	9
16h00 - 17h00	6	1	1	0	1	9
17h00 - 18h00	6	1	1	0	1	9
18h00 - 19h00	5	1	1	0	0	7
TOTAL	59	9	12	0	6	86
PORCENTAJE	68.6%	10.5%	14.0%	0.0%	7.0%	100.0%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.2.3 Información de las características del suelo

Para obtener los datos del suelo, se tomó una muestra bajo la capa de rodadura actual de la vía (empedrado), como indica la Figura 31, esta muestra se la llevó al laboratorio para realizar el siguiente conjunto de ensayos, y así caracterizar el suelo:



Figura 31. Toma de muestra inalterada de suelo en la vía de estudio.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- Clasificación de suelos SUCS

Estos ensayos permiten clasificar al suelo, y ubicar los límites de Atterberg que tiene el mismo, durante sus diferentes estados. Son ensayos requeridos para realizar una clasificación general del suelo.

El ensayo mediante el cual se determina el límite líquido está dado por la Norma ASTM D2487-17. Determinación del límite líquido. Método de Casa Grande. Ver Figura 32.



Figura 32. Ensayo límite líquido por el método de Casa Grande.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

De la misma forma, el ensayo para determinar el límite plástico está dado por la Norma ASTM D2487-17. Determinación del límite plástico. Ver Figura 33.



Figura 33. Ensayo límite plástico.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Para completar la clasificación SUCS del suelo se realiza el ensayo de granulometría, el cual permitió establecer la curva de distribución según el tamaño de las partículas, cumpliendo con lo establecido en la Norma ASTM D2487-17. Ver Figura 34.



Figura 34. Ensayo para obtener granulometría.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El procesamiento de datos de los ensayos mencionados lo realizó el Laboratorio de Ensayo de materiales y Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Escuela Politécnica Nacional, proporcionando el informe de resultados que se muestra en el Anexo 4.

- Compactación: Proctor modificado

Mediante este ensayo se estimó el contenido de humedad óptimo para obtener la densidad máxima del suelo, es decir, el nivel óptimo de compactación. El resultado de este ensayo fue indispensable para posteriormente realizar el ensayo de CBR. Este procedimiento se lo realizó en base a la norma ASTM D-1557-12. Ver Figura 35, 36.



Figura 35. Tamizado para determinar el método de ensayo proctor.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza



Figura 36. Compactación de la muestra usando martillo manual.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Luego de procesar los datos, el laboratorio LEMSUR proporcionó el informe de resultados que se muestra en el Anexo 5.

- Índice de Soporte California CBR

Para determinar la capacidad de soporte del suelo se realizó este ensayo, el cual se desarrolló para la subrasante ubicada bajo el empedrado, el mismo que se detalla en la norma ASTM D1883-16. Ver Figura 37.



Figura 37. Ensayo California C.B.R.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Los resultados de este ensayo fueron proporcionados por el laboratorio LEMSUR, mediante un informe correspondiente, el cual se muestra en el Anexo 6.

- Ensayo de Placa o C.B.R. de Campo.

Como ya se mencionó, el ensayo de CBR en laboratorio proporcionó únicamente datos para la subrasante, mas no de toda la estructura conformada por el empedrado y el suelo natural, debido a esto se realizó este ensayo para determinar la capacidad portante de toda la estructura. La norma que rige este procedimiento es la ASTM D4429-09. Ver Figura 38.



Figura 38. Ensayo de Placa o C.B.R. de campo.

Fuente: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Los resultados dados por el laboratorio LEMSUR se muestran en el Anexo 7.

3.3 Diseño de los pavimentos

3.3.1 Diseño pavimento flexible bituminoso de asfalto colocado en frio con metodología AASHTO

3.3.1.1 Estudio del tráfico

– Trafico Promedio Diario (TPD)

Para conocer el volumen de tráfico se necesitan los datos tomados en el aforo vehicular realizado, datos que fueron incrementados en un 14% valor correspondiente a factor horario calculado según la Ecuación 2.18, esto con la finalidad de considerar los días restantes que no se realizó el conteo.

Con el aumento del 14% se obtiene el valor del TPD de entrada y salida de vehículos calculado con la Ecuación 2.19 según el ejemplo que se muestra a continuación para vehículos ligeros del día viernes:

$$TPD = TTD * FH$$

$$TPD = 62 * 1.14 = 71$$

El valor del TPD Total para cada uno de los vehículos es el promedio de los resultados obtenidos anteriormente de todos los días, estos valores se muestran a continuación en la Tabla 27 y 28.

Tabla 27

Resumen Diario de vehículos. Entrada a la Libertad

DIAS	TIPO	VOLUMEN DIARIO	V.DIARIO (+14%)
VIERNES	V.LIGEROS	62	71
	CAMIÓN 2D	9	10
	CAMIÓN 2DB	12	14
	CAMIÓN 3A	1	1
	Buses BP-5	7	8
SABADO	V.LIGEROS	59	67
	CAMIÓN 2D	9	10
	CAMIÓN 2DB	16	18
	CAMIÓN 3A	2	2
	Buses BP-5	6	7
DOMINGO	V.LIGEROS	51	58
	CAMIÓN 2D	7	8
	CAMIÓN 2DB	14	16
	CAMIÓN 3A	1	1
	Buses BP-5	5	6
LUNES	V.LIGEROS	59	67

	CAMIÓN 2D	6	7
	CAMIÓN 2DB	25	29
	CAMIÓN 3A	0	0
	Buses BP-5	11	13
TPD	V.LIGEROS		66
	CAMIÓN 2D		9
	CAMIÓN 2DB		20
	CAMIÓN 3A		2
	Buses BP-5		9
	TOTAL		106

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 28

Resumen Diario de vehículos. Salida a la Libertad

DIAS	TIPO	VOLUMEN DIARIO	V.DIARIO (+14%)
VIERNES	V.LIGEROS	59	67
	CAMIÓN 2D	9	10
	CAMIÓN 2DB	12	14
	CAMIÓN 3A	0	0
	Buses BP-5	6	7
SABADO	V.LIGEROS	60	68
	CAMIÓN 2D	8	9
	CAMIÓN 2DB	17	19
	CAMIÓN 3A	1	1
	Buses BP-5	3	3
DOMINGO	V.LIGEROS	50	57
	CAMIÓN 2D	7	8
	CAMIÓN 2DB	16	18
	CAMIÓN 3A	1	1
	Buses BP-5	5	6
LUNES	V.LIGEROS	61	70
	CAMIÓN 2D	10	11
	CAMIÓN 2DB	19	22
	CAMIÓN 3A	0	0
	Buses BP-5	8	9
TPD	V.LIGEROS		66
	CAMIÓN 2D		10
	CAMIÓN 2DB		119
	CAMIÓN 3A		1
	Buses BP-5		7
	TOTAL		103

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Posteriormente se obtuvieron valores de volúmenes anuales, multiplicando el tráfico de cada día por el número de días que tiene el año, es decir para el día lunes se multiplicó por 52 que es cantidad de días lunes que tiene el año y se lo realizó de la misma manera para los demás días como se muestra en la Tabla 29 y 30.

Tabla 29

Volumen anual de tráfico. Entrada a La Libertad

DIAS	TIPO	VOLUMEN DIARIO	V.DIARIO (+15%)	Nº DIAS	VOLUMEN ANUAL
VIERNES	V.LIGEROS	62	71	52	3676
	CAMIÓN 2D	9	10	52	534
	CAMIÓN 2DB	12	14	52	712
	CAMIÓN 3A	1	1	52	60
	Buses BP-5	7	8	52	415
SABADO	V.LIGEROS	59	67	52	3498
	CAMIÓN 2D	9	10	52	534
	CAMIÓN 2DB	16	18	52	949
	CAMIÓN 3A	2	2	52	119
	Buses BP-5	6	7	52	356
DOMINGO	V.LIGEROS	51	58	52	3024
	CAMIÓN 2D	7	8	52	415
	CAMIÓN 2DB	14	16	52	830
	CAMIÓN 3A	1	1	52	60
	Buses BP-5	5	6	52	297
LUNES	V.LIGEROS	59	67	52	3498
	CAMIÓN 2D	6	7	52	356
	CAMIÓN 2DB	25	29	52	1482
	CAMIÓN 3A	0	0	52	0
	Buses BP-5	11	13	52	653

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 30

Volumen anual de tráfico. Entrada a La Libertad

DIAS	TIPO	VOLUMEN DIARIO	V.DIARIO (+15%)	Nº DIAS	VOLUMEN ANUAL
VIERNES	V.LIGEROS	59	67	52	3498
	CAMIÓN 2D	9	10	52	534
	CAMIÓN 2DB	12	14	52	712
	CAMIÓN 3A	0	0	52	0
	Buses BP-5	6	7	52	356
SABADO	V.LIGEROS	60	68	52	3557
	CAMIÓN 2D	8	9	52	475
	CAMIÓN 2DB	17	19	52	1008

	CAMIÓN 3A	1	1	52	60
	Buses BP-5	3	3	52	178
DOMINGO	V.LIGEROS	50	57	52	2964
	CAMIÓN 2D	7	8	52	415
	CAMIÓN 2DB	16	18	52	949
	CAMIÓN 3A	1	1	52	60
	Buses BP-5	5	6	52	297
LUNES	V.LIGEROS	61	70	52	3617
	CAMIÓN 2D	10	11	52	593
	CAMIÓN 2DB	19	22	52	1127
	CAMIÓN 3A	0	0	52	0
	Buses BP-5	8	9	52	475

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

– Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)

Para obtener el TPDA, se sumó los volúmenes anuales de cada tipo de vehículo y se dividieron para 208 que es el número total de días viernes, sábado, domingo y lunes que tiene el año, esto se lo realizó en ambos sentidos como se indica en la Tabla 31 y 32.

Tabla 31

Cálculo del TPDA. Entrada a La Libertad

TPDA	V.LIGEROS	66
	CAMIÓN 2D	9
	CAMIÓN 2DB	20
	CAMIÓN 3A	2
	Buses BP-5	9
	TOTAL	106

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 32

Cálculo del TPDA. Salida a La Libertad

TPDA	V.LIGEROS	66
	CAMIÓN 2D	10
	CAMIÓN 2DB	19
	CAMIÓN 3A	1
	Buses BP-5	7
	TOTAL	103

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se calcula un TPDA promedio de los dos sentidos de circulación de los vehículos, y finalmente se obtiene un valor de TPDA Total, resultado de la suma de estos promedios ya mencionados. Ver Tabla 33.

Tabla 33

TPDA Total

V.LIGEROS	66
CAMIÓN 2D	10
CAMIÓN 2DB	20
CAMIÓN 3A	2
Buses BP-5	8
TPDA TOTAL	106

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

– **Periodo de diseño**

Ya que el estudio de la vía está ubicado se centra en un sector rural y el volumen de tráfico por ende es bajo, la AASHTO 93 recomienda que el periodo de diseño de un pavimento flexible este en el rango de 10 a 20 años.

Para el cálculo en el diseño se tomó un valor de 10 años buscando el beneficio económico de la construcción de la vía y posteriormente un mantenimiento adecuado.

– **Tráfico Futuro (Tf)**

Como no se disponen datos de crecimiento de la producción del sector, ni de consumo de combustible, se recopiló la información de la tasa de crecimiento poblacional de la parroquia La Libertad, cuyo valor es de 0.05% valor proporcionado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural La Libertad , 2015.

Al momento de diseñar el espesor de la capa de rodadura bituminosa no se requiere los datos del TPDA de los vehículos livianos, ya que no generan mayor daño y deformaciones en la superficie de rodadura en comparación a los vehículos pesados, por ello el tráfico futuro y posteriores cálculos se realizan solo con vehículos pesados que circularon en el sector.

El tráfico futuro es la suma de cada valor de vehículos pesados futuros (Ver Tabla 34), calculado según la Ecuación 2.20 para cada tipo de vehículo, como se indica en el ejemplo siguiente:

$$Tf_{CAMION\ 2D} = TPDA_{CAMION\ 2D}(1 + i)^n$$

$$Tf_{CAMION\ 2D} = 10\left(1 + \frac{0.05}{100}\right)^{10}$$

$$Tf_{CAMION\ 2D} = 11$$

Tabla 34

Composición de TPDA (Vehículos pesados), periodo de retorno 10 años

TIPO DE VEHÍCULO	2020	%		2030	%
CAMIÓN 2D	10	25.00%		11	25.00%
CAMIÓN 2DB	20	50.00%		21	47.73%
CAMIÓN 3A	2	5.00%		3	6.82%
Buses BP-5	8	20.00%		9	20.45%
TPDA inic. =	40	100%	TPDA fin. =	44	100%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.3.1.2 Factor de Equivalencia (FCE)

Los valores de FCE para cada tipo de vehículo se calcularon según la Tabla 13, dependiendo del tipo y cantidad de ejes de los vehículos y cargas axiales de cada eje según la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones (Ver Anexo 1).

Para el caso del CAMION 2D, se muestra en la Tabla 35 el ejemplo de cálculo siguiente:

Tabla 35

Factor equivalente para CAMION 2D

Camión 2D	EE1	EE1	TPDA %
Ejes	E1	E2	25.00%
Carga según Censo de carga (Ton)	3	4	
Tipo de eje	Eje Simple	Eje Simple	
Tipo de rueda	Rueda Simple	Rueda Simple	
Peso	3	4	

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

$$E_1 = \left[\frac{3}{6.6}\right]^4$$

$$E_1 = 0.043$$

$$E_2 = \left[\frac{4}{6.6}\right]^4$$

$$E_2 = 0.135$$

El valor total de cada tipo de vehículo en este caso CAMION 2D, se lo representó como la suma de los factores de cada eje, multiplicado por 25% valor del TPDA en porcentaje de ese vehículo.

$$E_{TOTAL-CAMION 2D} = (0.043 + 0.1359) * 25\%$$

$$E_{TOTAL-CAMION 2D} = 0.044401$$

De la misma manera se realizó este cálculo para los demás vehículos como se indica en la Tabla 36, teniendo como resultado el Factor de Equivalencia total, resultado de la suma de cada factor los tipos de vehículos.

Tabla 36
Factor de Equivalencia (FCE)

Tipo de Vehículo			
Camión 2D	EE1	EE1	TPDA %
Ejes	E1	E2	25.00%
Carga según Censo de carga (Ton)	3	4	
Tipo de eje	Eje Simple	Eje Simple	
Tipo de rueda	Rueda Simple	Rueda Simple	
Peso	3	4	Total Factor
Factor E.E	0.043	0.135	0.044401
Tipo de Vehículo			
Buses BP-5	EE1	EE1	TPDA %
Ejes	E1	E2	20.23%
Carga según Censo de carga (Ton)	3.9	9.2	
Tipo de eje	Eje Simple	Eje Simple B	
Tipo de rueda	Rueda Simple	Rueda Simple	
Peso	3.9	9.2	Total Factor
Factor E.E	0.122	3.776	0.78834

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.3.1.3 Factor direccional y factor carril

Según la observación realizada y el tamaño de las vías de estudio se optó por construir una calzada, con dos sentidos, con esta información se eligió el factor de dirección con un valor de 0.5 según corresponde a la Tabla 12.

3.3.1.4 Número de ejes totales

Con esta información y los del tráfico promedio diario anual se procedió a calcular el número de repeticiones de ejes estándar totales para el periodo de diseño de 10 años, según la Ecuación 2.21

$$N_{8.2T} = T_o * FDT * FEC * FC * 365 * n$$

$$N_{8.2T} = 42 * 0.5 * 3.29 * 1 * 365 * 10$$

$$N_{8.2T} = 2.522e^5$$

3.3.1.5 Serviciabilidad

Según el grado de confort escogido de la Tabla 13, basado en recomendaciones de la AASHTO 93 para el pavimento flexible y la importancia del camino, se tiene que:

$$P_o = 4.5$$

$$P_t = 2.5$$

Se obtuvo como resultado una pérdida de servicio igual a 2 según la Ecuación 2.22.

3.3.1.6 Confiabilidad

Este valor se escogió de acuerdo con el sector de estudio y el tipo de vía que corresponda, para el caso del proyecto se tiene una vía colectora en una zona rural, de acuerdo con estas características se escogió un valor conservador de 75%.

3.3.1.7 Desviación estándar total (So)

La AASHTO-93, recomienda valores en la variación de predicción del comportamiento del pavimento, con errores, que varía entre 0.39 y 0.49; y sin errores, valores entre 0.34 a 0.44. Para este caso en particular se escogió valores con error y según la Tabla 15, se tomó un valor de 0.44.

3.3.1.8 Desviación estándar normal (So)

Este parámetro se relaciona directamente del valor escogido de la confiabilidad indicado en la Tabla 17, para este estudio se tiene una confiabilidad de 75, y un valor de desviación estándar total (So) de -0.674.

3.3.1.9 Módulo Resiliente de la Subrasante

Para el caso del proyecto se requirió caracterizar el conjunto subrasante-empedrado y la subbase escogida con este parámetro, el cual depende de los valores de CBR ya obtenidos en laboratorio en el apartado 3.2.3.

Para el caso del conjunto subrasante-empedrado y según la Ecuación 2.23 se tiene que:

$$Mr = 2555 * 10^{0.64}$$

$$Mr = 11413 \text{ psi}$$

Del mismo modo el valor Mr para la subbase:

$$Mr = 2555 * 50^{0.64}$$

$$Mr = 32488 \text{ psi}$$

3.3.1.10 Numero estructural requerido (SNr)

En este cálculo se utilizó el programa DISAASHTO-93 que utiliza las variables ya calculadas anteriormente y mediante la Ecuación 2.24, así como también se hizo el uso de ábacos con el fin de comparar estos valores.

Para el caso de este proyecto (Ver Figura 39), se obtuvo el valor de SN1(Subbase)=1.38, mediante el programa. Ver Figura 40.

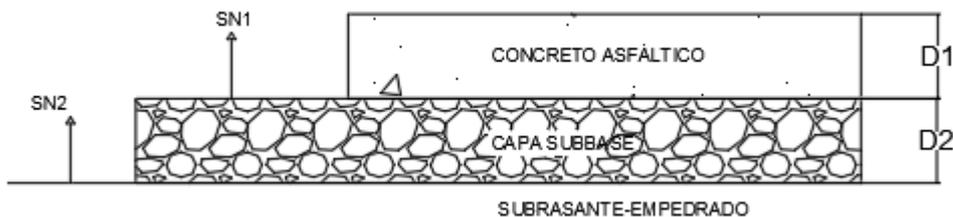


Figura 39. Esquema estructura del pavimento flexible del proyecto
Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

DISAASHTO93 - CALCULAR SN

FORMULARIO DE ENTRADA PARA CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL SN

DISAASHTO-93
PROGRAMADO POR: ING. ARMANDO E. GARCIA M.
INGENIERIA

$$\text{LOG}(W) = ZR * S_o + 9.36 * \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \text{Log}(MR) - 8.07$$

DATOS DE ENTRADA

TRANSITO W(8.2) DESVIACION ESTANDAR TOTAL (So)

MODULO RESILIENTE (PSI) DIF. INDICES DE SERVIC. (ΔPSI)

DESVIACION ESTANDAR NORMAL (-ZR)

NUMERO ESTRUCTURAL (SN) =

Figura 40. Cálculo SNr con programa DISAASHTO

Fuente: Software DISAASHTO

De la misma manera se obtuvo un valor de SN2(subrasante-empedrado) de 2.09
Por otro lado, en el uso del ábaco se obtuvieron los siguientes valores. Ver Figura 41.

SN1(Subbase)=1.38

SN2(subrasante-empedrado =2.09

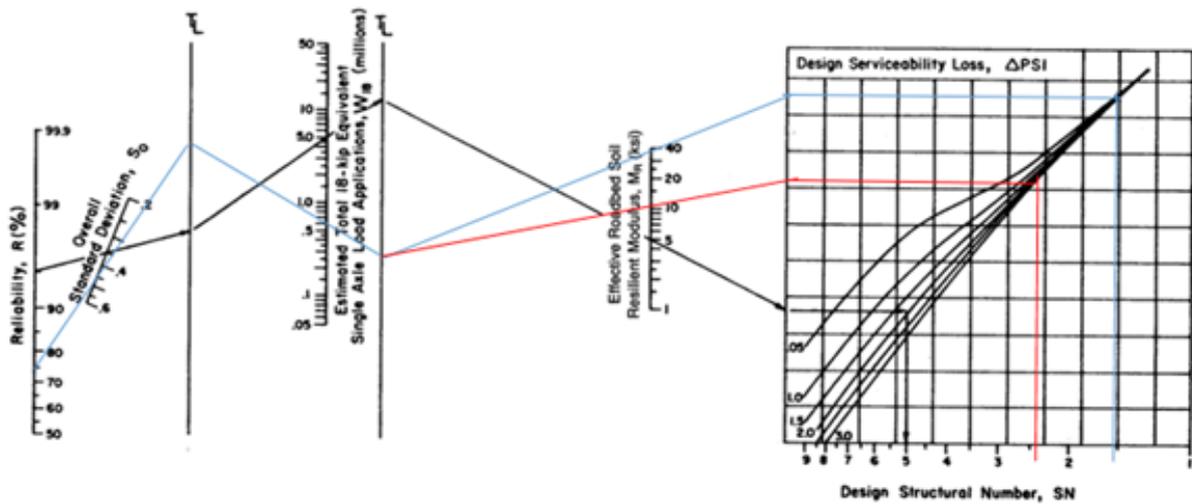


Figura 41. Determinación del SN mediante nomograma

Fuente: (AASHTO-93, 1993)

Ya que el uso de ábacos depende del criterio del observador, mas no del proceso de cálculo de la Ecuación 2.24 se escogieron los resultados del programa DISAASHTO.

3.3.1.11 Coeficientes Estructurales

Coeficiente estructural para subbase a2

Para determinar el coeficiente estructural la AASHTO 93, establece un Abaco (Ver Figura 42), el cual se basa en diferentes resultados de pruebas de laboratorio. Se determino un valor de 0.126 1/pulg

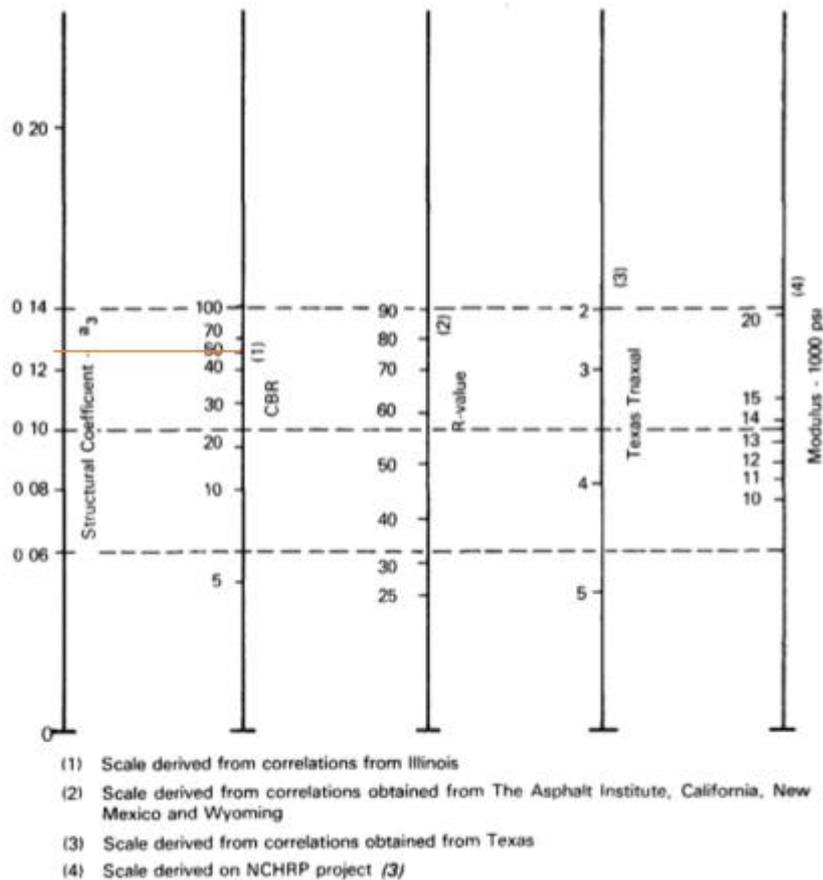


Figura 42. Variación del coeficiente de la capa de sub-base granular.

Fuente: (AASHTO-93, 1993)

Coeficientes estructurales para capa asfáltica a1

De la misma manera la AASHTO 93, proporciona una gráfica para estimar el valor estructural del concreto asfáltico (Ver Figura 43), el cual depende del Módulo de elasticidad del asfalto en frio, teniendo un valor aproximado de 280000 psi. (AASHTO-93, 1993)

Según el valor del Módulo de elasticidad, se determinó que el coeficiente estructural tiene un valor de 0.351, 1/pulg.

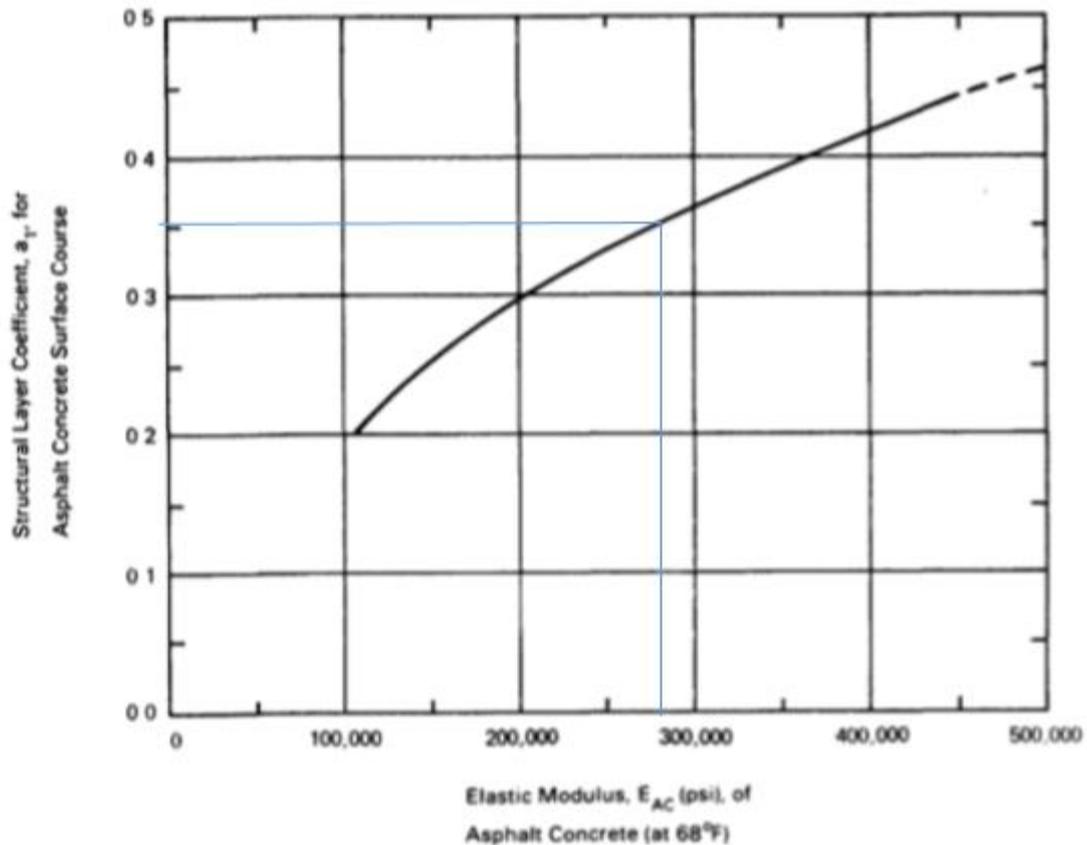


Figura 43. Gráfica para la estimación del coeficiente estructural la capa de concreto asfáltico.
Fuente: (AASHTO-93, 1993)

3.3.1.12 Drenaje

Mediante la información obtenida del clima y características del suelo del sector y la vía de estudio, se optó por tomar un valor de 1.35 para el coeficiente de drenaje según los datos de la Tabla 18, que corresponde a una calidad de drenaje Buena y tiempo del pavimento que está expuesto a niveles de saturación menor al 1%.

3.3.1.13 Número estructural propuesto (SN) y espesor de las capas de la estructura del pavimento (D)

Se determinó mediante la ecuación 2.26 el valor de D1 que corresponde al espesor de la capa de rodadura (Ver Figura 39),

$$D1 \geq \frac{SN1}{a1}$$

$$D1 \geq \frac{1.38}{0.3425}, \text{ pulg}$$

$$D1 = 4.42 \text{ pulg} \approx 4.5 \text{ pulg}$$

Se recalcula SN1 con la Ecuación 2.27, obteniendo un SN*1:

$$SN^*1 = a1 * D1$$

$$SN^*1 = 0.351 * 4.5$$

$$SN^*1 = 1.41$$

$$SN^*1 = a1 * D^*1$$

$$SN^*1 \geq SN1; \text{Condición}$$

$$1.41 \geq 1.381; \text{Cumple}$$

Mediante la Ecuación 2.28 se obtiene el valor de D2 que corresponde al espesor de la capa de subbase de la estructura:

$$D^*2 = \frac{SN2 * SN^*1}{a2 * m2}$$

$$D^*2 = \frac{2.09 * 1.41}{0.126 * 1.35}$$

$$D^*2 = 4.03$$

Se recalcula SN2

$$SN^*2 = a2 * D2 * m2$$

$$SN^*2 = 0.126 * 5 * 1.35$$

$$SN^*2 = 0.8505$$

Según la Ecuación 2.29 debe cumplir que:

$$SN^*1 + SN^*2 \geq SN2$$

$$1.41 + 0.8505 \geq SN2$$

$$2.25 \geq 2.09; \text{Cumple}$$

Por último, se calculó el SN total de toda la estructura, basándose en la Ecuación 2.25:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$$

$$SN = 1.41 + 2.25$$

$$SN = 3.66$$

$$SN \geq SN1 + SN2 \text{ Cumple}$$

Como resultado final, se obtuvo que el espesor de la capa de rodadura del pavimento flexible es de 4 pulgadas y el espesor de la subbase Clase III de 5 pulgadas. Ver Figura 44.

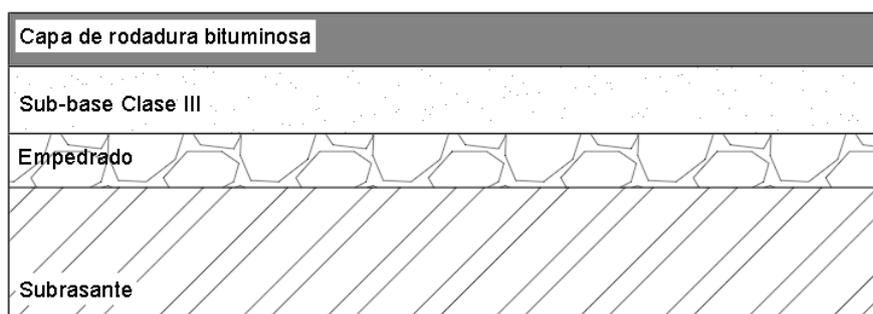


Figura 44. Espesores de diseño - Pavimento flexible.

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.3.2 Diseño de pavimento rígido de hormigón reforzado con fibras metálicas según metodología PCA

3.3.2.1 Resistencia del hormigón a flexión y compresión.

Para realizar el diseño del espesor de la capa de rodadura de hormigón con fibras de acero, en primer lugar, se determinó la resistencia que tendría el hormigón, para lo cual se tomó en cuenta los valores mínimos que menciona la norma MTOP-001-F publicado por el Ministerio de Obras Públicas, 2002, estos valores se observan a continuación en la Tabla 37.

Tabla 37

Datos de resistencia para capa de rodadura de hormigón.

DATOS HORMIGÓN PARA DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO						
S'c (MR)=	5	MPa	40.76	kg/cm ²	725.19	Psi
f'c=	30	MPa	305.70	kg/cm ²	4351.14	Psi

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se determinó este valor para la resistencia de hormigón puesto que el tipo de tráfico en el sector de estudio es un C3 que corresponde a Camino agrícola/forestal, y en la norma NEVI-12-VOLUMEN-2B del MTOP del Ecuador, 2013 menciona que para este tipo de vías se puede utilizar un hormigón de resistencia a la flexión de 3.5 – 4 MPa, por otra parte cabe mencionar que al introducir fibras metálicas se obtiene entre un 20 a 30% más de resistencia a la flexión S'c (MR), según (Ramírez & Samaniego, 2016), que es donde más trabajo tiene la capa de rodadura, es por esta razón que para efectos de diseño se ha tomado un valor superior en 25% a 4 MPa, es decir el valor de S'c (MR) para diseño de la superficie de rodadura es de 5

MPa, pero al momento de realizar la dosificación se la hizo para un S'c (MR) de 4 MPa sin fibras de acero de refuerzo.

3.3.2.2 Subrasante y sub-base.

Como ya se indicó en el capítulo 3.2.3 de este documento, se obtuvo un valor de CBR de 10% para el conjunto conformado por subrasante y empedrado existente, mediante ensayo de placa in situ. Este valor fue usado para determinar el módulo de reacción de la subrasante, en este caso el conjunto subrasante-empedrado. Utilizando la Figura 15 se determinó el módulo de reacción (k) para el CBR de 10%, obteniendo un valor de 200 pci (libra/pulgada²/pulgada).

Posteriormente se estableció el espesor a usar de la sub-base, puesto que ese valor es necesario para continuar con el proceso de diseño, se optó por un valor de 6 pulgadas, esto para tener una semejanza a la sub-base colocada en el diseño del asfalto bituminoso, y poder establecer un equitativo balance. Una vez determinado el espesor de la sub-base se procedió a ubicar en la Tabla 20 el valor del módulo de reacción de 200 pci y el valor del espesor de la sub-base de 6 pulgadas, así se obtuvo el valor de 230 pci de módulo de reacción del conjunto de materiales o llamado k_conjunto.

3.3.2.3 Periodo de diseño.

Como ya se mencionó en la Sección 3.3.1.1 el periodo de diseño se determinó en 10 años, ya que se trata de un análisis comparativo las condiciones deben ser equitativas para los dos tipos de pavimentos.

3.3.2.4 Factor de proyección

Para determinar el factor de proyección se siguió las recomendaciones de la Portland Cement Association que se mencionan en la Sección 2.6.1.4, por lo que inicialmente el Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia La Libertad, en su Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquia "La Libertad (Alizo)", menciona que existe una tasa de crecimiento de 0.05%; luego de analizar los factores de influencia mencionados en la Sección 2.6.1.4, se optó por determinar una tasa definitiva de 1.5%.

Con la tasa de crecimiento ya determinada se calculó a el factor de proyección usando la Ecuación 2.31 así:

$$F_{proy} = \frac{(1 + (\frac{1.5}{100}))^{10} - 1}{(1.5/100) * 10}$$

$$F_{proy} = 1.1$$

3.3.2.5 Factor de dirección

Se lo determinó de la Tabla 23, es decir, ya que la vía consta de 2 carriles, el factor de dirección será 0.5.

3.3.2.6 Factor de carril

Para determinar el factor de carril se observó la Figura 16, en la cual se ubica el ADT, que este caso no supera los 10 vehículos por día, por ende, el factor de carril es igual a 1.

3.3.2.7 Factor de seguridad de carga

Como indica la Sección 2.6.1.4, el factor de seguridad de carga o LSF se fijó en 1, ya que el número de vehículos que circulan por la vía de estudio es bajo.

3.3.2.8 Cálculo del Tráfico de diseño (ADT_{diseño}).

Una vez obtenidos los datos de conteo vehicular mostrados en la Sección 3.2.2, se procedió a determinar el tráfico promedio diario utilizando el método de la PCA. Para esto se siguió el siguiente procedimiento:

- Se tomó los datos de tráfico para vehículos pesados, como indica el método.
- Posteriormente se obtuvieron los valores de carga para cada eje ya sea simple o tándem, esto se obtiene de la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones (Anexo 1).
- A estos valores se convirtió sus unidades a kN, esto al multiplicarlos por 9.81.
- Se tomaron los datos de tráfico promedio diario anual (TPDA) ya calculado en la sección 3.3.1.1 en la Tabla 39 para el diseño del pavimento flexible.
- Para determinar el ADT_{diseño} se utilizó la Ecuación 2.32, a continuación, se utilizó los datos de buses como ejemplo de cálculo:

$$ADT_{diseño} = 8 * 1.1 * 0.5$$

$$ADT_{diseño} = 5$$

Este procedimiento se realizó con todos los vehículos pesados que circulan por la vía, como muestra la Tabla 38.

3.3.2.9 Cálculo del número de repeticiones esperadas.

Este cálculo es el último paso para obtener todos los datos necesarios para obtener el espesor del pavimento rígido, se lo calculó aplicando la Ecuación 2.33, se puede ver un ejemplo de cálculo en este caso para el tipo de vehículo buses:

$$N = 5 * 1 * 10 * 365$$

$$N = 18250$$

Como se mencionó antes este procedimiento se realiza con los demás tipos de vehículos pesados. Ver Tabla 38.

Tabla 38

Datos de ADT diseño y Repeticiones esperadas.

TIPO	S(T)	Ta(T)	Carga (9.81) (KN)	ADT	ADT diseño	N (Repeticiones Esperadas)
Bus	3.9	-	38	8	5	18250
	9.2	-	90			
2D	3	-	29	10	6	21900
	4	-	39			
2DB	7	-	69	20	11	40150
	11	-	108			
3A	7	-	69	2	2	7300
	-	20	196			

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.3.2.10 Cálculo del espesor de pavimento rígido.

Antes de todo se determinó que la vía de estudio no presenta bermas, una vez establecido esto, se dividió el análisis de los datos en los diferentes tipos de ejes, en este caso se tuvo dos tipos: eje simple y eje tándem, se realizó este procedimiento ya que para cada eje existe un ábaco de diseño diferente.

El primer análisis fue para el eje simple, y se lo realizó siguiendo este procedimiento:

- Se tomó el valor de la carga para los ejes simples de cada tipo de vehículo y se lo multiplicó por el factor de seguridad LSF.

- El siguiente paso fue transformar las unidades de kN a kips, ya que los ábacos de diseño se los encuentra en su mayoría con estas unidades de medida, la Tabla 39 muestra un resumen de los cálculos.

Tabla 39

Datos de carga vehicular y repeticiones esperadas de ejes simples.

CARGA (KN)		CARGA * LSF (KN)	CARGA * LSF (kips)	N (Repeticiones Esperadas)
Bus	38	38	9	18250
Bus	90	90	20	18250
2D	29	29	7	21900
2D	39	39	9	21900
2DB	108	108	24	40150
2DB; 3A	137	137	31	47450

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- Se seleccionó un espesor de pavimento de prueba, ya que es un método con proceso iterativo, para el caso se tomó un valor de 8 pulgadas.
- Posteriormente en la Tabla 40 con los datos de k_conjunto y espesor de prueba, se localizó el valor del factor de esfuerzo equivalente.

Tabla 40

Esfuerzo equivalente – Concreto sin berma (Eje simple/Eje Tándem).

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93

12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Obtenido de (Packard, 1984, pág. 14)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- Luego utilizando los mismos datos anteriores, se obtuvo el valor del factor de erosión de la Tabla 41.

Tabla 41

Factor de erosión – Doweled Joint, Concreto sin berma (Eje simple/Eje Tándem).

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Obtenido de (Packard, 1984, pág. 16)

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- Finalmente se obtuvo la relación de esfuerzo, mediante la relación entre el esfuerzo equivalente de la Tabla 40 y la resistencia a la flexión del hormigón (MR) en psi dispuesto en la Tabla 37.

$$\text{Relación de esfuerzo} = \frac{242}{725.19}$$

$$\text{Relación de esfuerzo} = 0.33$$

- Ya con todos estos factores mostrados en la Tabla 42, se va a los ábacos de diseño tanto para el análisis de fatiga como para análisis de erosión, en los ábacos se ubicaron los respectivos factores que indican en los mismos, como un ejemplo se indica en la Figura 45 y Figura 46 para la carga de 31 kips que corresponde a los tipos de vehículos 2DB; 3A (Tabla 39).

Tabla 42

Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes simples.

Esfuerzo Equivalente	242
Tabla 47	
Factor de erosión	2.8
Tabla 48	
Relación de Esfuerzo	0.33
Esf Equiv./MR (psi)	

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

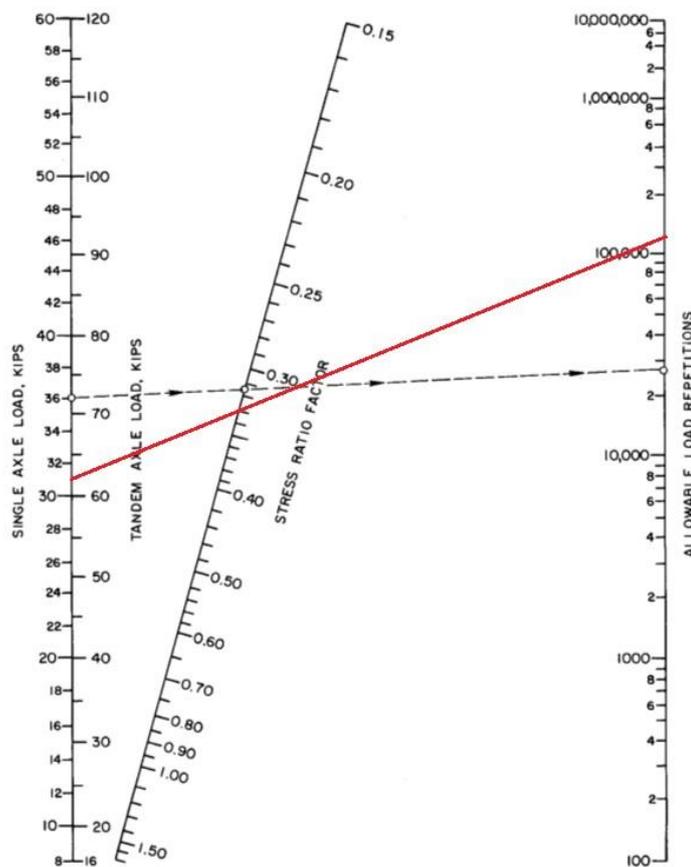


Figura 45. Ábaco para análisis de fatiga ejes simples.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 15)

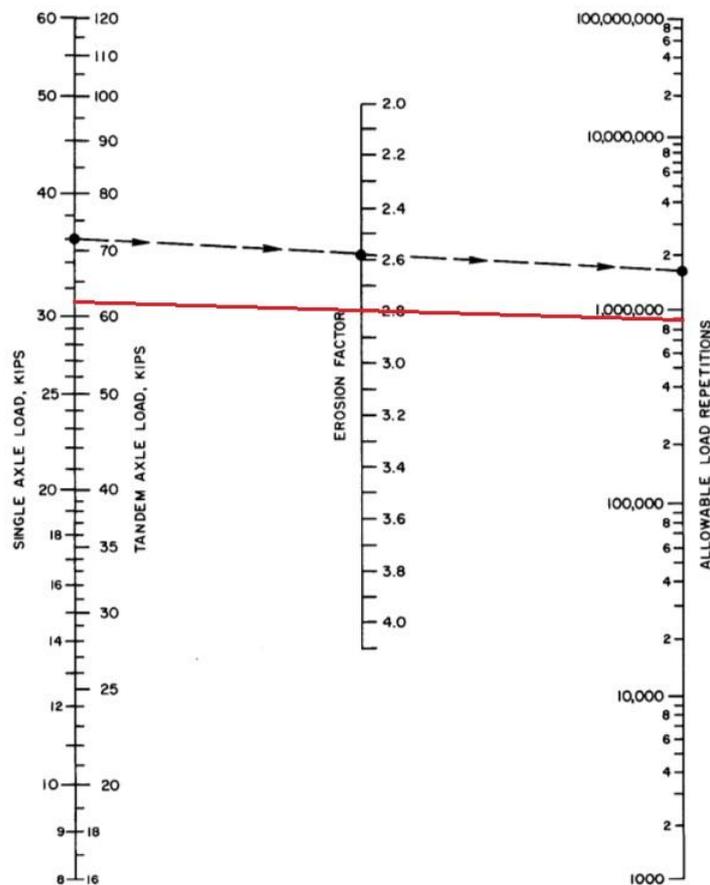


Figura 46. Ábaco para análisis de erosión ejes simples.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 17)

- Se realizó el análisis en los ábacos para todas las cargas, como resultado se obtuvo las repeticiones de carga admisibles, las cuales se relacionan con el número de repeticiones que admite el pavimento, para conseguir el porcentaje de fatiga y erosión. Ver Tabla 43.

Tabla 43

Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes simples.

CARGA (KN)		CARGA * FS (KN)	CARGA * FS (kips)	N (Repeticiones Esperadas)	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
					Repeticiones admisibles	% de fatiga	Repeticiones admisibles	% de Erosión
Bus	38	38	9	18250	ilimitado	0%	ilimitado	0%
Bus	90	90	20	18250	ilimitado	0%	15000000	0.1%
2D	29	29	7	21900	ilimitado	0%	ilimitado	0%
2D	39	39	9	21900	ilimitado	0%	ilimitado	0%
2DB	108	108	24	40150	ilimitado	0%	4000000	1.0%
2DB; 3A	137	137	31	47450	100500	47.2%	900000	5.3%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Luego de tener los resultados para los ejes simples se realiza el mismo procedimiento para los ejes tándem:

- En la Tabla 44 se muestra un resumen de los resultados.

Tabla 44

Datos de carga vehicular y repeticiones esperadas de ejes tándem.

CARGA (KN)		CARGA * LSF (KN)	CARGA * LSF (kips)	N (Repeticiones Esperadas)
3A	196	196	44	7300

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- El espesor de pavimento de prueba fue el mismo que en el caso de ejes simples, 8 pulgadas.
- De la Tabla 40 se obtuvo el valor del factor de esfuerzo equivalente y en la Tabla 41 se ubicó el valor del factor de erosión.
- Mediante la relación entre el esfuerzo equivalente de la Tabla 40 y la resistencia a la flexión del hormigón (MR) en psi dispuesto en la Tabla 37, se obtuvo la relación de esfuerzo.

$$\text{Relación de esfuerzo} = \frac{208}{725.19}$$

$$\text{Relación de esfuerzo} = 0.29$$

- El resumen de los factores para el diseño se muestra en la Tabla 45, con esto se va a los ábacos de diseño, para este caso se mostrará el ejemplo para el único caso en la Figura 47 y Figura 48.

Tabla 45

Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes tándem.

Esfuerzo Equivalente	242
Tabla 47	
Factor de erosión	2.8
Tabla 48	
Relación de Esfuerzo	0.33
Esf Equiv. /MR (psi)	

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

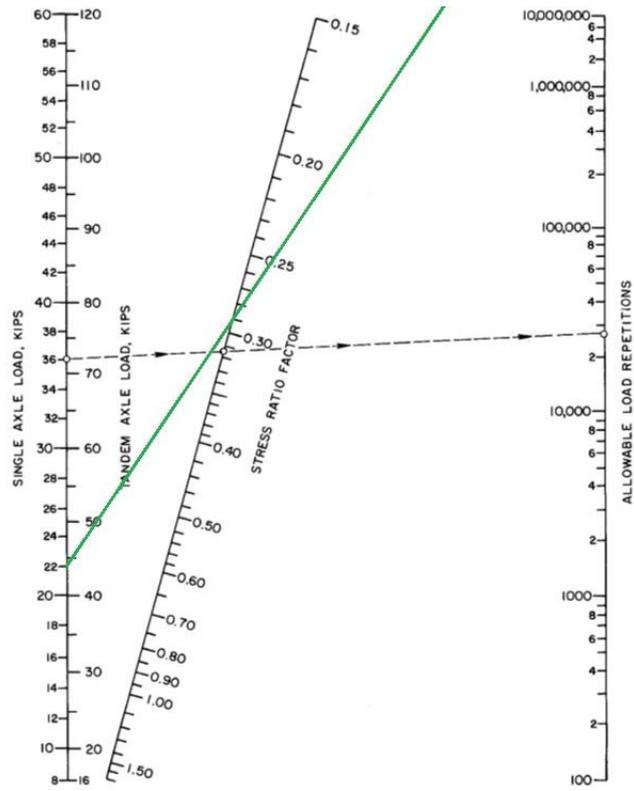


Figura 47. Ábaco para análisis de fatiga ejes tándem.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 15)

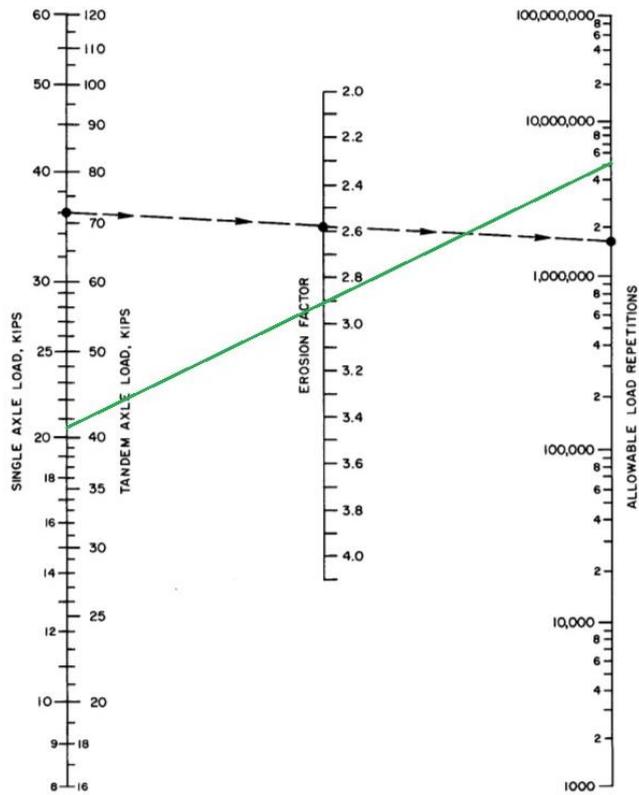


Figura 48. Ábaco para análisis de erosión ejes tándem.

Fuente: (Packard, 1984, pág. 17)

- El resultado de repeticiones de carga admisibles, se relacionaron con el número de repeticiones esperadas para conseguir el porcentaje de fatiga y erosión, ver Tabla 46.

Tabla 46

Factores de diseño del espesor de pavimento rígido ejes tándem.

CARGA (KN)	CARGA * LSF (KN)	CARGA * LSF (kips)	N (Repeticiones Esperadas)	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión		
				Repeticiones admisibles	% de fatiga	Repeticiones admisibles	% de Erosión	
3A	196	196	44	7300	ilimitado	0%	5000000	0.15%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Luego de realizar el procedimiento indicado anteriormente se obtuvo los resultados que se observan en la Tabla 47.

Tabla 47

Resumen de resultados de pavimento rígido.

RESUMEN DE RESULTADOS								
Espesor losa= 8 in								
CARGA (KN)	CARGA * LSF (KN)	CARGA * LSF (kips)	N (Repeticiones Esperadas)	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión		
				Repeticiones admisibles	% de fatiga	Repeticiones admisibles	% de Erosión	
SIMPLES								
Bus	38	38	9	18250	ilimitado	0.00%	ilimitado	0.00%
Bus	90	90	20	18250	ilimitado	0.00%	15000000	0.12%
2D	29	29	7	21900	ilimitado	0.00%	ilimitado	0.00%
2D	39	39	9	21900	ilimitado	0.00%	ilimitado	0.00%
2DB	108	108	24	40150	ilimitado	0.00%	4000000	1.00%
2DB; 3A	137	137	31	47450	100500	47.21%	900000	5.27%
TANDEM								
3A	196	196	44	7300	ilimitado	0.00%	5000000	0.15%
TOTAL						47.21%		6.54%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se llegó a la conclusión de que el espesor de 8 pulgadas es adecuado para el tráfico que transita por la vía de estudio, ya que los porcentajes de fatiga y de erosión no superan el 100%, según los resultados obtenidos. Ver Figura 49.

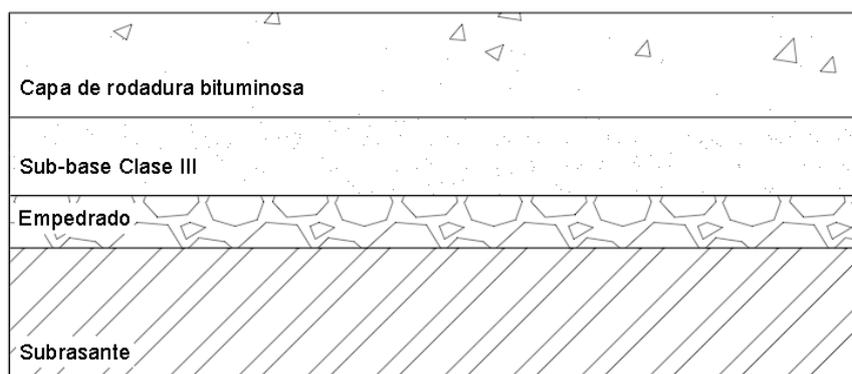


Figura 49. Espesores de diseño - Pavimento rígido.

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.4 Información de las propiedades de los materiales que conforman las diferentes capas de rodadura.

El análisis lineal en el software KENLAYER, solicita las características mecánicas de los materiales en cada capa de la estructura de la vía, siendo éstas el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad, permitiendo que el programa asemeje el comportamiento mecánico de cada material.

3.4.1 Pavimento rígido de hormigón con fibras metálicas.

– Capa de rodadura

- Coeficiente de Poisson

Tomando en cuenta que la capacidad a compresión del hormigón a diseñar es de 30 MPa, el coeficiente de Poisson a los 28 de días de edad del hormigón tiene un valor de 0.3. Ver Tabla 48.

Tabla 48

Coeficiente de Poisson según la edad y el nivel de carga.

DIAS	5 MPa			10 MPa			15 MPa			20 MPa			25 MPa			30 MPa		
	ϵ_1 (%)	ϵ_t (%)	ν															
7	102,00	25,92	0,25	301,80	74,01	0,25	547,90	131,10	0,24	870,80	205,70	0,24	1281,00	225,60	0,18	1593,00	130,20	0,08
14	70,75	13,32	0,19	75,97	14,04	0,18	212,70	39,23	0,18	394,70	70,02	0,18	811,80	105,00	0,18	834,40	141,70	0,18
28	82,91	18,86	0,23	174,20	41,46	0,24	288,80	70,38	0,24	424,30	105,50	0,25	572,20	154,70	0,27	741,20	224,90	0,30
90	58,05	21,83	0,39	119,50	49,82	0,42	193,50	80,59	0,42	254,10	108,70	0,43	325,50	142,00	0,44	402,40	181,60	0,45

Obtenido de (Sánchez, Mateos, Díaz, & Cobo, 2016, pág. 2)

- Módulo de elasticidad

Ya que el módulo de rotura a tracción (MR) del hormigón con fibras de acero de diseño es de 5MPa, según la Tabla 49, el módulo de elasticidad es 2.7×10^5 kg/cm², que corresponde a 3840302,69 psi.

Tabla 49

Tabla de propiedades del hormigón con fibras de acero

Hormigón (designación)	Resistencia a compresión (kp/ cm ²)	Módulo de elasticidad (kp/ cm ² × 10 ⁵)	Resistencia a tracción (kp/ cm ²)		Resistencia a flexotracción (kp/ cm ²)	
			1.ª Fisura	Rotura	1.ª Fisura	Rotura
H-O	237	2,42	—	18,8	38	38
30/50-40	244	2,33	18,4	23,6	41	41
30/50-60	253	2,38	23,9	30,1	44	44
30/50-80	259	2,76	26,7	35,2	48	50
50/50-40	282	2,83	23,4	31,8	45	59
50/50-60	311	2,72	27,5	45,3	53	93
50/50-80	311	2,70	36,2	54,3	56	98
60/80-40	236	2,51	23,0	26,2	47	66
60/80-60	265	2,57	26,2	35,0	49	68
60/80-80	270	2,65	27,7	41,8	52	97

Obtenido de (Fernández M. , 2014, pág. 12)

– **Sub-base**

- Coeficiente de Poisson

Según la Tabla 50, el coeficiente de Poisson, para una sub-base granular tiene un valor de 0.35.

Tabla 50

Propiedades de los materiales.

No	Materials	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Unit Weight (kN/m ³)
1	Asphaltic Concrete (AC)	2,758	0.35	22.8
2	Cold Milling Recycling Foam Bitumen (CMRFB)	1,241	0.35	21.2
3	Cement Treated Recycling Base (CTRB)	220	0.35	21.2
4	Granular	70	0.35	21.2
5	Subgrade (embankment)	67	0.35	21.2
6	Subgrade	33	0.45	19.6

Obtenido de (Samad, 2011, pág. 1168)

- Módulo de elasticidad:

El módulo de elasticidad de la sub-base granular según la Sección 3.3.1.9 es de 32488 psi.

– **Subrasante**

- Coeficiente de Poisson

Como recomendación de (Kumar, 2013), el valor del coeficiente de Poisson para el programa computacional KENLAYER es de 0.4.

- Módulo de elasticidad:

El módulo de elasticidad de la subrasante según la Sección 3.3.1.9 es de 11413 psi.

3.4.2 Pavimento flexible de asfalto colocado en frío.

– **Capa de rodadura**

- Coeficiente de Poisson

Según la Tabla 50, el coeficiente de Poisson, para el concreto asfáltico tiene un valor de 0.35.

- Módulo de elasticidad

De acuerdo con la Figura 43, el valor del módulo de elasticidad se relaciona con el coeficiente estructural de diseño que corresponde a 280000 psi.

Los valores para la sub-base y subrasante son los mismos tomados para el análisis del pavimento rígido.

3.5 Modelamiento en software KENLAYER

Una vez obtenidos los datos y dimensiones de todas las capas de la estructura de los dos tipos de pavimentos, se ingresó los datos necesarios para el modelamiento en el software KENLAYER, cabe mencionar que se realizó la simulación para tres variantes del espesor de la capa de rodadura diseñado, 1 pulgada más y 1 pulgada menos de los espesores de diseño, tal como se explicó en el apartado 1.4.2. Los análisis de cada tipo de pavimento que se presentan en este documento, son únicamente para el espesor de diseño, ya que el procedimiento es similar para las demás variaciones de los espesores.

3.5.1 Pavimento flexible de asfalto colocado en frío sin análisis de daño para el espesor de diseño

1. Una vez guardado el archivo con el nombre del proyecto en la pestaña LAYERINP, se muestra la siguiente ventana, en la cual se ingresan todos los valores necesarios que se encuentran clasificados, según sea la necesidad del proyecto. Ver Figura 50.

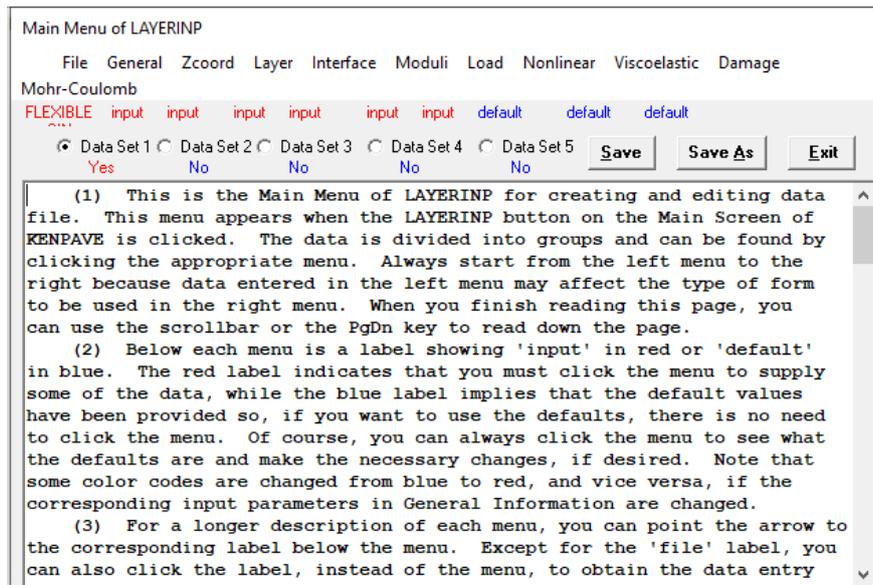


Figura 50. Menú Principal KENLAYER

Fuente: Software KENLAYER

2. En la pestaña General se ingresó los valores generales con los que trabaja el programa (Ver Figura 51) y los que se detallan a continuación:
 - Tipo de material (MATL): Para el caso de este análisis se trabajó en un rango lineal de todas las partes de la estructura del pavimento.
 - Análisis de daño (NDAMA): Para el ejemplo no se requiere un análisis de daño, ya que solo se tomó en cuenta las deformaciones y esfuerzos que genera la carga de 8.2 toneladas a un eje estándar de diseño.
 - Número de períodos por año (NPY): Como no se requiere el análisis de daño se deja el valor 1 como default.
 - Número de grupos de carga (NLG): En este caso se trabajó solo con la carga de 8.2 toneladas a un eje.
 - Tolerancia para integración numérica (DEL): Por recomendación del autor del software se escoge el valor de 0.001.

- Número de capas (NL): En el análisis la estructura del pavimento está constituido de 3 capas, que son la capa de rodadura, subbase y subrasante.
- Número de coordenadas verticales (NZ): Para una mejor precisión en los resultados se optó por variar 1 pulgada hasta llegar a la subrasante.
- Número máximo de ciclos de integración (ICL): El programa recomienda un valor de 80.
- Número de tensiones, esfuerzos y desplazamientos (NSTD): El tipo de respuesta que se requiere son de desplazamientos y esfuerzos, por lo que se escoge la opción 9.
- Tipos de interfaz entre dos capas (NBOND): Ya que las capas de subbase y subrasante no están unidas sino a fricción, el valor escogido es 0.
- Número de capas basado en la tensión en la parte de abajo de la capa de rodadura bituminosa (NLBT): como no se requiere un análisis de daño se deja el valor recomendado del autor.
- Número de capas basado en la compresión en la parte de arriba de la subrasante u otras capas no unidas (NLTC): de la misma que NLBT manera se deja el valor recomendado del programa.
- Sistema de unidades (NUNIT): para el cálculo del diseño del pavimento se trabajó con unidades inglesas, por lo que se toma la misma opción para el software.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE		SIMULACION PAVIMENTO FLEXIBLE CON ASFALTO EN FRIO	
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1	
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0	
Number of periods per year	(NPY)	1	
Number of load groups	(NLG)	1	
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001	
Number of layers	(NL)	3	OK
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	16	
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80	
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9	
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	0	
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1	
Number of layers for top compression	(NLTC)	1	
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	0	Print

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the entire text, you can click this textbox to make it active and then use the PgDn key.

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Figura 51. Información General del software

Fuente: Software KENLAYER

3. Se ingresó los valores de las coordenadas en Z, las cuales muestran los esfuerzos y deformaciones en estos puntos, necesarias para los resultados del software. (Ver Figura 52 y 53).

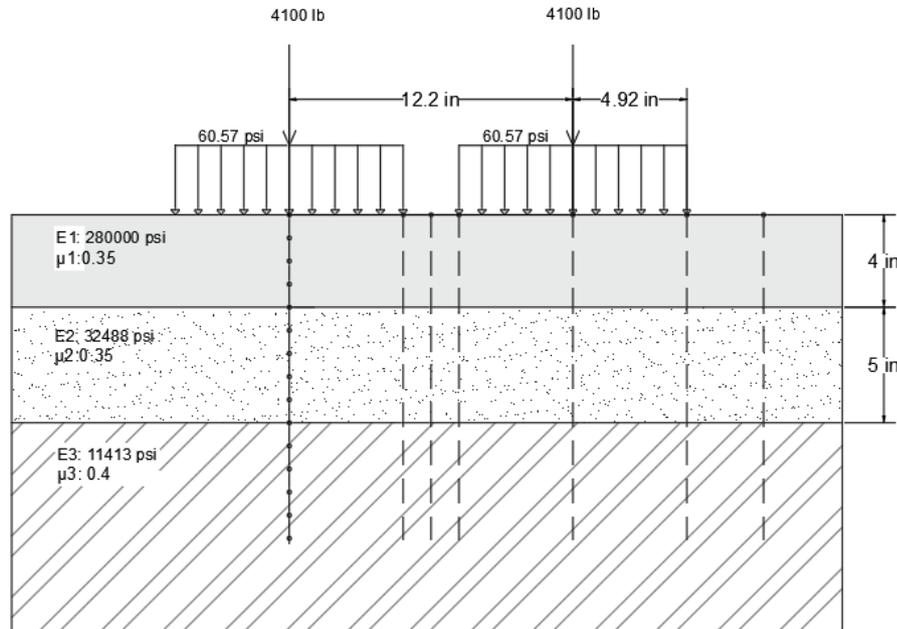


Figura 52. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento

Fuente: Software KENLAYER

Z Coordinates of Response Points for Data Set No. 1

Unit in.

Point No.	ZC
1	0
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	8
10	9
11	10
12	11
13	12
14	13
15	14
16	15

(1) This form appears when the 'Zcoord' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of Z coordinates on this form is equal to NZ, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. To read this textbox by the PgDn key, you have to click anywhere in the box to make it active. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press

Print

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 53. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento

Fuente: Software KENLAYER

4. En esta opción se ingresa los espesores de cada capa de la estructura de pavimento, en el caso de la capa asfáltica se tiene 4 pulgadas y 5 pulgadas

que corresponde al espesor de la subbase, y los valores del coeficiente de Poisson para cada uno. (Ver Figura 54).

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight for Data Set No. 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Unit in.

Layer No.	TH	PR
1	4	.35
2	5	.35
3	XXXXXXXXXX	.4

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. When you finish reading, you should click the cell to make it active before typing in the data. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can

Print OK

Figura 54. Espesor de las capas de pavimento y coeficiente de Poisson

Fuente: Software KENLAYER

5. La capa de rodadura y la subbase están unidas, ya que en el momento de construcción se aplica una emulsión que trabaja como un ligante para estas capas, por lo que corresponde a un valor de 1, la siguiente interfaz de subbase y subrasante no se encuentran unidas y toman un valor 0. (Ver Figura 55).

Type of Interface for Data Set No. 1

Interface No.	INT
1	1
2	0

(1) This form appears when the 'Interface' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of interfaces on this form is equal to NL - 1, where NL is specified in the 'General' menu.

(2) INT (condition of each interface): Assign 1 for bonded interface and 0 for frictionless interface.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow key.

(4) You cannot delete or add a line on this form.

(5) If you want to print this text, you can click the print button below at the left corner of this textbox.

(6) Upon completion, click the 'OK'

Print OK

Figura 55. Tipo de interfaz entre capas.

Fuente: Software KENLAYER

6. En esta opción se ingresan las características de la carga y las distancias entre ejes.
- Tipo de carga (LOAD): Un eje con doble rueda, se ingresa un valor 1
 - Radio de contacto de áreas circulares de cargadas (CR): Para simular la huella de un camión se tomó un radio de 4.92 pulgadas, el cual es el más común que circula por las carreteras del país.
 - Presión de contacto en áreas circulares de cargadas (CP): ya que se diseña para un eje estándar de 8.2 toneladas, la cual se distribuye hacia la cada llanta con un valor de 60.57 psi.
 - Distancia entre dos llantas dobles en el eje y (YW): El valor estándar de centro a centro de cada rueda es de 12.2 pulgadas (Ver Figura 52)
 - Número de coordenadas radiales para ser analizados en una sola rueda (NR): Para realizar un mejor análisis en las capas de rodadura se optó por ingresar valores de coordenadas radiales en el inicio, centro, final de cada rueda. (Ver Figura 52 y 56)

Load Information for Data Set No. 1

Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.

Unit		in.	psi	in.	in.	
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	1	4.92	60.57	12.2	0	7

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8 for axle arrangements.

(2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.

(3) CR (contact radius of circular loaded areas).

(4) CP (contact pressure on circular loaded areas).

(5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y

Print OK

Figura 56. Información de la carga.

Fuente: Software KENLAYER

X and Y Coordinates of Response Points for Load Group No. 1 and Data Set No. 1

Point No.	XPT	YPT
1	0	0
2	0	4.92
3	0	6.1
4	0	7.28
5	0	12.2
6	0	17.12
7	0	22.4

(1) This auxiliary form appears automatically when NPT of a given load is typed on the main form. If NPT was specified previously, you can also enter this auxiliary form by double clicking the main form anywhere on the given load group, instead of retyping NPT, to enter this auxiliary form.

(2) XPT (x coordinates of points to be analyzed).

(3) YPT (y coordinates of points to be analyzed).

(4) After typing the data in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

(5) You can delete a line, or one of the points, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press

Print

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 57. Coordenadas radiales.

Fuente: Software KENLAYER

7. En esta pestaña se ingresa el dato del módulo de elástico de cada capa, valores de 280000 psi, 32488 psi, 11413 psi, correspondientes a la capa de asfalto, subbase y subrasante, estos valores se obtuvieron en el apartado 3.3.1.11

Layer Moduli for Period No. 1 and Data Set No. 1

Layer No.	E
1	280000
2	32488
3	11413

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer. For a nonlinear layer, E is the assumed modulus for the first iteration and a convenient E to be assumed for both granular base and clayey subgrade is their K1 value

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one

Print

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 58. Módulo de elasticidad de cada capa.

Fuente: Software KENLAYER

8. Una vez ingresados todos los valores se guarda el programa y se obtienen los resultados y su gráfico correspondiente al análisis del pavimento. (Ver Figura 59 y 60)

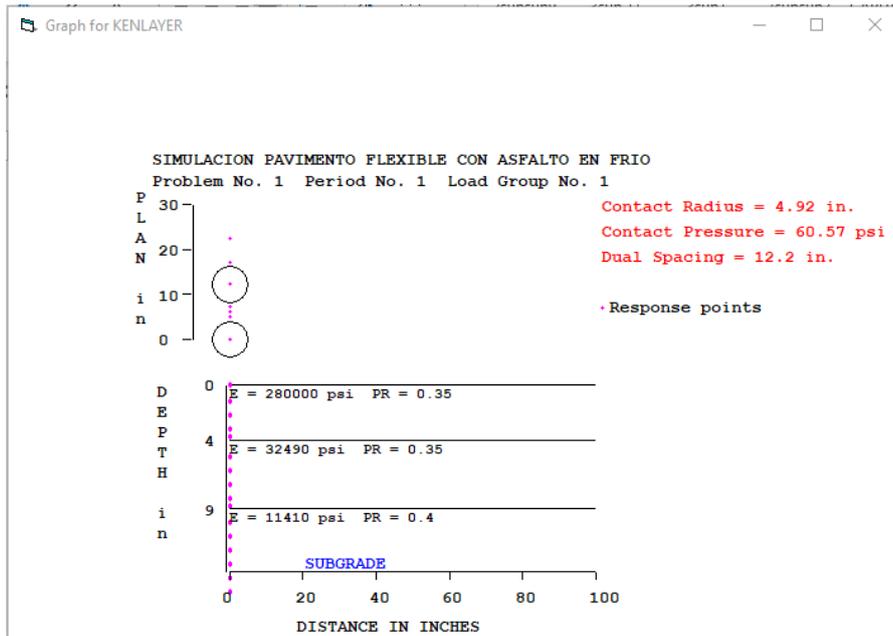


Figura 59. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

```

FLEXIBLE SIN DAMAGE.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -SIMULACION PAVIMENTO FLEXIBLE CON ASFALTO EN FRIO

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 16
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 0

Length and displacement in in., stress and modulus in psi
unit weight in pcf, and temperature in F

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 5
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.35 0.4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 14 15
CONDITIONS OF INTERFACES (INT) ARE : 1 0

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 2.800E+05 2 3.249E+04
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

```

Figura 60. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

3.5.2 Pavimento flexible de asfalto colocado en frío con análisis de daño en 1 año para el espesor de diseño.

1. En la pestaña general (Ver Figura 61) se ingresan los mismos valores detallados anteriormente, excepto los valores de:
 - NDAMA: Se escogió el valor 2, ya que para este ejemplo incluye el análisis de daño.
 - NPY: Se realiza el análisis de daño cada 2 meses para un año del pavimento.
 - NLBT: Número de capas basado en la tensión en la parte de abajo de la capa de rodadura bituminosa es una.
 - NLTC: Número de capas basado en la compresión para el análisis de daño, se analiza en 1 punto superior, es decir la unión subrasante-empedrado.

General Information of LAYERINP for Set No. 1		
TITLE	SIMULACION PAVIMENTO FLEXIBLE CON ASFALTO EN FRIO	
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	2
Number of periods per year	(NPY)	6
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001
Number of layers	(NL)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	8
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	0
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	0

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the entire text, you can click this textbox to make it active and then use the PgDn key.

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Figura 61. Información general simulación pavimento flexible.

Fuente: Software KENLAYER

2. En pestañas Layer, Interface y Load se ingresó los mismos valores del apartado anterior.
3. En la sección del módulo de elasticidad se ingresaron los valores correspondientes de cada capa, para todos los números de periodos ingresados (NPY). (Ver Figura 58)
4. En la última pestaña Damage se ingresan los coeficientes de fatiga y deformación recomendados por el autor del programa tanto para NLBT y NLTC respectivamente. (Ver Figura 62, 63)

Layer Number and Fatigue Coefficients for Data Set No. 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Sequence	LNBT	FT1	FT2	FT3
1	1	.0796	3.291	.854

(1) This form appears when the 'Bottom Tension' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to LNBT, as specified in the 'General' menu. Note that the upper left cell is the active cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNBT (layer number for damage analysis of bottom tension).

(3) FT1, FT2, FT3 (fatigue coefficients, as indicated by f1, f2 and

Print OK

Figura 62. Coeficientes de fatiga para asfalto bituminoso.

Fuente: Software KENLAYER

Layer Number and Permanent Deformation Coefficients for Data Set No. 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Sequence	LNTPC	FT4	FT5
1	3	1.365E-09	4.477

(1) This form appears when the 'Top Compression' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to LNTPC, as specified in the 'General' menu. Note that the upper left cell is the active cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNTPC (layer number for damage analysis of top compression).

(3) FT4, FT5 (permanent deformation coefficients, as indicated by f4

Print OK

Figura 63. Coeficientes de deformación para asfalto bituminoso.

Fuente: Software KENLAYER

En esta misma pestaña también se ingresa el volumen de tráfico (Ver Figura 64, 65), como se requiere un análisis de daño para cada año, de cada periodo que representa 2 meses, se ingresa el valor del número de repeticiones acumuladas hasta llegar a los 12 meses. Ver Tabla 51.

Tabla 51

Número de repeticiones por periodo de 2 meses

Periodo	Número de repeticiones por año (TNLR)
Periodo 1 (2 meses)	2102
Periodo 2 (4 meses)	4204
Periodo 3 (6 meses)	8408
Periodo 4 (8 meses)	12612
Periodo 5 (10 meses)	16816
Periodo 6 (12 meses)	21020

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Load Repetitions of Each Period for Data Set No. 1

Period1 input Period2 input Period3 input Period4 input Period5 input Period6 input

(1) This form appears when the 'Volume of Traffic' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

(2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the number of repetitions for each load group. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.

(3) Now you can click the 'Period1' button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each period button, click 'OK' to return to the Damage Analysis.

Print OK

Figura 64. Repeticiones de carga para cada periodo.

Fuente: Software KENLAYER

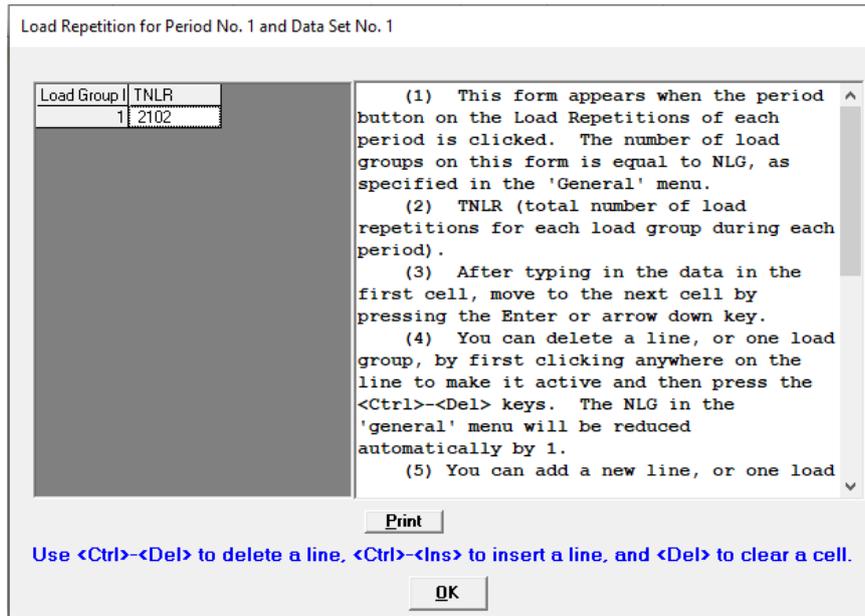


Figura 65. Repeticiones de carga para el periodo 1.

Fuente: Software KENLAYER

- Una vez ingresados todos los valores correspondientes al pavimento flexible se obtienen los resultados de deformaciones, esfuerzos, rango de daño para cada periodo y vida de diseño esperada del pavimento. (Ver Figura 66, 67, 68)

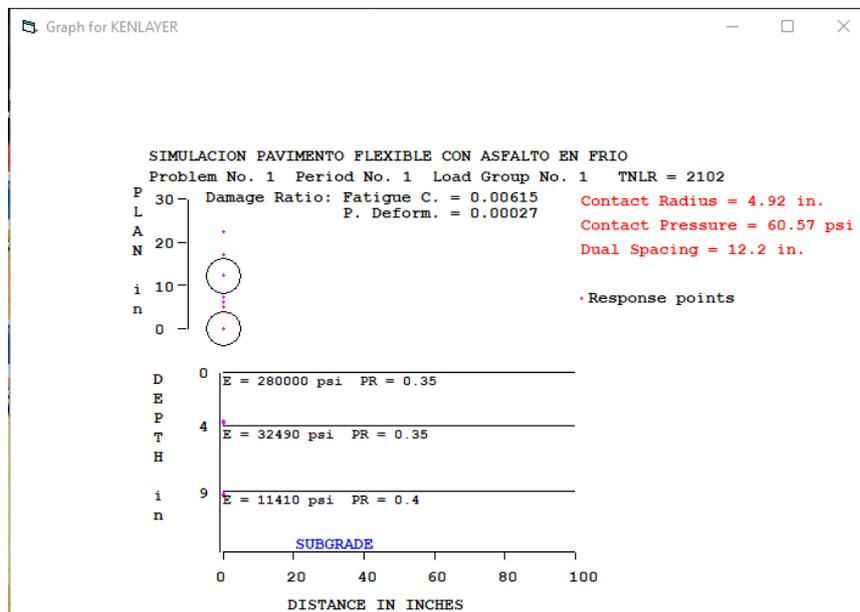


Figura 66. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

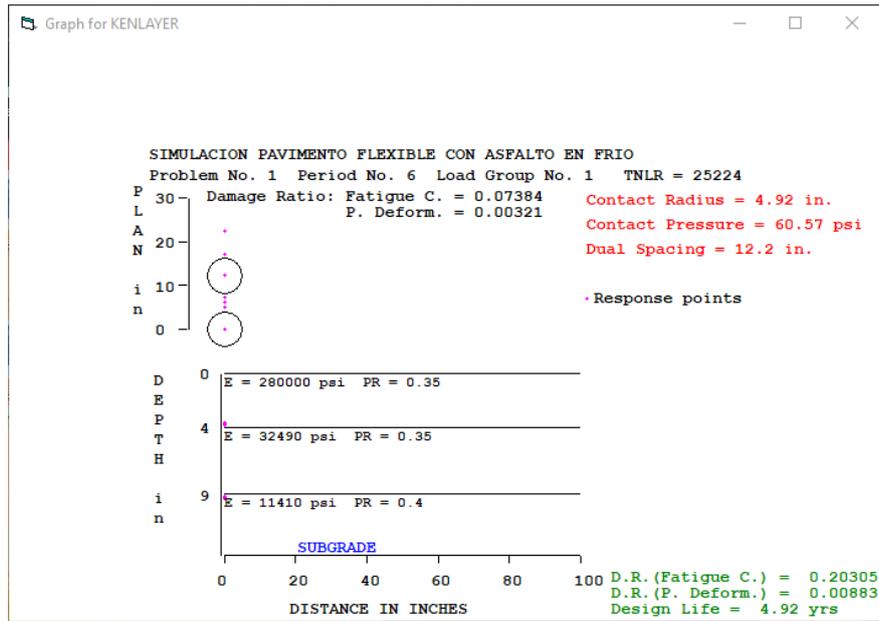


Figura 67. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

```

RIGIDO DAMAGE.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

INPUT FILE NAME -C:\Users\ANITA\Documents\kenpave\RIGIDO DAMAGE.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -SIMULACION PAVIMENTO RÍGIDO CON FIBRAS METALICAS

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA=2, SO DAMAGE ANALYSIS WITH DETAILED PRINTOUT WILL BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 6
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 0

Length and displacement in in., stress and modulus in psi
unit weight in pcf, and temperature in F

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8 6
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.4
CONDITIONS OF INTERFACES (INT) ARE : 1 0

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.840E+06 2 3.249E+04
  
```

Figura 68. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

De la misma manera este procedimiento se realizó para los diferentes espesores de la capa de rodadura, estos son: 3 y 5 pulgadas.

3.5.3 Pavimento rígido de hormigón con fibras metálicas sin análisis de daño para el espesor de diseño.

1. El procedimiento para el pavimento rígido es muy similar, se ingresan los mismos valores en la ventana de Información General, ya que el análisis es similar para los dos pavimentos, a excepción de NZ ya que depende del espesor de las capas ya diseñadas. (Ver Figura 67)
- Número de coordenadas verticales (NZ): Para una mejor precisión en los resultados se optó por variar 2 pulgadas hasta llegar a la subrasante. (Ver Figura 70,71)

General Information of LAYERINP for Set No. 1		
TITLE SIMULACION PAVIMENTO RIGIDO CON FIBRAS METALICAS		
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined) (MATL)	1	
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout) (NDAMA)	0	
Number of periods per year (NPY)	1	
Number of load groups (NLG)	1	
Tolerance for numerical integration (DEL)	0.001	
Number of layers (NL)	3	OK
Number of Z coordinates for analysis (NZ)	12	
Maximum cycles of numerical integration (ICL)	80	
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains) (NSTD)	9	
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless) (NBOND)	0	
Number of layers for bottom tension (NLBT)	1	
Number of layers for top compression (NLTC)	1	
System of units (0=English, 1=SI) (NUNIT)	0	Print

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the entire text, you can click this textbox to make it active and then use the PgDn key.

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Figura 69. Información general del software.

Fuente: Software KENLAYER

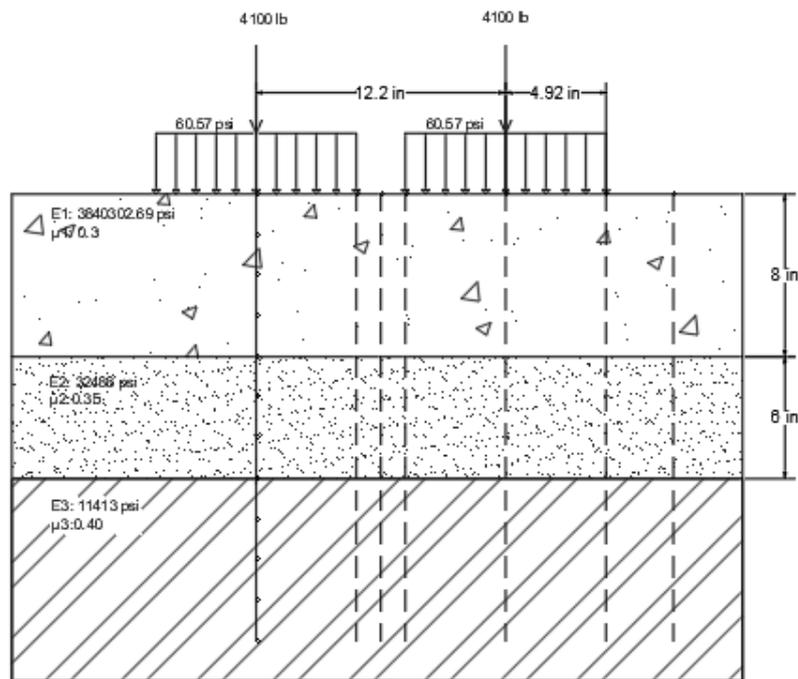


Figura 70. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.

Fuente: Software KENLAYER

Z Coordinates of Response Points for Data Set No. 1

Point No.	ZC
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	12
8	14
9	16
10	18
11	20
12	22

(1) This form appears when the 'Zcoord' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of Z coordinates on this form is equal to NZ, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. To read this textbox by the PgDn key, you have to click anywhere in the box to make it active. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press

Print

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 71. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.

Fuente: Software KENLAYER

2. Los espesores de las capas de la estructura de pavimento rígido, para la capa de rodadura el valor es de 8 pulgadas y 6 pulgadas que corresponde al espesor de la subbase, y los valores del coeficiente de Poisson para cada uno. (Ver Figura 72).

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight for Data Set No. 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Unit in.

Layer No.	TH	PR
1	8	.3
2	6	.35
3	XXXXXXXXXX	.4

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. When you finish reading, you should click the cell to make it active before typing in the data. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can

Print OK

Figura 72. Coordenadas en Z de la estructura de pavimento.

Fuente: Software KENLAYER

3. Los apartados Interface y Load, son similares al pavimento flexible y se ingresan los mismos valores. (Ver Figura 55,56).
4. Los valores del módulo de elástico de cada capa son de 3840302,69 psi, 32488 psi, 11413 psi, correspondientes a la capa de hormigón, subbase y subrasante, estos valores se obtuvieron en el apartado 3.3.1.11 y 3.4.1. (Ver Figura 73).

Layer Moduli for Period No. 1 and Data Set No. 1

Unit psi

Layer No.	E
1	3840302.69
2	32488
3	11413

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer. For a nonlinear layer, E is the assumed modulus for the first iteration and a convenient E to be assumed for both granular base and clayey subgrade is their K1 value

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one

Print

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 73. Módulo de elasticidad de cada capa.

Fuente: Software KENLAYER

5. Ingresados todos los valores se guarda el programa y se obtienen los resultados y su gráfico correspondiente al análisis del pavimento. (Ver Figura 74 y 75).

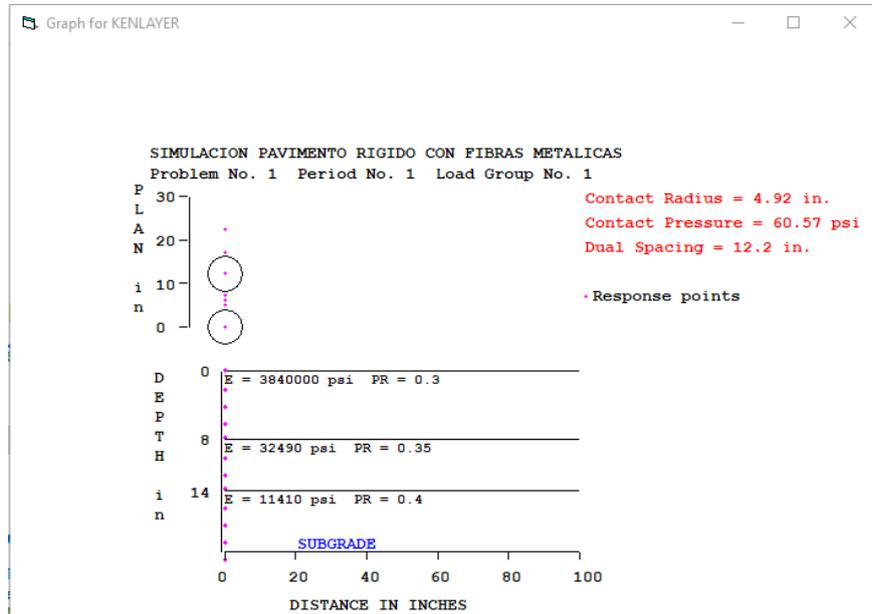


Figura 74. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

```

RIGIDO SIN DAMAGE.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
INPUT FILE NAME -C:\Users\ANITA\Documents\kenpave\RIGIDO SIN DAMAGE.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -SIMULACION PAVIMENTO RIGIDO CON FIBRAS METALICAS
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 12
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 0

Length and displacement in in., stress and modulus in psi
unit weight in pcf, and temperature in F

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8 6
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
20 22
CONDITIONS OF INTERFACES (INT) ARE : 1 0
  
```

Figura 75. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

3.5.4 Pavimento rígido de hormigón con fibras metálicas con análisis de daño en 1 año para el espesor de diseño.

- En la pestaña general (Ver Figura 76) se ingresan los mismos valores detallados anteriormente que se detallan en el apartado anterior, excepto los valores de:
 - NDAMA: Se escogió el valor 2, ya que para este ejemplo incluye el análisis de daño.
 - NPY: Se realiza el análisis de daño cada 2 meses para un año del pavimento.
 - NLBT: Número de capas basado en la tensión en la parte inferior de la capa de asfalto es una.
 - NLTC: Número de capas basado en la compresión para el análisis de daño, se analiza en 1 punto superior, es decir la unión subrasante-empedrado

General Information of LAYERINP for Set No. 1			
TITLE	SIMULACION PAVIMENTO FLEXIBLE CON ASFALTO EN FRIO		
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1	
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	2	
Number of periods per year	(NPY)	10	
Number of load groups	(NLG)	1	
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001	
Number of layers	(NL)	3	
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	8	
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80	
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9	
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	0	
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1	
Number of layers for top compression	(NLTC)	1	
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	0	

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one text-box to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the entire text, you can click this textbox to make it active and then use the PgDn key.

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Figura 76. Información general del software.

Fuente: Software KENLAYER

- En pestañas Layer, Interface y Load se ingresó los mismos valores del apartado anterior.
- En la sección del módulo de elasticidad se ingresaron los valores correspondientes de cada capa, para todos los números de periodos ingresados (NPY). (Ver Figura 73)
- En la última pestaña Damage se ingresa el volumen de tráfico (Ver Figura 77, 78), como se requiere un análisis de daño, para cada período se ingresa el valor del número de repeticiones acumuladas en 1 año. Ver Tabla 51.

Load Repetitions of Each Period for Data Set No. 1

(1) This form appears when the 'Volume of Traffic' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.
 (2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the number of repetitions for each load group. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.
 (3) Now you can click the 'Period1' button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each period button, click 'OK' to return to the Damage Analysis.

Figura 77. Repeticiones de carga para cada periodo.

Fuente: Software KENLAYER

Load Repetition for Period No. 1 and Data Set No. 1

Load Group	TNLR
1	2102

(1) This form appears when the period button on the Load Repetitions of each period is clicked. The number of load groups on this form is equal to NLG, as specified in the 'General' menu.
 (2) TNLR (total number of load repetitions for each load group during each period).
 (3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.
 (4) You can delete a line, or one load group, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NLG in the 'general' menu will be reduced automatically by 1.
 (5) You can add a new line, or one load

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Figura 78. Repeticiones de carga para el periodo 1.

Fuente: Software KENLAYER

- Una vez ingresados todos los valores correspondientes al pavimento rígido se obtienen los resultados de deformaciones, esfuerzos, rango de daño para cada periodo y vida de diseño esperada del pavimento. (Ver Figura 79, 80, 81).

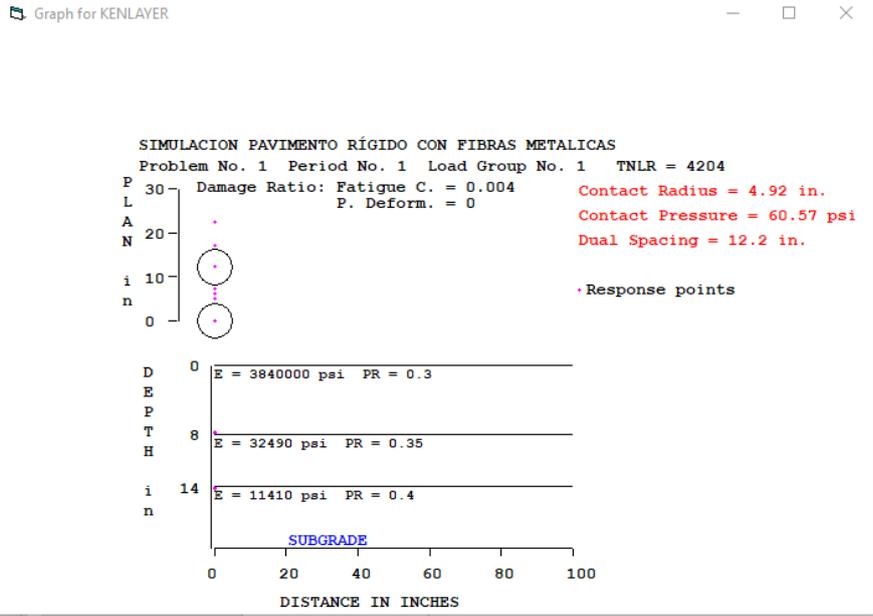


Figura 79. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

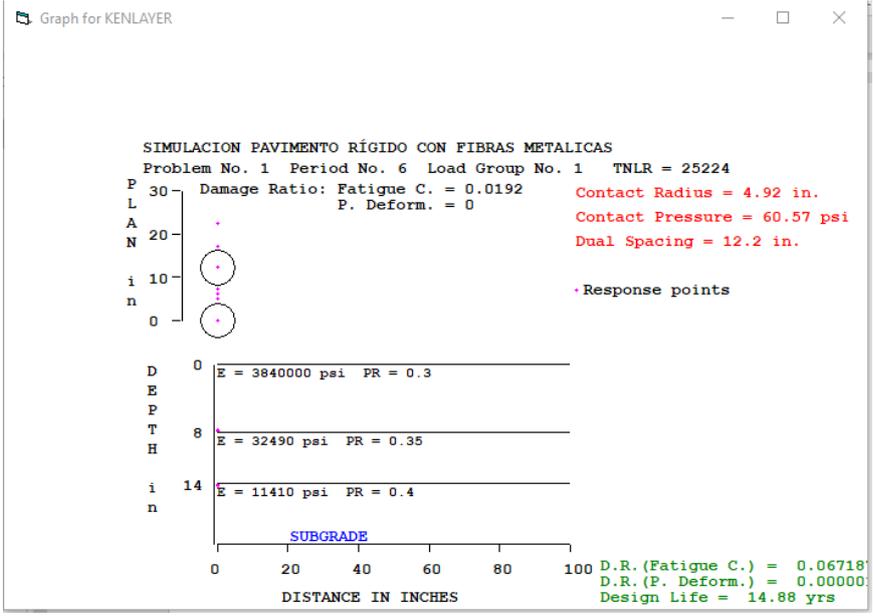


Figura 80. Ventana de resultados KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

```

RIGIDO DAMAGE.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
|
INPUT FILE NAME -C:\Users\ANITA\Documents\kenpave\RIGIDO DAMAGE.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -SIMULACION PAVIMENTO RÍGIDO CON FIBRAS METALICAS

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA=2, SO DAMAGE ANALYSIS WITH DETAILED PRINTOUT WILL BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 6
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 0

Length and displacement in in., stress and modulus in psi
unit weight in pcf, and temperature in F

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8 6
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.4
CONDITIONS OF INTERFACES (INT) ARE : 1 0

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.840E+06 2 3.249E+04
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) ANSI

```

Figura 81. Ventana de resultados formato .txt en KENLAYER.

Fuente: Software KENLAYER

De la misma manera este procedimiento se realizó para los diferentes espesores de la capa de rodadura, estos son: 7 y 9 pulgadas.

3.6 Desarrollo de los presupuestos de construcción

Según la clasificación funcional de vías de acuerdo con la Tabla 10, la vía de estudio es un camino rural básico tipo C2.

3.6.1 Presupuesto para pavimento flexible de asfalto colocado en frío

Longitud del proyecto: 1 kilómetro

Ancho de la vía: 6 metros

$e_{subbase}$: 5 pulgadas.

$e_{caparodadura}$: 5 pulgadas. (Ver Figura 82)

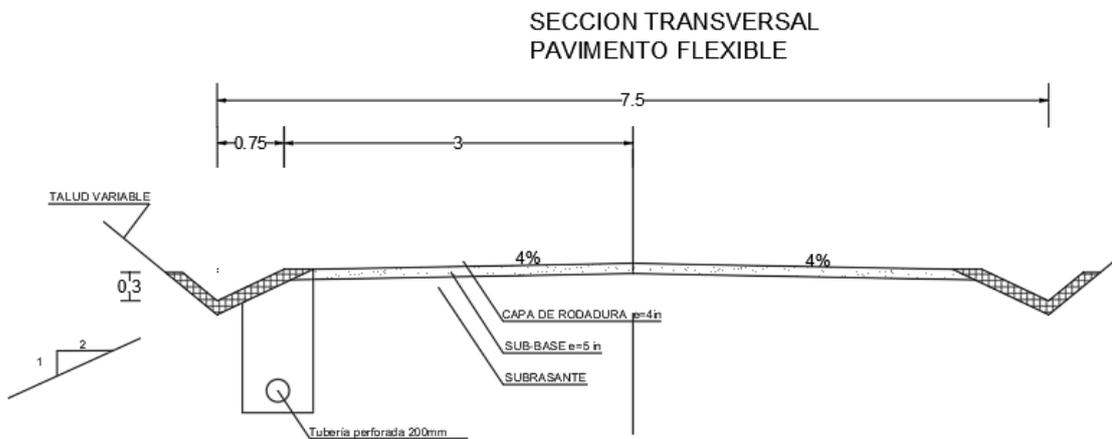


Figura 82. Sección transversal pavimento flexible.

Fuente: (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

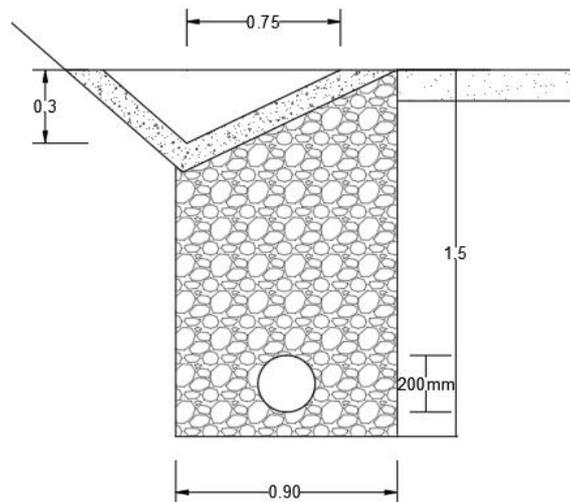


Figura 83. Detalle de cuneta y subdrenaje.

Fuente: (Suarez, 2010)

3.6.1.1 Cantidades de obra

- Pavimento asfáltico en frío

$$\text{Capa de pavimento} = L * a$$

$$\text{Capa de pavimento} = 1000m * 6m$$

$$\text{Capa de pavimento} = 6000 m^2$$

- Subbase

$$\text{Capa de pavimento} = L * a * e$$

$$\text{Capa de pavimento} = 1000m * 6m * 0.127m$$

$$\text{Capa de pavimento} = 762 m^3$$

3.6.1.2 Costos Directos

- Mano de obra

Los valores de salarios mínimos por ley se detallan según la Contraloría General del Estado en el Anexo 8.

- Maquinaria y equipo

Se realizó el costo horario de toda la maquinaria a usarse para la construcción del pavimento flexible de asfalto en frío.

En la Tabla 52, se observan los datos actualizados y especificaciones de la maquinaria a utilizar, valor del Diesel, lubricante y grasa, a julio de 2020, así como también tasas de interés y seguro.

Tabla 52

Costo horario de maquinaria.

Equipo: Tractor oruga Caterpillar D6T	
Potencia	200 HP
Valor adquisición	\$ 359,200.00
Valor neumáticos	\$ -
Valor residual	\$ 71,680.00
Vida útil	7.5 años
Valor Diesel, Lubricante y Grasa para maquinaria	
Valor galón diésel	\$ 1.039
Valor litro lubricante	\$ 4.88
Valor kilo de grasa	\$ 6.51
Tasa de interés y seguros	
Tasa interés anual	11.83%
Tasa seguros	4.00%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

De acuerdo con la Ecuación 2.36 se calculó la depreciación de la maquinaria como se muestra a continuación:

$$D = \frac{Va - Vr}{Vu * Vuh}$$
$$D = \frac{359200 - 71680}{7.5 * 2000}$$
$$D = \$ 19.17$$

La inversión de la maquinaria se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.37, como se muestra a continuación:

$$I = \frac{(Va + Vr) * i}{2 * H_{año}}$$

$$I = \frac{(359200 + 71680) * 11.83\%}{2 * 2000}$$

$$I = \$ 12.74$$

De acuerdo con la Ecuación 2.38, se calculó los seguros de la maquinaria:

$$S = \frac{(Va + Vr) * s}{2 * H_{año}}$$

$$S = \frac{(359200 + 71680) * 4\%}{2 * 200}$$

$$S = \$ 4.31$$

El costo del mantenimiento de la maquinaria se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.39, como se indica a continuación:

$$MM = 0.23 * 19.17$$

$$MM = \$4.41$$

Por otro lado, se realizó el cálculo de los costos por consumo de la maquinaria. De acuerdo con la Ecuación 2.40 se obtuvo el valor del gasto por repuestos.

$$R = kr * D$$

$$R = 0.7425 * 19.17$$

$$R = \$ 10.40$$

El consumo del costo horario de Diesel se obtuvo de acuerdo con la Ecuación 2.41.

$$DIESEL = kd * PT * \$/galón$$

$$DIESEL = 0.04 * 200 * 1.039$$

$$DIESEL = \$ 8.2$$

Según la Ecuación 2.42 se calculó el costo horario de grasas y lubricantes.

$$L = (kl * lub + kg * gra) * PT$$

$$L = (0.00132 * 4.88 + 0.001 * 6.51) * 200$$

$$L = 2.59$$

Los costos para permisos de funcionamiento de la maquinaria se calcularon de acuerdo con la Ecuación 2.43.

$$MAT = 0.001 \frac{V_a}{H_{año}}$$

$$MAT = 0.001 \frac{359200}{2000}$$

$$MAT = \$ 0.18$$

El costo total de la maquinaria Tractor oruga Caterpillar D6T es de \$65.35, se realizó el mismo procedimiento para toda la maquinaria a utilizar en la obra. Ver Tabla 53.

Tabla 53
Costo horario de maquinaria pavimento flexible.

Resumen Costo horario de maquinaria	
Tractor oruga Caterpillar D6T	\$ 65.35
Distribuidor de asfalto	\$ 44.58
Barredora mecánica	\$ 29.45
Volqueta	\$ 21.72
Pavimentadora finisher	\$ 65.49
Rodillo compactador case SV212	\$ 31.35
Excavadora de oruga case CX210B	\$ 41.21
Tanquero HINO	\$ 23.67
Compactador manual	\$ 6.25
Concretera de un saco	\$ 3.55
Vibrador	\$ 2.13
Camioneta 2.0 doble tracción	\$ 5.00
Franjadora	\$ 7.80
Fresadora	\$ 33.63
Mini cargadora BOBCAT	\$ 15.00
Plancha Vibroapisonadora	\$ 6.35
Selladora de fisuras	\$ 24.32
Rodillo neumático	\$ 31.62
Retroexcavadora	\$ 35.00
Motoniveladora Caterpillar 120K	\$ 50.47

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.6.1.3 Precios Unitarios para el pavimento flexible

Se realizó el análisis de precios de los rubros listados en la Tabla 54, correspondientes a la construcción del pavimento (Ver Tabla 54), en la Tabla 55 se muestra el ejemplo del análisis de costos unitarios realizados para el mismo, y el análisis de los rubros restantes se encuentran en el Anexo 9, en la Tabla 56 se puede observar el presupuesto de construcción de la vía para 1 kilómetro del pavimento flexible bituminoso colocado en frío. De la misma manera se ejecutó el presupuesto del mantenimiento de la vía, detallados en las Tablas 57, 58, 59.

Tabla 54*Rubros de construcción pavimento flexible.*

RUBROS DE CONSTRUCCIÓN		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
OBRAS PRELIMINARES		
1	Limpieza del terreno	Ha
2	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO		
3	Capa de imprimación	m ²
4	Capa de rodadura de asfalto colocado en frío e=5"	m ²
5	Capa de sub-base clase 3	m ³
DRENAJE		
6	Excavación y relleno para estructuras menores	m ³
7	Excavación y relleno en cunetas	m ³
8	Hormigón simple f'c=180 kg/cm ² para cunetas	m ³
9	Tubería corrugada perforada de PVC de 200 mm	m
10	Colector H.A. S= 1.00x1.20 m	u
SEÑALIZACIÓN		
11	Señalización vertical	u
12	Señalización horizontal	m

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 55*Análisis de precios unitarios pavimento flexible.***ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD
UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

ITEM: 1 **UNIDAD:** Ha
RUBRO: Limpieza del terreno

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANT.	TARIFA	COSTO/ HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Herramienta menor (5% M.O.)					0.36
Tractor de oruga	1.00	65.94	65.94	0.02	0.99
SUBTOTAL					1.35

MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANT.	JORN/H ORA	COST. HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Operador de tractor C2	1.00	3.85	3.85	0.02	0.06
Peón E2	4.00	3.60	14.40	0.50	7.20
SUBTOTAL					7.26
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDA D	PRECIO U.	COSTO	
SUBTOTAL					0.00
COSTO TOTAL RUBRO					\$ 8.61

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 56

Presupuesto de construcción pavimento flexible.

PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD (Pavimento flexible)
UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
	OBRAS PRELIMINARES				
1	Limpieza del terreno	Ha	0.60	\$ 8.61	\$ 5.17
2	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km	1.00	\$ 7.69	\$ 7.69
	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO				
3	Capa de imprimación	m ²	6000.00	\$ 0.83	\$ 4,954.11
4	Capa de rodadura de asfalto colocado en frío e=5"	m ²	6000.00	\$ 13.24	\$ 79,433.01
5	Capa de sub-base clase 3	m ³	762.00	\$ 18.68	\$ 14,237.82
	DRENAJE				
6	Excavación y relleno para estructuras menores	m ³	2714.40	\$ 21.20	\$ 57,551.39
7	Excavación y relleno en cunetas	m ³	450.00	\$ 5.59	\$ 2,514.24
8	Hormigón simple f'c=180 kg/cm ² para cunetas	m ³	324.00	\$ 116.75	\$ 37,825.54
9	Tubería corrugada perforada de PVC de 200 mm	m	2000.00	\$ 13.64	\$ 27,273.18
10	Colector H.A. S= 1.00x1.20 m	u	10.00	\$ 307.94	\$ 3,079.44
	SEÑALIZACIÓN				

11	Señalización vertical	u	50.00	\$ 43.76	\$ 2,187.81
12	Señalización horizontal	m	3000.00	\$ 1.29	\$ 3,867.21
				TOTAL PRESUPUESTO	\$ 232,936.59

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.6.1.4 Precios unitarios de mantenimiento para el pavimento flexible

Tabla 57

Rubros de mantenimiento.

RUBROS DE MANTENIMIENTO RUTINARIO		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
MANTENIMIENTO RUTINARIO		
13	Bacheo superficial con mezcla asfáltica en frío e=2"	m ²
14	Bacheo profundo con mezcla asfáltica en frío	m ²
15	Sellado de grietas o fisuras	m
RUBROS DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
MANTENIMIENTO PERIÓDICO		
16	Remoción de carpeta asfáltica e=5"	m ²
1	Limpieza del terreno	Ha
3	Capa de imprimación	m ²
4	Capa de rodadura de asfalto colocado en frío e=5"	m ²
12	Señalización horizontal	m

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 58

Análisis de precios unitarios mantenimiento.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD
 UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
 REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

ITEM: 13 UNIDAD: m²
 RUBRO: Bacheo superficial con mezcla asfáltica en frío e=2"

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANT.	TARIFA	COSTO/HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Herramienta menor (5% M.O.)					0.08
Fresadora	1.00	33.63	33.63	0.007	0.24
Mini cargadora	1.00	15.00	15.00	0.020	0.30
Plancha vibroapisonadora	1.00	6.35	6.35	0.016	0.10
Volqueta	1.00	21.72	21.72	0.016	0.35
				SUBTOTAL	1.06

MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANT.	JORN/HORA	COST. HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Peón E2	4.00	3.60	14.40	0.050	0.720
Op. de fresadora	1.00	3.85	3.85	0.050	0.193
Op. de minicargadora	1.00	3.85	3.85	0.050	0.193
Chofer volqueta C1	1.00	5.29	5.29	0.050	0.265
Inspector de obra	1.00	4.05	4.05	0.050	0.203
				SUBTOTAL	1.572

MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO U.	COSTO	
Mezcla asfáltica en frío al granel (incluye transporte)	m³	0.05	88.44	4.42	
Emulsión asfáltica	gal	0.30	1.25	0.38	
				SUBTOTAL	4.80
COSTO TOTAL RUBRO					\$ 7.43

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

En el Anexo 10 se presenta los demás costos unitarios de los rubros restantes correspondientes al mantenimiento vial, tanto rutinario como periódico.

Tabla 59

Presupuesto de mantenimiento del pavimento flexible.

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD (Pavimento flexible)
 Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia
UBICACIÓN: Carchi
REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
	MANTENIMIENTO RUTINARIO				
13	Bacheo superficial con mezcla asfáltica en frío e=2"	m²	20.00	\$ 7.43	\$ 148.64
14	Bacheo profundo con mezcla asfáltica en frío	m²	0.42	\$ 15.13	\$ 6.35
15	Sellado de grietas o fisuras	m	10.00	\$ 1.21	\$ 12.15
				TOTAL PRESUPUESTO	\$ 167.14

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO

COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
	MANTENIMIENTO				
16	Remoción de carpeta asfáltica e=5"	m²	6000.00	\$ 0.90	\$ 5,389.44

1	Limpieza del terreno	Ha	0.60	\$ 8.61	\$ 5.17
3	Capa de imprimación	m ²	6000.00	\$ 0.83	\$ 4,954.11
4	Capa de rodadura de asfalto colocado en frío e=5"	m ²	6000.00	\$ 13.24	\$ 79,433.01
12	Señalización horizontal	m	1000.00	\$ 1.29	\$ 1,289.07
				TOTAL PRESUPUESTO	\$ 91,070.79

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.6.2 Presupuesto para pavimento rígido de hormigón con fibras metálicas

Longitud del proyecto: 1 kilómetro.

Ancho de la vía: 6 metros.

e_{subbase} : 6 pulgadas.

$e_{\text{capa rodadura}}$: 8 pulgadas. (Ver Figura 84)

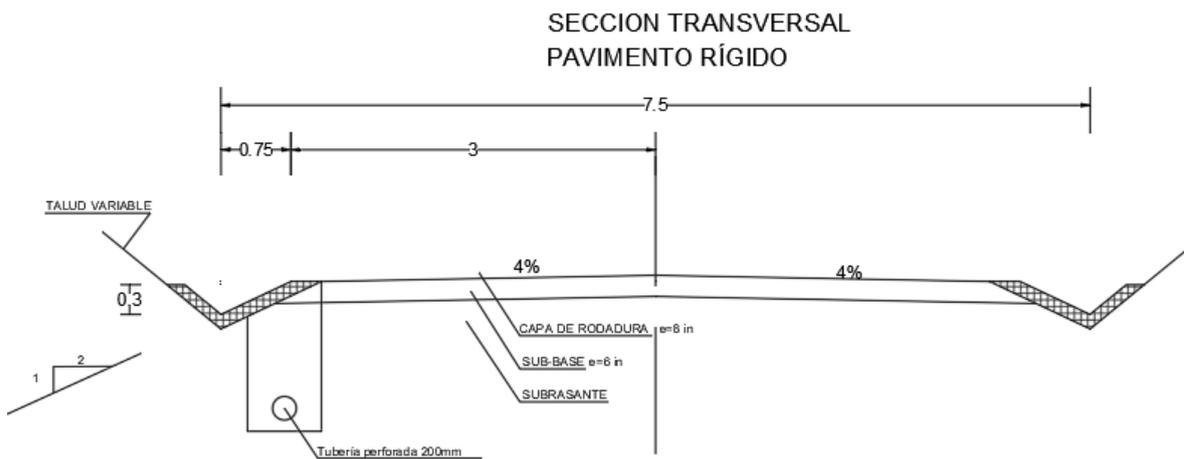


Figura 84. Sección transversal pavimento rígido.

Fuente: (T.A.M.S-ASTEC, 2003)

3.6.2.1 Cantidades de obra

- Pavimento rígido

$$\text{Capa de pavimento} = L * a * e$$

$$\text{Capa de pavimento} = 1000 \text{ m} * 6 \text{ m} * 0.2032$$

$$\text{Capa de pavimento} = 1219 \text{ m}^3$$

- Subbase

$$\text{Capa de pavimento} = L * a * e$$

$$\text{Capa de pavimento} = 1000 \text{ m} * 6 \text{ m} * 0.1524 \text{ m}$$

$$\text{Capa de pavimento} = 914.4 \text{ m}^3$$

3.6.2.2 Costos Directos

- Mano de obra

Los valores de salarios mínimos por ley se detallan según la Contraloría General del Estado en el Anexo 8.

- Maquinaria y equipo

Se llevó a cabo el costo horario de toda la maquinaria a usarse para la construcción del pavimento rígido de hormigón con fibras de acero. En la Tabla 60, se observan los datos actualizados y especificaciones de la maquinaria a utilizar, valor del Diesel, lubricante y grasa, así como también tasas de interés y seguro.

Tabla 60

Costo horario de maquinaria.

Equipo: Excavadora de oruga case CX210B	
Potencia	157 HP
Valor adquisición	\$ 213,100.00
Valores neumáticos	\$ -
Valor residual	\$ 42,560.00
Vida útil	7.5 años
Valor Diesel, Lubricante y Grasa para maquinaria	
Valor galón diésel	\$ 1.039
Valor litro lubricante	\$ 4.88
Valor kilo de grasa	\$ 6.51
Tasa de interés y seguros	
Tasa interés anual	11.83%
Tasa seguros	4.00%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

De acuerdo con la Ecuación 2.36 se calculó la depreciación de la maquinaria como se muestra a continuación:

$$D = \frac{Va - Vr}{Vu * Vuh}$$
$$D = \frac{213100 - 42560}{7.5 * 2000}$$
$$D = \$ 11.37$$

La inversión de la maquinaria se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.37, como se muestra a continuación:

$$I = \frac{(Va + Vr) * i}{2 * H_{año}}$$

$$I = \frac{(213100 + 42560) * 11.83\%}{2 * 2000}$$

$$I = \$ 7.56$$

De acuerdo con la Ecuación 2.38, se calculó los seguros de la maquinaria:

$$S = \frac{(Va + Vr) * s}{2 * H_{año}}$$

$$S = \frac{(213100 + 42560) * 4\%}{2 * 200}$$

$$S = \$ 2.56$$

El costo del mantenimiento de la maquinaria se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.39, como se indica a continuación:

$$MM = 0.23 * 11.37$$

$$MM = \$2.64$$

Por otro lado, se realizó el cálculo de los costos por consumo de la maquinaria. De acuerdo con la Ecuación 2.40 se obtuvo el valor del gasto por repuestos.

$$R = kr * D$$

$$R = 0.7425 * 11.37$$

$$R = \$ 8.44$$

El consumo del costo horario de Diesel se obtuvo de acuerdo con la Ecuación 2.41.

$$DIESEL = kd * PT * \$/galón$$

$$DIESEL = 0.04 * 157 * 1.039$$

$$DIESEL = \$ 6.52$$

Según la Ecuación 2.42 se calculó el costo horario de grasas y lubricantes.

$$L = (kl * lub + kg * gra) * PT$$

$$L = (0.00132 * 4.88 + 0.001 * 6.51) * 157$$

$$L = 22.03$$

Los costos para permisos de funcionamiento de la maquinaria se calcularon de acuerdo con la Ecuación 2.43.

$$MAT = 0.001 \frac{V_a}{H_{año}}$$

$$MAT = 0.001 \frac{213100}{2000}$$

$$MAT = \$ 0.11$$

El costo total de la maquinaria Excavadora de oruga case CX210B es de \$41.21, se hizo el mismo procedimiento para toda la maquinaria a utilizar en la obra. Ver Tabla 61.

Tabla 61

Costos de maquinaria pavimento rígido.

Resumen Costo horario de maquinaria	
Tractor oruga Caterpillar D6T	\$ 65.35
Cortadora de concreto	\$ 5.15
Volqueta	\$ 21.72
Pavimentadora con encofrado deslizable	\$ 73.46
Rodillo compactador case SV212	\$ 31.35
Excavadora de oruga case CX210B	\$ 41.21
Tanquero HINO	\$ 23.67
Compactador manual	\$ 6.25
Concretera de un saco	\$ 3.55
Vibrador	\$ 2.13
Camioneta 2.0 doble tracción	\$ 5.00
Franjadora	\$ 7.80
Mini cargadora BOBCAT	\$ 15.00
Selladora de fisuras	\$ 24.32
Rodillo neumático	\$ 31.62
Motoniveladora Caterpillar 120K	\$ 50.47

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.6.2.3 Precios Unitarios para el pavimento rígido

De igual modo que el pavimento flexible, se llevó a cabo el análisis de precios de los rubros listados en la Tabla 62 correspondientes a la construcción del pavimento rígido, en la Tabla 63 se expone un ejemplo del análisis de los costos unitarios realizados para el mismo, y el análisis de los rubros restantes se encuentran en el Anexo 11, se presenta el presupuesto de construcción de la vía para 1 kilómetro del pavimento rígido en la Tabla 64. Del mismo modo se hizo el presupuesto para el mantenimiento de la vía, detallados en las Tablas 65, 66, 67.

Tabla 62

Rubros de construcción pavimento rígido.

RUBROS DE CONSTRUCCIÓN		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
	OBRAS PRELIMINARES	
1	Limpieza del terreno	Ha
2	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO		
3	Curador	m ²
4	Pavimento de hormigón f _c =300kg/cm ²	m ³
5	Capa de sub-base clase 3	m ³
6	Acero de refuerzo para juntas, D=25mm, f _y =4200 kg/cm ²	kg
7	Juntas de contracción	m
DRENAJE		
8	Excavación y relleno para estructuras menores	m ³
9	Excavación y relleno en cunetas	m ³
10	Hormigón simple f _c =180 kg/cm ² para cunetas	m ³
11	Tubería corrugada perforada de PVC de 200 mm	m
12	Colector H.A. S= 1.00x1.20 m	u
SEÑALIZACIÓN		
13	Señalización vertical	u
14	Señalización horizontal	m

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 63

Análisis de precios unitarios pavimento rígido.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD
 UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
 REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

ITEM: 2 UNIDAD: km
 RUBRO: Replanteo y nivelación con equipo topográfico

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANT.	TARIFA	COSTO/ HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Herramienta menor (5% M.O.)					0.02
Equipo topográfico	2.00	6.50	13.00	0.01	0.16
				SUBTOTAL	0.18
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANT.	JORN/ HORA	COST. HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Topógrafo 2	2.00	4.04	8.08	0.01	0.10
Cadenero D2	8.00	3.65	29.20	0.01	0.35
				SUBTOTAL	0.45

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO U.	COSTO
Estacas de madera	u	10.00	0.30	3.00
Pintura esmaltada	gal	0.25	16.25	4.06
			SUBTOTAL	7.06
COSTO TOTAL RUBRO				\$ 7.69

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 64

Presupuesto de construcción pavimento rígido.

PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD (Pavimento flexible)
UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

CO D	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
OBRAS PRELIMINARES					
1	Limpieza del terreno	Ha	0.60	\$ 8.61	\$ 5.17
2	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km	1.00	\$ 7.69	\$ 7.69
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO					
3	Curador	m ²	6000.00	\$ 3.49	\$ 20,941.20
4	Pavimento de hormigón f _c =300kg/cm ²	m ³	1219.20	\$ 145.34	\$ 177,204.06
5	Capa de sub-base clase 3	m ³	914.40	\$ 18.68	\$ 17,085.38
6	Acero de refuerzo para juntas, D=25mm, f _y =4200 kg/cm ²	kg	346.50	\$ 1.93	\$ 668.27
7	Juntas de contracción	m	1108.00	\$ 1.52	\$ 1,686.54
DRENAJE					
8	Excavación y relleno para estructuras menores	m ³	2714.40	\$ 21.20	\$ 57,548.46
9	Excavación y relleno en cunetas	m ³	450.00	\$ 5.59	\$ 2,514.24
10	Hormigón simple f _c =180 kg/cm ² para cunetas	m ³	324.00	\$ 116.75	\$ 37,825.54
11	Tubería corrugada perforada de PVC de 200 mm	m	2000.00	\$ 13.64	\$ 27,273.18
12	Colector H.A. S= 1.00x1.20 m	u	10.00	\$ 307.94	\$ 3,079.44
SEÑALIZACIÓN					
13	Señalización vertical	u	50.00	\$ 43.76	\$ 2,187.81
14	Señalización horizontal	m	3000.00	\$ 1.29	\$ 3,867.21
TOTAL PRESUPUESTO					\$351,894.18

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

3.6.2.4 Precios unitarios de mantenimiento para el pavimento rígido de hormigón con fibras de acero.

Tabla 65

Rubros de mantenimiento pavimento rígido.

RUBROS DE MANTENIMIENTO RUTINARIO		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
	MANTENIMIENTO RUTINARIO	
17	Sellado de grietas o fisuras	m
RUBROS DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO		
COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
	MANTENIMIENTO PERIÓDICO	
15	Bacheo superficial e=2" con hormigón f'c=300kg/cm ²	m ²
16	Bacheo profundo con hormigón f'c=300kg/cm ²	m ²

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 66

Análisis de precios unitarios de mantenimiento pavimento rígido.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD
UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
 Ana Galarza, Sebastián
REALIZADO POR: Cadena

ITEM: 15 **UNIDAD:** m²
RUBRO: Bacheo superficial e=2" con hormigón f'c=300kg/cm²

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANT.	TARIFA	COSTO/HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Herramienta menor (5% M.O.)					0.08
Cortadora de concreto	1.00	5.15	5.15	0.020	0.10
Mini cargadora	1.00	15.00	15.00	0.020	0.30
Vibrador	1.00	2.13	2.13	0.075	0.16
Volqueta	1.00	21.72	21.72	0.016	0.35
				SUBTOTAL	0.99

MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANT.	JORN/HORA	COST. HORA	RENDIMIENTO	COSTO
Peón E2	5.00	3.60	18.00	0.050	0.900
Op. de minicargadora	1.00	3.85	3.85	0.050	0.193
Chofer volqueta C1	1.00	5.29	5.29	0.050	0.265
Inspector de obra	1.00	4.05	4.05	0.050	0.203
				SUBTOTAL	1.560

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO U.	COSTO
Hormigón premezclado f'c=300kg/cm ²	m ³	0.0760	103.53	7.87
			SUBTOTAL	7.87
			COSTO TOTAL RUBRO	\$ 10.42

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El detalle de los demás rubros de mantenimiento vial se los presenta en el Anexo 12.

Tabla 67

Presupuesto de mantenimiento pavimento rígido.

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO

PROYECTO: PAVIMENTACIÓN VÍA LA LIBERTAD (Pavimento flexible)
UBICACIÓN: Parroquia La Libertad - Cantón Espejo - Provincia Carchi
REALIZADO POR: Ana Galarza, Sebastián Cadena

COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
	MANTENIMIENTO RUTINARIO				
17	Sellado de grietas o fisuras	m	7.00	\$ 1.21	\$ 8.50
				TOTAL PRESUPUESTO	\$ 8.50

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO

COD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	P.U.	P.T.
	MANTENIMIENTO PERIÓDICO				
15	Bacheo superficial e=2" con hormigón f'c=300kg/cm ²	m ²	300.00	\$ 10.42	\$ 3,124.81
16	Bacheo profundo con hormigón f'c=300kg/cm ²	m ²	60.00	\$ 24.21	\$ 1,452.78
				TOTAL PRESUPUESTO	\$ 4,577.58

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo desarrolla los resultados y discusiones pertinentes luego de haber evaluado las características del suelo, el número de repeticiones que se esperan de acuerdo con el volumen de tráfico en el sitio de estudio, así como el diseño del pavimento flexible de asfalto bituminoso colocado en frío y del pavimento de hormigón con fibras de acero tipo Dramix, la simulación de los mismo en el software Kenlayer y los costos de construcción y mantenimiento.

4.1 Características del suelo del sitio de estudio.

Las características del suelo se obtuvieron luego de ensayos de laboratorio y en campo, mostradas en la Tabla 68.

Tabla 68

Características del suelo del sitio de estudio.

Características y propiedades del suelo	
Ubicación:	Carchi, Espejo, La Libertad.
Tipo de suelo (SUCS):	CH
Humedad natural:	45%
Límite Líquido:	60%
Límite Plástico:	22%
CBR subrasante:	5.45%
CBR empedrado-subrasante:	10.35%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) es característico de la zona, además provisto de un alto grado de humedad, lo cual se tuvo en cuenta al diseñar los pavimentos.

Se observa un aumento en la capacidad portante del suelo al tomar en cuenta la presencia del empedrado, mejorando el desempeño mecánico del mismo, y siendo un aporte primordial tanto en resistencia como en permeabilidad.

4.2 Volumen de tráfico y número de repeticiones esperadas.

El proceso de análisis dio como resultado el tráfico promedio diario anual que circula en el sitio de estudio, a partir de este dato se obtuvo el número de repeticiones mediante la metodología de la AASHTO-93, resultados utilizados en la simulación

con el software en ambos tipos de pavimentos, para realizar una comparación equitativa.



Figura 85. TPDA y número de repeticiones.

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

4.3 Diseño del pavimento flexible y rígido.

La Figura 86 representa el esquema del espesor de cada capa que conforma el diseño del pavimento flexible bituminoso colocado en frío, del mismo modo la Figura 87 el diseño del pavimento rígido de hormigón con fibras de acero tipo Dramix.

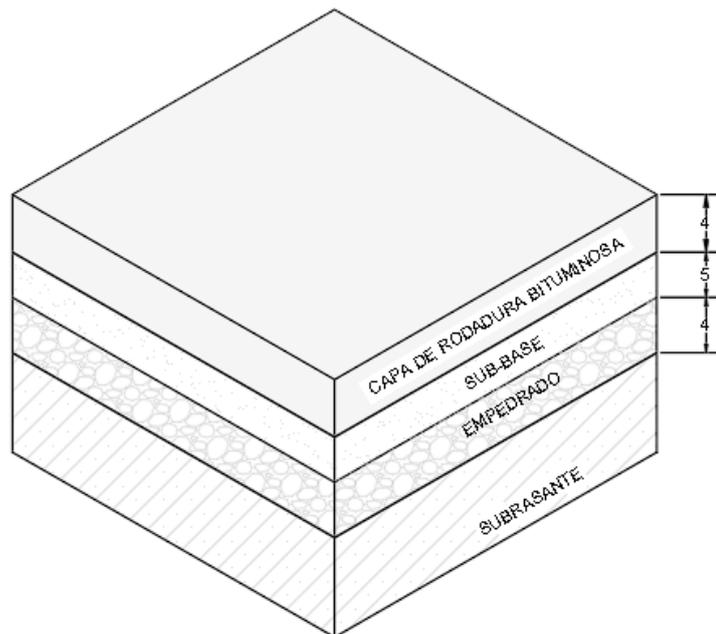


Figura 86. Diseño final pavimento flexible, [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

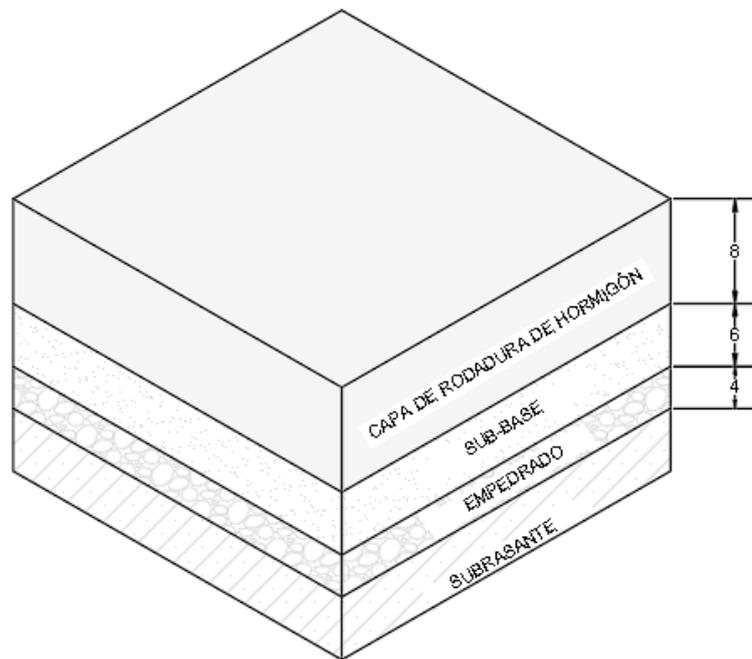


Figura 87. Diseño final pavimento rígido, [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

4.4 Simulación en el software Kenlayer.

Luego del análisis en el software se obtuvo datos de esfuerzo, desplazamientos, deformaciones unitarias y rango de daño, tanto en profundidad como en traslación horizontal a una distancia x del eje de carga (Ver Figura 88), a partir de esto se elaboraron gráficos para una mejor percepción de los resultados. Se debe tomar en cuenta que el signo negativo de las deformaciones unitarias indica que el material se encuentra bajo esfuerzos a tensión, mientras que el positivo muestra un material sometido a esfuerzos de compresión.

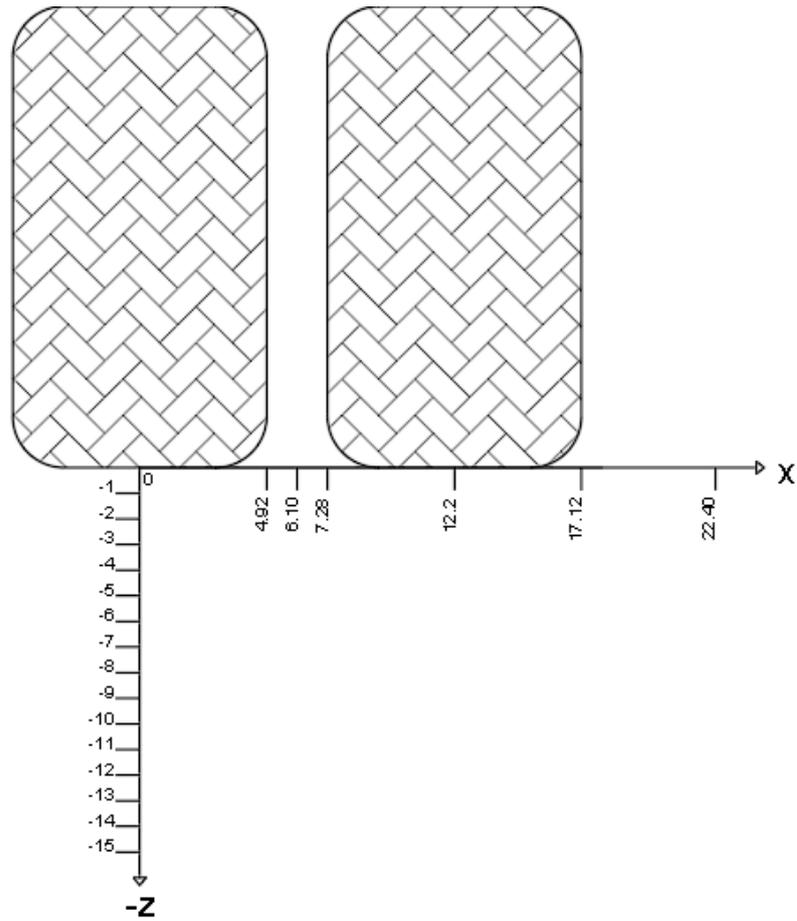


Figura 88. Esquema de aplicación de carga, [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

4.4.1 Pavimento flexible bituminoso colocado en frío

- **Espesor de la capa de rodadura $e= 4$ [in].**

Tabla 69

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible $e= 4$ [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	σ_z [psi]						
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-1	56.016	27.496	5.731	27.496	56.016	26.906	0.505
-2	44.784	24.505	14.686	24.505	44.784	21.825	1.696
-3	31.762	21.593	18.262	21.593	31.762	16.76	3.025
-4	23.204	19.107	18.338	19.107	23.204	13.468	3.838
-5	19.331	17.064	16.664	17.064	19.331	11.865	4.147
-6	16.164	15.209	15.009	15.209	16.164	10.516	4.389
-7	13.739	13.696	13.612	13.696	13.739	9.459	4.572
-8	12.138	12.674	12.656	12.674	12.138	8.754	4.693

-9	11.538	12.295	12.303	12.295	11.538	8.491	4.74
-10	11.413	12.2	12.211	12.2	11.413	8.429	4.741
-11	11.117	11.951	11.969	11.951	11.117	8.274	4.735
-12	10.725	11.597	11.62	11.597	10.725	8.059	4.716
-13	10.287	11.176	11.203	11.176	10.287	7.808	4.681
-14	9.83	10.715	10.745	10.715	9.83	7.538	4.629
-15	9.372	10.236	10.266	10.236	9.372	7.259	4.564

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

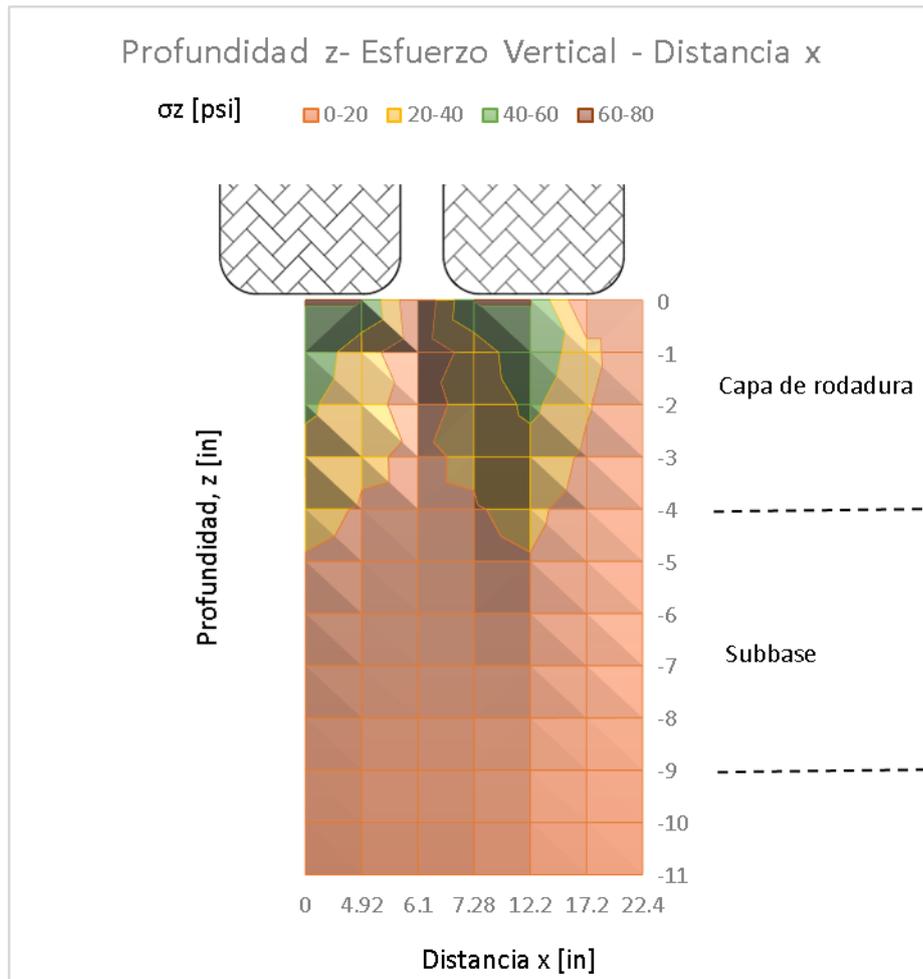


Figura 89. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible $e= 4$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tal como muestra la Figura 89, simulado la estructura del pavimento la respuesta se asemeja a la forma típica de la distribución de esfuerzos en una estructura de un pavimento flexible. Según los datos obtenidos, se nota que el esfuerzo en el eje de la llanta ($x=0$ [in]) a nivel de la subbase ($z=-4$ [in]) alcanza el 38% de la carga que provoca la rueda, la cual es de 60.57 psi (Ver Figura 52), y a nivel de subrasante ($z=-9$ [in]) 19% de la misma, es decir 11.54 psi, este valor es mucho menor al esfuerzo admisible de la subrasante, esto es el 10% del CBR, dando un valor de

1141 psi, lo que indica que la disipación de esfuerzos es adecuada para una capa de rodadura asfáltica bituminosa.

Tabla 70

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	Δz [in]						
0	0.02757	0.0287	0.02867	0.0287	0.02757	0.02288	0.01711
-1	0.02753	0.02851	0.02843	0.02851	0.02753	0.02291	0.01715
-2	0.02749	0.02854	0.02851	0.02854	0.02749	0.0229	0.01716
-3	0.02732	0.02844	0.02843	0.02844	0.02732	0.02282	0.01715
-4	0.02703	0.02822	0.02822	0.02822	0.02703	0.02266	0.01713
-5	0.02631	0.0276	0.02762	0.0276	0.02631	0.02224	0.01701
-6	0.02562	0.02696	0.027	0.02696	0.02562	0.02181	0.01686
-7	0.02495	0.0263	0.02634	0.0263	0.02495	0.02137	0.01668
-8	0.02427	0.02558	0.02563	0.02558	0.02427	0.02091	0.01648
-9	0.02352	0.02479	0.02484	0.02479	0.02352	0.0204	0.01625
-10	0.02318	0.02443	0.02447	0.02443	0.02318	0.02015	0.01612
-11	0.02274	0.02396	0.02401	0.02396	0.02274	0.01984	0.01597
-12	0.02224	0.02343	0.02348	0.02343	0.02224	0.01949	0.0158
-13	0.0217	0.02285	0.0229	0.02285	0.0217	0.01911	0.0156
-14	0.02115	0.02225	0.02229	0.02225	0.02115	0.01871	0.0154
-15	0.02059	0.02163	0.02167	0.02163	0.02059	0.0183	0.01517

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

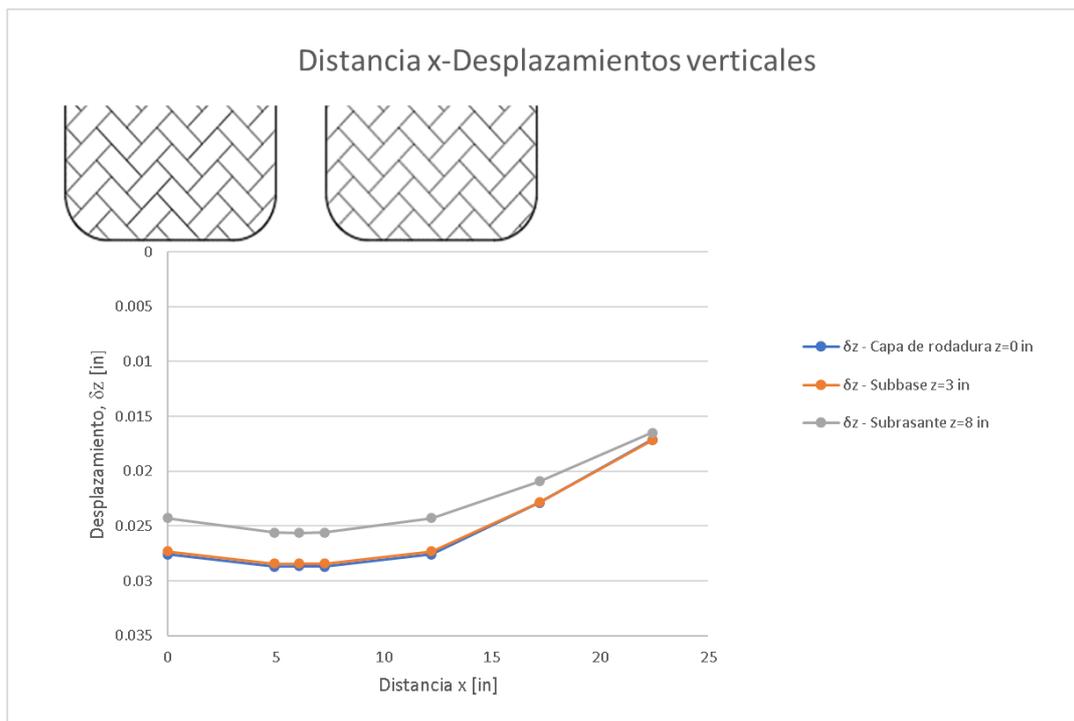


Figura 90. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible e= 4 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se puede notar en la Figura 90 una marcada tendencia a disminuir el desplazamiento a medida que se aleja y se profundiza el punto de análisis, de la aplicación de carga, es decir la distancia en el eje x y en el eje z aumentan, en especial en la frontera subbase-subrasante, donde existe un desplazamiento de 0.02352 in que en el SI equivale a 0.59 mm en x=0 [in], concordando con la distribución de esfuerzos antes mencionados.

Tabla 71

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	ε _z [in]						
0	-1.65E-04	-2.17E-04	-2.17E-04	-2.17E-04	-1.65E-04	-1.25E-04	-4.12E-05
-1	-2.53E-05	-8.85E-05	-1.57E-04	-8.85E-05	-2.53E-05	-2.86E-05	-2.27E-05
-2	1.04E-04	3.61E-05	-5.62E-07	3.61E-05	1.04E-04	4.54E-05	-3.05E-06
-3	2.21E-04	1.61E-04	1.44E-04	1.61E-04	2.21E-04	1.16E-04	1.75E-05
-4	3.66E-04	2.89E-04	2.74E-04	2.89E-04	3.66E-04	1.98E-04	3.49E-05
-5	7.03E-04	6.26E-04	6.12E-04	6.26E-04	7.03E-04	4.23E-04	1.33E-04
-6	6.71E-04	6.47E-04	6.40E-04	6.47E-04	6.71E-04	4.29E-04	1.63E-04
-7	6.69E-04	6.84E-04	6.82E-04	6.84E-04	6.69E-04	4.48E-04	1.92E-04

-8	7.06E-04	7.46E-04	7.45E-04	7.46E-04	7.06E-04	4.83E-04	2.17E-04
-9	7.93E-04	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	7.93E-04	5.41E-04	2.39E-04
-10	4.01E-04	4.21E-04	4.21E-04	4.21E-04	4.01E-04	2.83E-04	1.40E-04
-11	4.76E-04	5.04E-04	5.04E-04	5.04E-04	4.76E-04	3.35E-04	1.63E-04
-12	5.21E-04	5.60E-04	5.60E-04	5.60E-04	5.21E-04	3.70E-04	1.84E-04
-13	5.46E-04	5.93E-04	5.95E-04	5.93E-04	5.46E-04	3.92E-04	2.02E-04
-14	5.59E-04	6.12E-04	6.13E-04	6.12E-04	5.59E-04	4.06E-04	2.17E-04
-15	5.62E-04	6.18E-04	6.20E-04	6.18E-04	5.62E-04	4.14E-04	2.29E-04

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

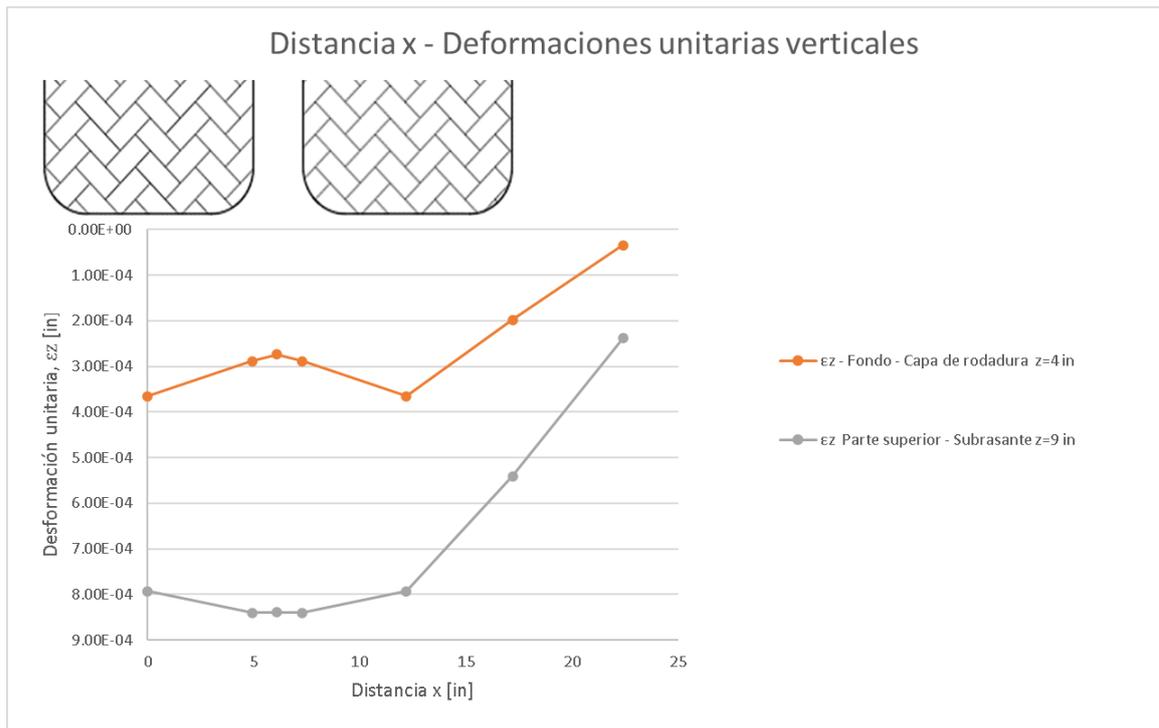


Figura 91. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 4 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Como se muestra en la Figura 91 en el fondo de la capa de rodadura, la parte intermedia de las dos ruedas ($x=6.1$ [in]) genera una notable diferencia con las deformaciones en los ejes de las ruedas, esto es debido a que la deformación unitaria vertical a compresión es la responsable de producir el ahuellamiento en el pavimento, lo que no ocurre en la parte superior de la subrasante.

Al ser un análisis elástico lineal la magnitud de las deformaciones, dependen directamente del esfuerzo y del módulo de elasticidad de cada material, por esta razón en la Figura 88 se observa que la subrasante tiene una mayor deformación unitaria, al tener un módulo de elasticidad mucho menor que los demás materiales que conforman la estructura.

Tabla 72*Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].*

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento flexible		
Línea de fondo - Capa de rodadura		
Número de repeticiones permitidas=		3.42E+06
Deformación en tensión (-) =		-3.75E-04 in
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas=		7.85E+06
Deformación en compresión (+) =		5.35E-04 in
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño
1 (2 meses)	De rodadura	1.231%
1 (2 meses)	Subrasante	0.054%
2 (4 meses)	De rodadura	2.461%
2 (4 meses)	Subrasante	0.107%
3 (6 meses)	De rodadura	3.692%
3 (6 meses)	Subrasante	0.161%
4 (8 meses)	De rodadura	4.923%
4 (8 meses)	Subrasante	0.214%
5 (10 meses)	De rodadura	6.153%
5 (10 meses)	Subrasante	0.268%
6 (12 meses)	De rodadura	7.384%
6 (12 meses)	Subrasante	0.321%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 73*Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 4 [in].*

Resumen de análisis de daño	
Línea de fondo-capa de rodadura	
Relación de daño=	25.840%
Parte superior subrasante=	
Relación de daño=	1.124%
Máxima relación de daño (1año) =	25.840%
Vida de diseño (años)=	3.87

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La Tabla 72, presenta el análisis de daño para 6 periodos, cada uno de dos meses, estos valores están representados en porcentaje de daño, tanto para la capa de rodadura como para la subrasante, los cuales son sumados para obtener la máxima relación de daño que se muestra en la Tabla 73. Además, el software proporcionó la vida de diseño en años, la cual es mucho menor a la del diseño (10 años).

- **Espesor de la capa de rodadura $e= 3$ [in].**

Tabla 74

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible $e= 3$ [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	σ_z [psi]						
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-1	54.383	27.858	6.836	27.858	54.383	26.495	0.71
-2	41.504	25.693	17.892	25.693	41.504	21.038	2.153
-3	31.379	23.572	21.936	23.572	31.379	16.968	3.245
-4	26.045	21.213	20.376	21.213	26.045	14.849	3.786
-5	21.472	18.964	18.538	18.964	21.472	13.021	4.251
-6	17.876	17.065	16.869	17.065	17.876	11.558	4.62
-7	15.447	15.751	15.688	15.751	15.447	10.564	4.874
-8	14.524	15.261	15.246	15.261	14.524	10.189	4.972
-9	14.328	15.128	15.121	15.128	14.328	10.098	4.981
-10	13.869	14.781	14.788	14.781	13.869	9.874	4.994
-11	13.28	14.289	14.307	14.289	13.28	9.569	4.994
-12	12.637	13.705	13.732	13.705	12.637	9.219	4.975
-13	11.979	13.071	13.103	13.071	11.979	8.847	4.935
-14	11.33	12.415	12.451	12.415	11.33	8.469	4.877
-15	10.703	11.758	11.795	11.758	10.703	8.093	4.802

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

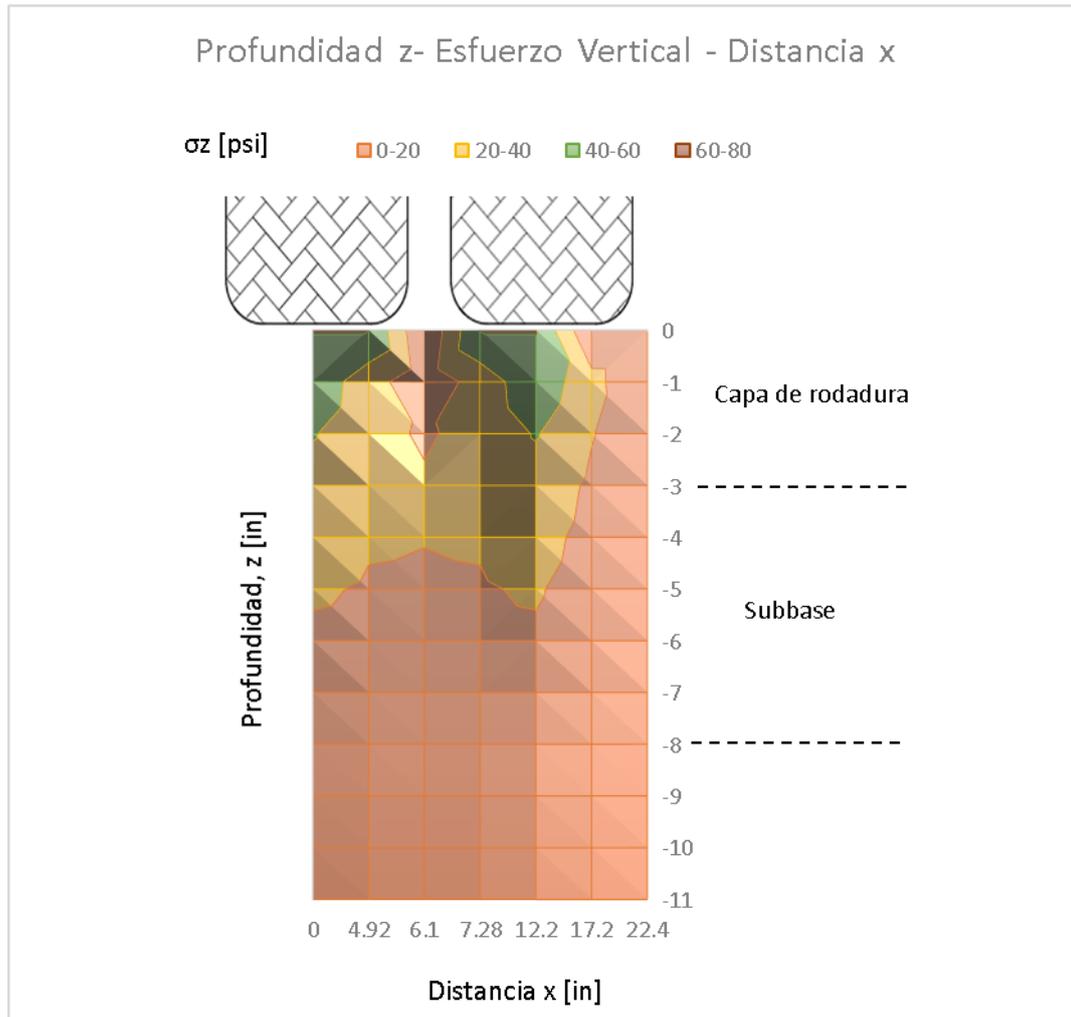


Figura 92. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible $e= 3$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Observando la Figura 92, se muestra que el esfuerzo en el eje de la llanta ($x=0$ [in]) a nivel de la subbase ($z=-3$ [in]) alcanza el 51.81% de la carga que provoca la rueda, y a nivel de subrasante ($z=-8$ [in]) 23.98% de la misma, es decir 14.52 psi, este valor es mucho menor al esfuerzo admisible de la subrasante, esto es el 10% del CBR, dando un valor de 1141 psi, lo que indica que la disipación de esfuerzos es menor al caso anterior, justificado por la reducción del espesor de la capa de rodadura.

Tabla 75

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible $e= 3$ [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	Δz [in]						
0	0.03109	0.03201	0.03235	0.03201	0.03109	0.02504	0.01767
-1	0.03106	0.03209	0.03198	0.03209	0.03106	0.02505	0.01772

-2	0.03097	0.03206	0.032	0.03206	0.03097	0.02501	0.01772
-3	0.03067	0.03187	0.03183	0.03187	0.03067	0.02486	0.01771
-4	0.02975	0.03116	0.03117	0.03116	0.02975	0.02437	0.01762
-5	0.02889	0.03042	0.03045	0.03042	0.02889	0.02387	0.0175
-6	0.02806	0.02964	0.02968	0.02964	0.02806	0.02336	0.01733
-7	0.02721	0.02878	0.02883	0.02878	0.02721	0.02281	0.01713
-8	0.02628	0.02782	0.02787	0.02782	0.02628	0.0222	0.01691
-9	0.02583	0.02736	0.02741	0.02736	0.02583	0.0219	0.01678
-10	0.02526	0.02677	0.02682	0.02677	0.02526	0.02152	0.01662
-11	0.02461	0.02609	0.02614	0.02609	0.02461	0.02108	0.01644
-12	0.02393	0.02535	0.02541	0.02535	0.02393	0.02062	0.01624
-13	0.02323	0.02459	0.02464	0.02459	0.02323	0.02013	0.01601
-14	0.02252	0.02382	0.02387	0.02382	0.02252	0.01963	0.01578
-15	0.02182	0.02305	0.0231	0.02305	0.02182	0.01914	0.01553

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

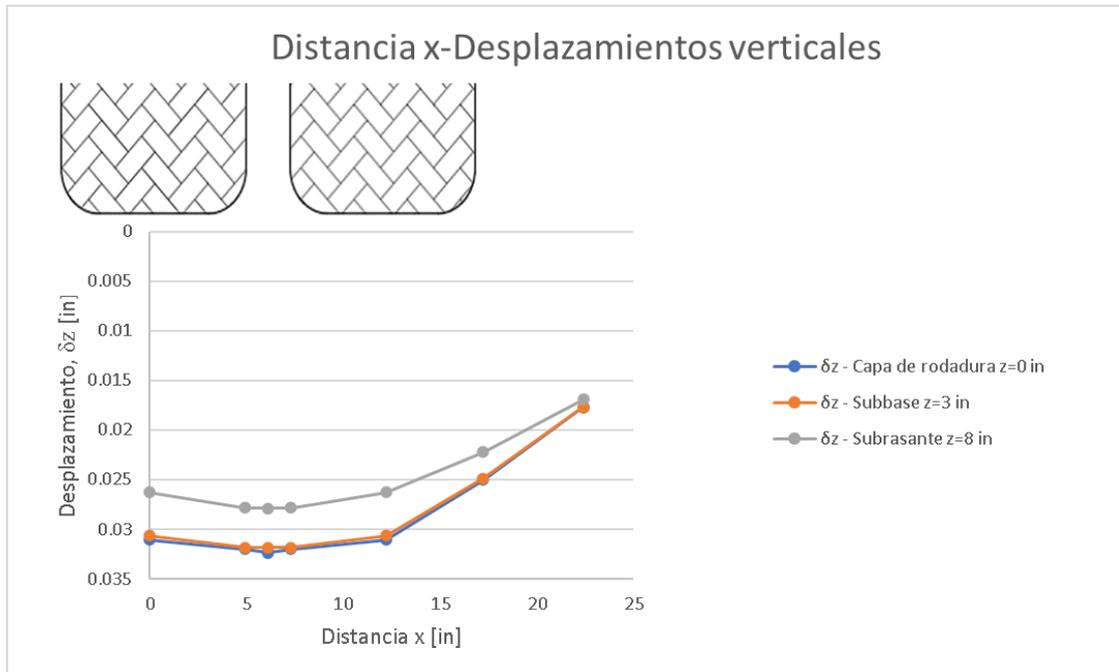


Figura 93. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible $e=3$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

De la misma manera que el caso anterior en la Figura 93, se muestra que la capa de rodadura y la subbase presentan mayor desplazamiento al de la subrasante, debido a la disipación del esfuerzo.

Tabla 76

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
εz [in]							
0	-2.37E-04	-2.47E-04	-2.51E-04	-2.47E-04	-2.37E-04	-1.46E-04	-2.11E-05
-1	-1.33E-05	-6.25E-05	-1.28E-04	-6.25E-05	-1.33E-05	-1.42E-05	-1.08E-05
-2	1.94E-04	1.11E-04	7.68E-05	1.11E-04	1.94E-04	9.29E-05	2.50E-06
-3	4.17E-04	2.84E-04	2.54E-04	2.84E-04	4.17E-04	2.06E-04	1.38E-05
-4	8.85E-04	7.21E-04	6.91E-04	7.21E-04	8.85E-04	4.94E-04	1.09E-04
-5	8.41E-04	7.61E-04	7.46E-04	7.61E-04	8.41E-04	5.03E-04	1.48E-04
-6	8.33E-04	8.18E-04	8.10E-04	8.18E-04	8.33E-04	5.26E-04	1.82E-04
-7	8.78E-04	9.03E-04	9.00E-04	9.03E-04	8.78E-04	5.71E-04	2.12E-04
-8	9.99E-04	1.03E-03	1.03E-03	1.03E-03	9.99E-04	6.47E-04	2.34E-04
-9	5.20E-04	5.34E-04	5.32E-04	5.34E-04	5.20E-04	3.48E-04	1.45E-04
-10	6.17E-04	6.42E-04	6.40E-04	6.42E-04	6.17E-04	4.13E-04	1.69E-04
-11	6.71E-04	7.11E-04	7.10E-04	7.11E-04	6.71E-04	4.54E-04	1.92E-04
-12	6.97E-04	7.51E-04	7.51E-04	7.51E-04	6.97E-04	4.79E-04	2.13E-04
-13	7.06E-04	7.69E-04	7.71E-04	7.69E-04	7.06E-04	4.93E-04	2.31E-04
-14	7.03E-04	7.73E-04	7.75E-04	7.73E-04	7.03E-04	4.98E-04	2.45E-04
-15	6.92E-04	7.65E-04	7.67E-04	7.65E-04	6.92E-04	4.97E-04	2.56E-04

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

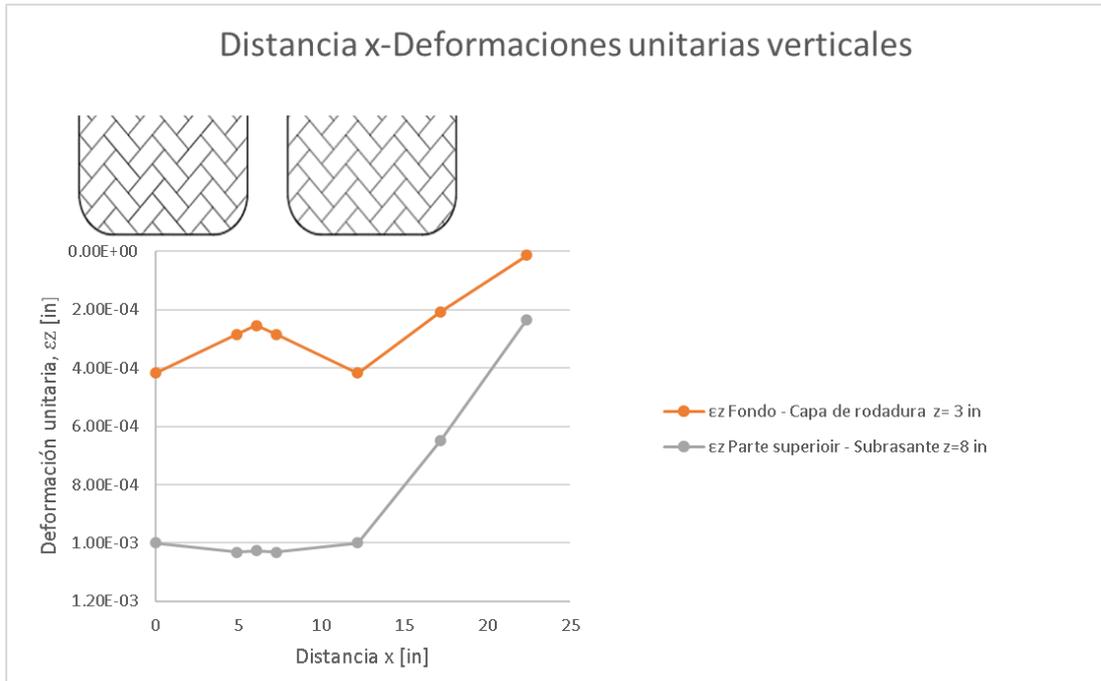


Figura 94. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 3 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se observa en Figura 94, que el ahuellamiento ya mencionado es más pronunciado debido a la disminución de la capa de rodadura.

Tabla 77

Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento flexible		
Línea de fondo - Capa de rodadura		
Número de repeticiones permitidas=		2.52E+05
Deformación en tensión (-) =		-4.08E-04 in
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas=		2.99E+06
Deformación en compresión (+) =		3.74E-04 in
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño
1 (2 meses)	De rodadura	1.665%
1 (2 meses)	Subrasante	0.140%
2 (4 meses)	De rodadura	3.331%
2 (4 meses)	Subrasante	0.281%
3 (6 meses)	De rodadura	4.996%
3 (6 meses)	Subrasante	0.421%
4 (8 meses)	De rodadura	6.661%
4 (8 meses)	Subrasante	0.562%
5 (10 meses)	De rodadura	8.327%
5 (10 meses)	Subrasante	0.702%
6 (12 meses)	De rodadura	9.992%
6 (12 meses)	Subrasante	0.843%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 78

Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 3 [in].

Resumen de análisis de daño	
Línea de fondo-capas de rodadura	
Relación de daño=	34.970%
Parte superior subrasante=	
Relación de daño=	2.949%
Máxima relación de daño=	34.970%
Vida de diseño (años)=	2.86

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Al igual que el caso anterior la Tabla 78, presenta el resumen del análisis de daño, donde la máxima relación de daño es mayor al espesor de 4 pulgadas y la vida de diseño en años disminuyó.

- **Espesor de la capa de rodadura $e= 5$ [in].**

Tabla 79

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible $e= 5$ [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
σ_z [psi]							
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-1	57.417	27.565	5.569	27.565	57.417	27.256	0.304
-2	48.636	24.584	14.065	24.584	48.636	22.767	1.131
-3	36.53	21.28	16.796	21.28	36.53	17.862	2.258
-4	24.79	17.909	16.324	17.909	24.79	13.526	3.332
-5	17.752	15.434	15.037	15.434	17.752	10.899	3.921
-6	14.879	13.741	13.532	13.741	14.879	9.666	4.093
-7	12.594	12.255	12.153	12.255	12.594	8.646	4.217
-8	10.878	11.072	11.033	11.072	10.878	7.856	4.303
-9	9.763	10.282	10.281	10.282	9.763	7.337	4.357
-10	9.349	9.993	10.006	9.993	9.349	7.146	4.38
-11	9.266	9.924	9.939	9.924	9.266	7.102	4.377
-12	9.06	9.744	9.762	9.744	9.06	6.99	4.366
-13	8.787	9.486	9.507	9.486	8.787	6.833	4.341
-14	8.477	9.178	9.201	9.178	8.477	6.648	4.302
-15	8.149	8.839	8.863	8.839	8.149	6.446	4.251

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Profundidad z- Esfuerzo Vertical - Distancia x

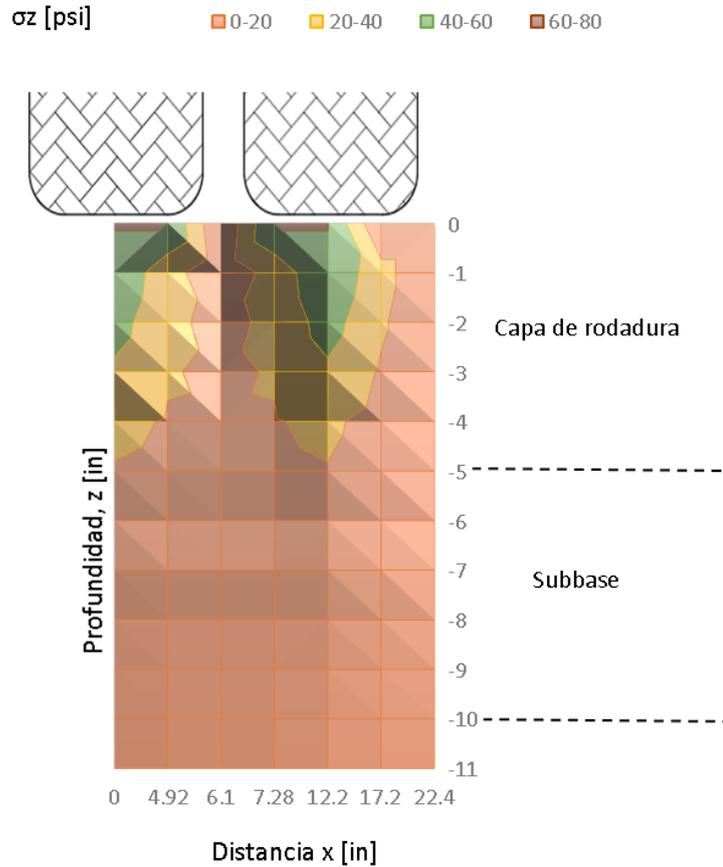


Figura 95. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La Figura 95, muestra un aumento en la disipación de esfuerzos, ya que el esfuerzo en el eje de la llanta (x=0 [in]) a nivel de la subbase (z=-5 [in]) alcanza el 29.31% de la carga que provoca la rueda, y a nivel de subrasante (z=-10 [in]) 15.44% de la misma, es decir 9.35 psi, este valor es mucho menor al esfuerzo admisible de la subrasante, esto es el 10% del CBR, dando un valor de 1141 psi, lo que nos indica que este espesor tiene el mejor desempeño que las opciones anteriores.

Tabla 80

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	Δz [in]						
0	0.0247	0.02556	0.02554	0.02556	0.0247	0.02097	0.01669
-1	0.02463	0.02542	0.02534	0.02542	0.02463	0.02098	0.01638
-2	0.02459	0.02547	0.02544	0.02547	0.02459	0.02098	0.01641

-3	0.02448	0.02542	0.02542	0.02542	0.02448	0.02094	0.01641
-4	0.0243	0.02529	0.0253	0.02529	0.0243	0.02084	0.01639
-5	0.02404	0.02507	0.02509	0.02507	0.02404	0.02069	0.01635
-6	0.02345	0.02454	0.02457	0.02454	0.02345	0.02032	0.01622
-7	0.02289	0.024	0.02403	0.024	0.02289	0.01996	0.01607
-8	0.02234	0.02344	0.02348	0.02344	0.02234	0.01958	0.01589
-9	0.02178	0.02285	0.02289	0.02285	0.02178	0.01919	0.01569
-10	0.02118	0.0222	0.02224	0.0222	0.02118	0.01875	0.01547
-11	0.0209	0.02191	0.02194	0.02191	0.0209	0.01855	0.01535
-12	0.02055	0.02153	0.02157	0.02153	0.02055	0.01829	0.01521
-13	0.02016	0.02111	0.02115	0.02111	0.02016	0.018	0.01505
-14	0.01973	0.02065	0.02069	0.02065	0.01973	0.01769	0.01487
-15	0.01929	0.02017	0.0202	0.02017	0.01929	0.01736	0.01468

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

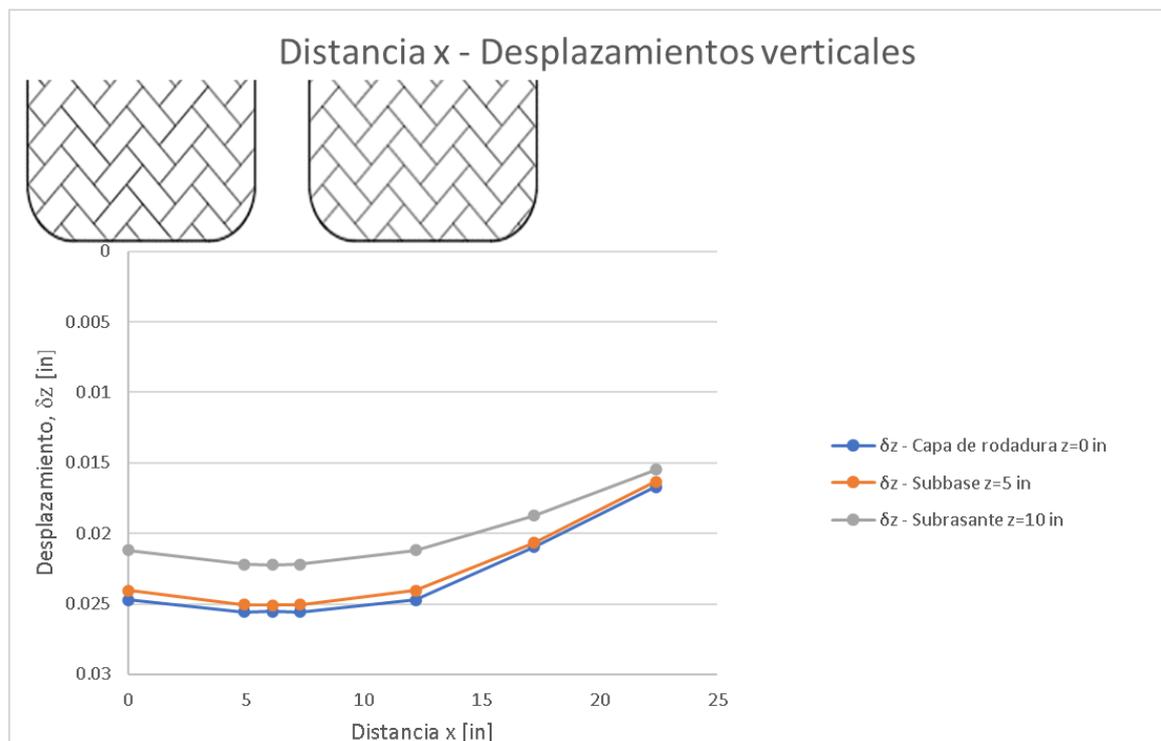


Figura 96. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El desplazamiento para los tres casos coincide con la forma del comportamiento, sin embargo, la magnitud varía, y en este caso los valores son menores a comparación de los espesores anteriores. Ver Tabla 80 y Figura 96.

Tabla 81

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento flexible							
Z[in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
εz [in]							
0	-1.12E-04	-1.77E-04	-1.79E-04	-1.77E-04	-1.12E-04	-1.02E-04	-5.34E-05
-1	-1.62E-05	-9.11E-05	-1.61E-04	-9.11E-05	-1.62E-05	-3.07E-05	-3.26E-05
-2	7.58E-05	-1.01E-06	-3.96E-05	-1.01E-06	7.58E-05	2.35E-05	-1.30E-05
-3	1.45E-04	8.71E-05	6.91E-05	8.71E-05	1.45E-04	7.17E-05	8.61E-06
-4	2.16E-04	1.76E-04	1.67E-04	1.76E-04	2.16E-04	1.22E-04	2.99E-05
-5	3.15E-04	2.71E-04	2.63E-04	2.71E-04	3.15E-04	1.82E-04	4.83E-05
-6	5.71E-04	5.35E-04	5.27E-04	5.35E-04	5.71E-04	3.64E-04	1.41E-04
-7	5.48E-04	5.46E-04	5.42E-04	5.46E-04	5.48E-04	3.69E-04	1.66E-04
-8	5.48E-04	5.72E-04	5.71E-04	5.72E-04	5.48E-04	3.84E-04	1.89E-04
-9	5.78E-04	6.17E-04	6.17E-04	6.17E-04	5.78E-04	4.12E-04	2.10E-04
-10	6.43E-04	6.88E-04	6.89E-04	6.88E-04	6.43E-04	4.57E-04	2.30E-04
-11	3.17E-04	3.36E-04	3.36E-04	3.36E-04	3.17E-04	2.33E-04	1.30E-04
-12	3.75E-04	4.01E-04	4.01E-04	4.01E-04	3.75E-04	2.75E-04	1.51E-04
-13	4.13E-04	4.45E-04	4.46E-04	4.45E-04	4.13E-04	3.04E-04	1.69E-04
-14	4.36E-04	4.73E-04	4.74E-04	4.73E-04	4.36E-04	3.24E-04	1.85E-04
-15	4.49E-04	4.90E-04	4.91E-04	4.90E-04	4.49E-04	3.38E-04	1.98E-04

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

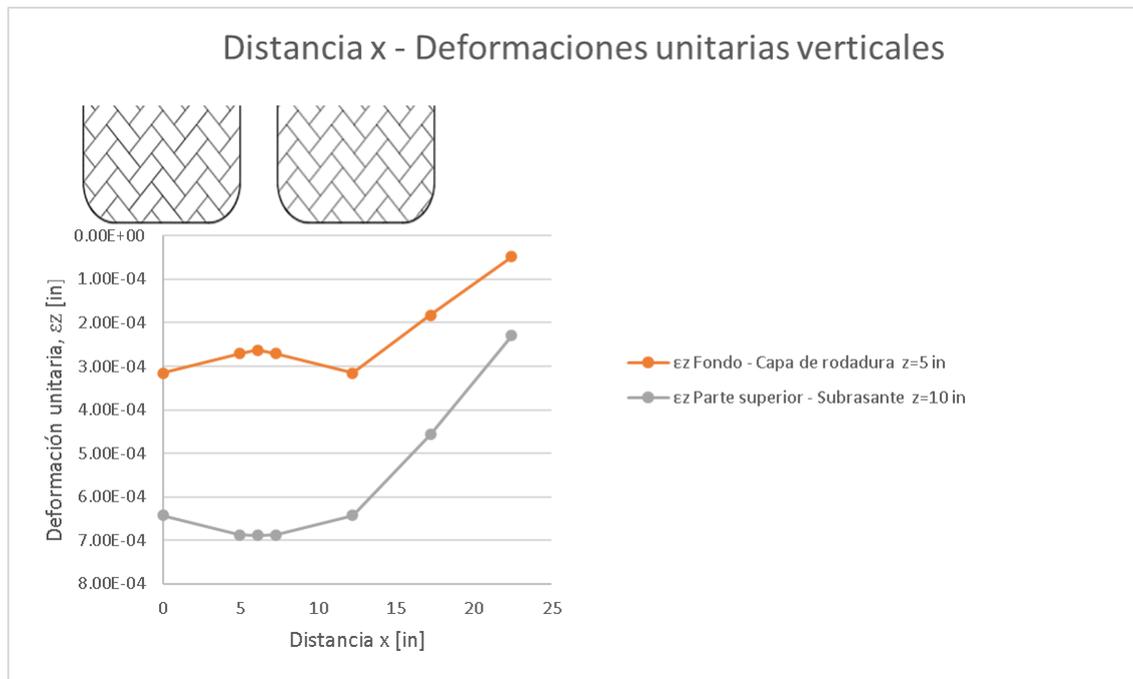


Figura 97. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento flexible e= 5 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

En Figura 97 se observa la disminución del ahuellamiento ya que el espesor aumenta en la capa de rodadura.

Tabla 82

Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento flexible		
Línea de fondo - Capa de rodadura		
Número de repeticiones permitidas=		5.28E+05
Deformación en tensión (-) =		-3.26E-04 in
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas=		1.98E+07
Deformación en compresión (+) =		2.46E-04 in
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño
1 (2 meses)	De rodadura	0.797%
1 (2 meses)	Subrasante	0.021%
2 (4 meses)	De rodadura	1.593%
2 (4 meses)	Subrasante	0.042%
3 (6 meses)	De rodadura	2.390%
3 (6 meses)	Subrasante	0.064%
4 (8 meses)	De rodadura	3.187%
4 (8 meses)	Subrasante	0.085%
5 (10 meses)	De rodadura	3.983%
5 (10 meses)	Subrasante	0.106%
6 (12 meses)	De rodadura	4.780%
6 (12 meses)	Subrasante	0.127%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 83

Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento flexible e= 5 [in].

Resumen de análisis de daño	
Línea de fondo-capa de rodadura	
Relación de daño=	16.730%
Parte superior subrasante=	
Relación de daño=	0.446%
Máxima relación de daño=	
	16.730%
Vida de diseño (años)=	
	5.98

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se observa en la Tabla 83, que la relación máxima de daño disminuye en comparación con los demás casos, por ende, la vida de diseño aumenta considerablemente. Esto simultáneamente con los resultados del comportamiento

mecánico ya mencionados, sugiere que sea la opción adecuada en cuanto al espesor de la capa de rodadura se refiere.

4.4.2 Pavimento rígido de hormigón con fibras de acero tipo Dramix.

- **Espesor de la capa de rodadura $e= 8$ [in].**

Tabla 84

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=8$ [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	σ_z [psi]						
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-2	53.117	25.072	14.11	25.072	53.117	23.777	0.075
-4	32.679	16.905	14.169	16.905	32.679	14.462	0.301
-6	11.916	6.97	6.329	6.97	11.916	5.774	0.898
-8	1.968	1.971	1.964	1.971	1.968	1.642	1.247
-10	1.7	1.739	1.737	1.739	1.7	1.491	1.218
-12	1.536	1.584	1.584	1.584	1.536	1.393	1.194
-14	1.476	1.526	1.526	1.526	1.476	1.356	1.185
-16	1.463	1.513	1.513	1.513	1.463	1.347	1.181
-18	1.434	1.482	1.482	1.482	1.434	1.326	1.17
-20	1.396	1.44	1.44	1.44	1.396	1.297	1.152
-22	1.353	1.394	1.394	1.394	1.353	1.263	1.13

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

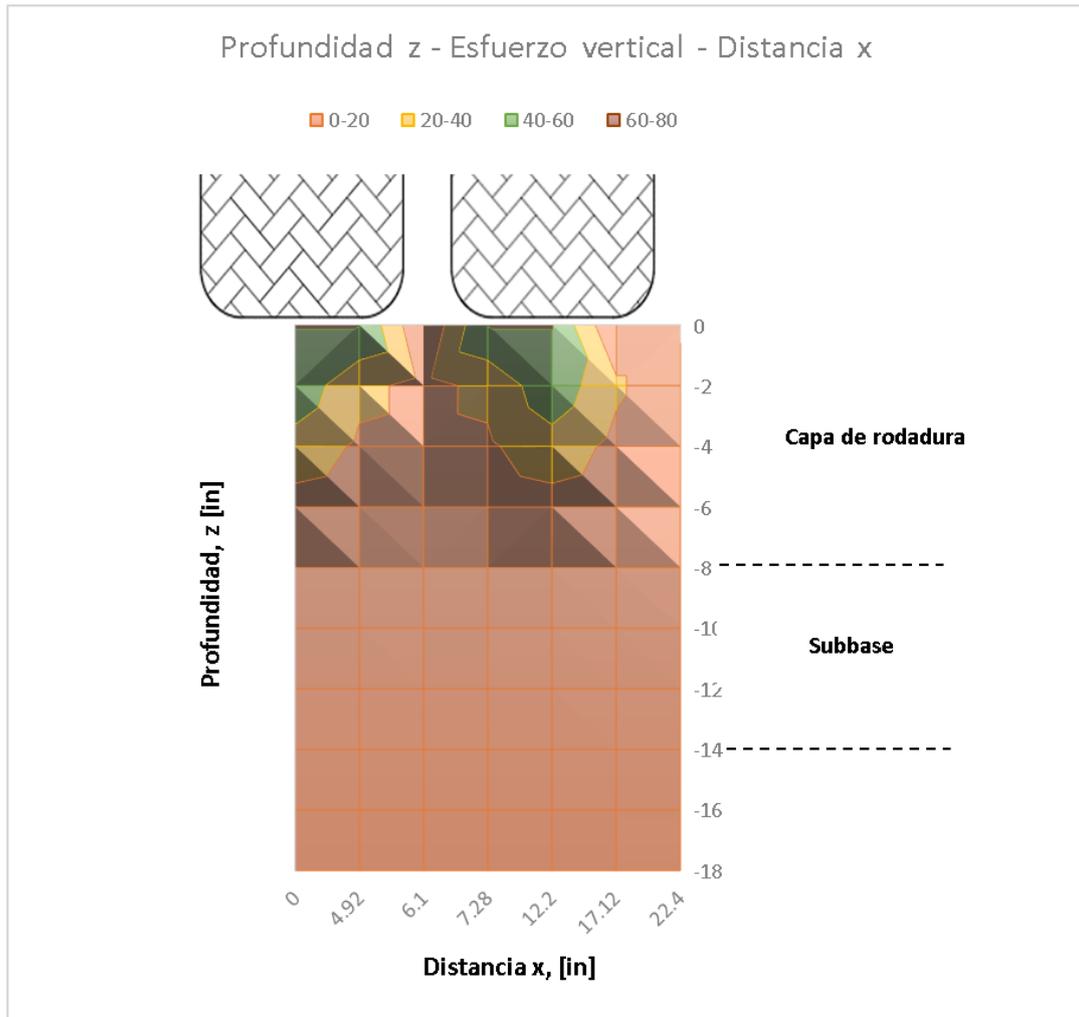


Figura 98. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido $e=8$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La Figura 98, muestra la respuesta de la estructura del pavimento rígido simulado, la cual se asimila a la forma típica de distribución de esfuerzos en una estructura de un pavimento rígido. Según los resultados, el esfuerzo en el eje de la llanta ($x=0$ [in]) a nivel de la subbase ($z=-8$ [in]) alcanza el 3.25% de la carga que provoca la rueda, y a nivel de subrasante ($z=-14$ [in]) 2.43% de la misma, lo que indica que la disipación de esfuerzos es óptima y apropiada para una capa de rodadura de hormigón.

Tabla 85

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=8$ [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	δz [in]						
0	0.00859	0.0087	0.0087	0.0087	0.00859	0.00832	0.00792

-2	0.00864	0.00873	0.00873	0.00873	0.00864	0.00833	0.00789
-4	0.00863	0.00874	0.00874	0.00874	0.00863	0.00833	0.00789
-6	0.00861	0.00872	0.00872	0.00872	0.00861	0.00832	0.00789
-8	0.00857	0.00868	0.00868	0.00868	0.00857	0.00829	0.00787
-10	0.00843	0.00854	0.00855	0.00854	0.00843	0.00818	0.00779
-12	0.00829	0.0084	0.0084	0.0084	0.00829	0.00806	0.00769
-14	0.00814	0.00824	0.00824	0.00824	0.00814	0.00792	0.00758
-16	0.00806	0.00815	0.00815	0.00815	0.00806	0.00785	0.00752
-18	0.00795	0.00804	0.00804	0.00804	0.00795	0.00775	0.00743
-20	0.00783	0.00791	0.00792	0.00791	0.00783	0.00764	0.00734
-22	0.00777	0.00778	0.00778	0.00778	0.00777	0.00752	0.00724

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

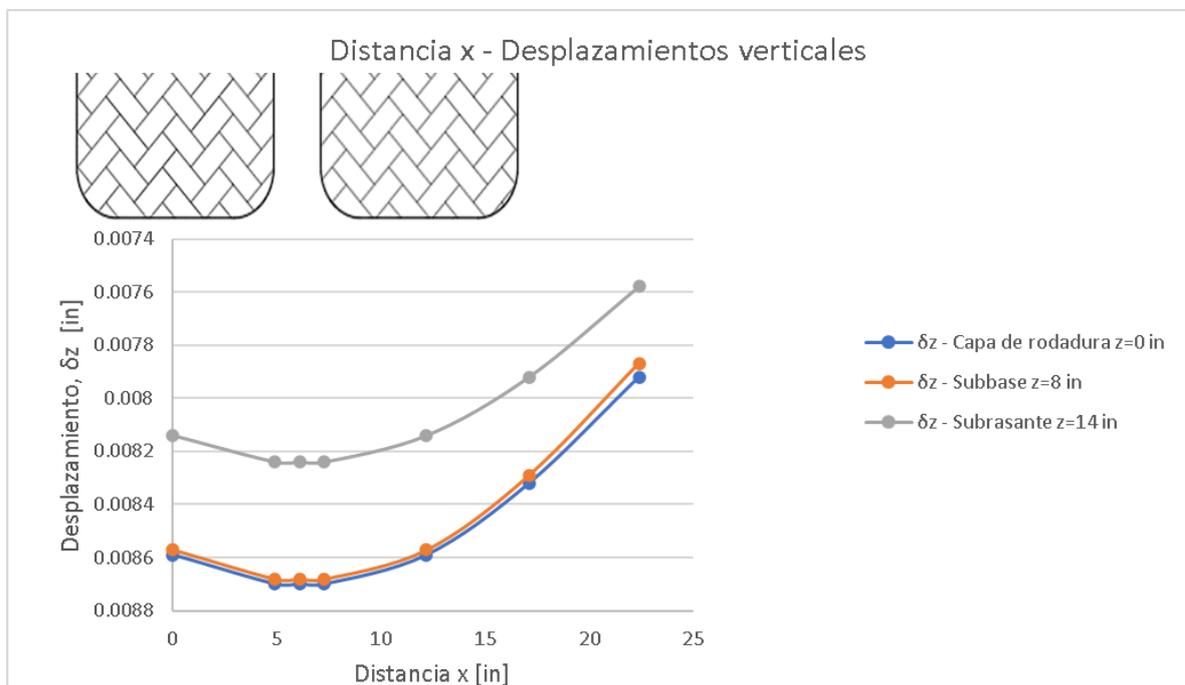


Figura 99. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido $e=8$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se diferencia una marcada disminución del desplazamiento, entre la subbase y la subrasante, donde existe un desplazamiento de 0.0081 in que en el SI equivale a 0.2 mm en $x=0$ [in], ya que si aumenta la profundidad disminuye el desplazamiento, concordando con la distribución de esfuerzos mencionados.

Tabla 86

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=8 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
εz [in]							
0	1.52E-05	1.64E-05	1.68E-05	1.64E-05	1.52E-05	1.36E-05	1.18E-05
-2	1.25E-06	5.91E-06	8.87E-06	5.91E-06	-1.25E-06	3.35E-06	6.16E-06
-4	8.20E-06	3.87E-06	3.09E-06	3.87E-06	8.20E-06	3.47E-06	7.88E-08
-6	1.41E-05	1.31E-05	1.30E-05	1.31E-05	1.41E-05	1.02E-05	6.17E-06
-8	2.44E-05	2.47E-05	2.46E-05	2.47E-05	2.44E-05	1.89E-05	1.24E-05
-10	6.77E-05	7.00E-05	7.00E-05	7.00E-05	6.77E-05	5.78E-05	4.49E-05
-12	7.20E-05	7.53E-05	7.53E-05	7.53E-05	7.20E-05	6.30E-05	5.10E-05
-14	8.14E-05	8.54E-05	8.55E-05	8.54E-05	8.14E-05	7.14E-05	5.78E-05
-16	4.88E-05	5.08E-05	5.08E-05	5.08E-05	4.88E-05	4.39E-05	3.71E-05
-18	5.71E-05	5.96E-05	5.96E-05	5.96E-05	5.71E-05	5.14E-05	4.34E-05
-20	6.26E-05	6.53E-05	6.53E-05	6.53E-05	6.26E-05	5.67E-05	4.83E-05
-22	6.62E-05	6.89E-05	6.89E-05	6.89E-05	6.62E-05	6.03E-05	5.20E-05

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

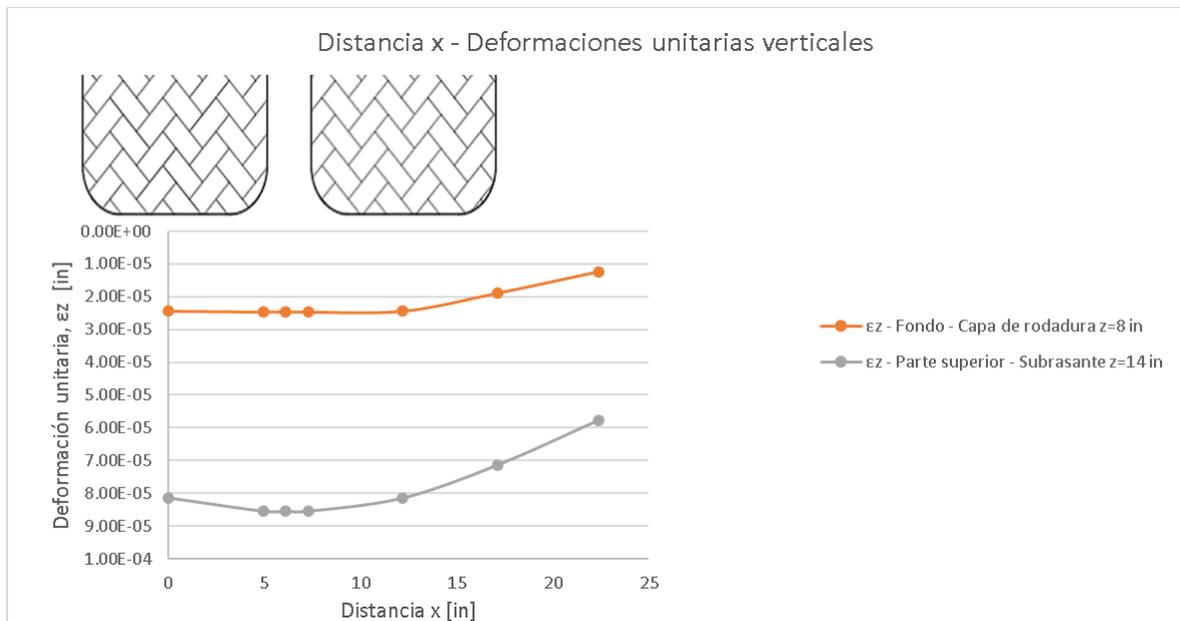


Figura 100. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e=8 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

En la Figura 100, se percibe claramente la no existencia de ahuellamiento en el fondo de la capa de rodadura, cumpliendo con el desempeño esperado de un pavimento rígido.

Como ya se mencionó la magnitud de las deformaciones son inversamente proporcionales al módulo de elasticidad de cada material, por esta razón en la Figura 97 se muestra a la subrasante con una mayor deformación unitaria.

Tabla 87

Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=8$ [in].

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento rígido		
Línea de fondo - Capa de Rodadura		
Número de repeticiones permitidas =		1.31E+06
Deformación en tensión (-) =		-3.31E-05 in
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas =		8.99E+10
Deformación en compresión (+) =		3.74E-05 in
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño
1 (2 meses)	De rodadura	0.320%
1 (2 meses)	Subrasante	0.000%
2 (4 meses)	De rodadura	0.640%
2 (4 meses)	Subrasante	0.000%
3 (6 meses)	De rodadura	0.960%
3 (6 meses)	Subrasante	0.000%
4 (8 meses)	De rodadura	1.280%
4 (8 meses)	Subrasante	0.000%
5 (10 meses)	De rodadura	1.600%
5 (10 meses)	Subrasante	0.000%
6 (12 meses)	De rodadura	1.920%
6 (12 meses)	Subrasante	0.000%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 88

Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=8$ [in].

Resumen análisis de daño	
Línea de fondo - Capa de Rodadura	
Relación de daño=	6.719%
Parte superior - Subrasante	
Relación de daño=	0.0000982%
Máxima relación de daño (1 año) =	6.719%
Vida de diseño (años)=	14.88

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se presenta el análisis de daño de la misma manera que se lo hizo en el pavimento flexible, el software determinó la vida de diseño en años, la cual es mayor a la del

diseño (10 años), siendo la mejor opción en cuanto al espesor de la capa de rodadura.

- **Espesor de la capa de rodadura $e=7$ [in].**

Tabla 89

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=7$ [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	σ_z [psi]						
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-2	51.153	23.826	12.935	23.826	51.153	22.875	0.02
-4	27.486	13.812	11.295	13.812	27.486	12.169	0.599
-6	6.366	4.233	3.912	4.233	6.366	3.581	1.36
-7	2.506	2.495	2.484	2.495	2.506	2.05	1.511
-8	2.306	2.332	2.327	2.332	2.306	1.942	1.493
-10	2.016	2.074	2.073	2.074	2.016	1.776	1.46
-12	1.86	1.927	1.928	1.927	1.86	1.683	1.438
-13	1.838	1.906	1.907	1.906	1.838	1.67	1.435
-14	1.833	1.901	1.902	1.901	1.833	1.667	1.434
-16	1.801	1.869	1.87	1.869	1.801	1.645	1.423
-18	1.753	1.817	1.819	1.817	1.753	1.609	1.404
-20	1.697	1.756	1.757	1.756	1.697	1.566	1.377
-22	1.636	1.69	1.691	1.69	1.636	1.518	1.345

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

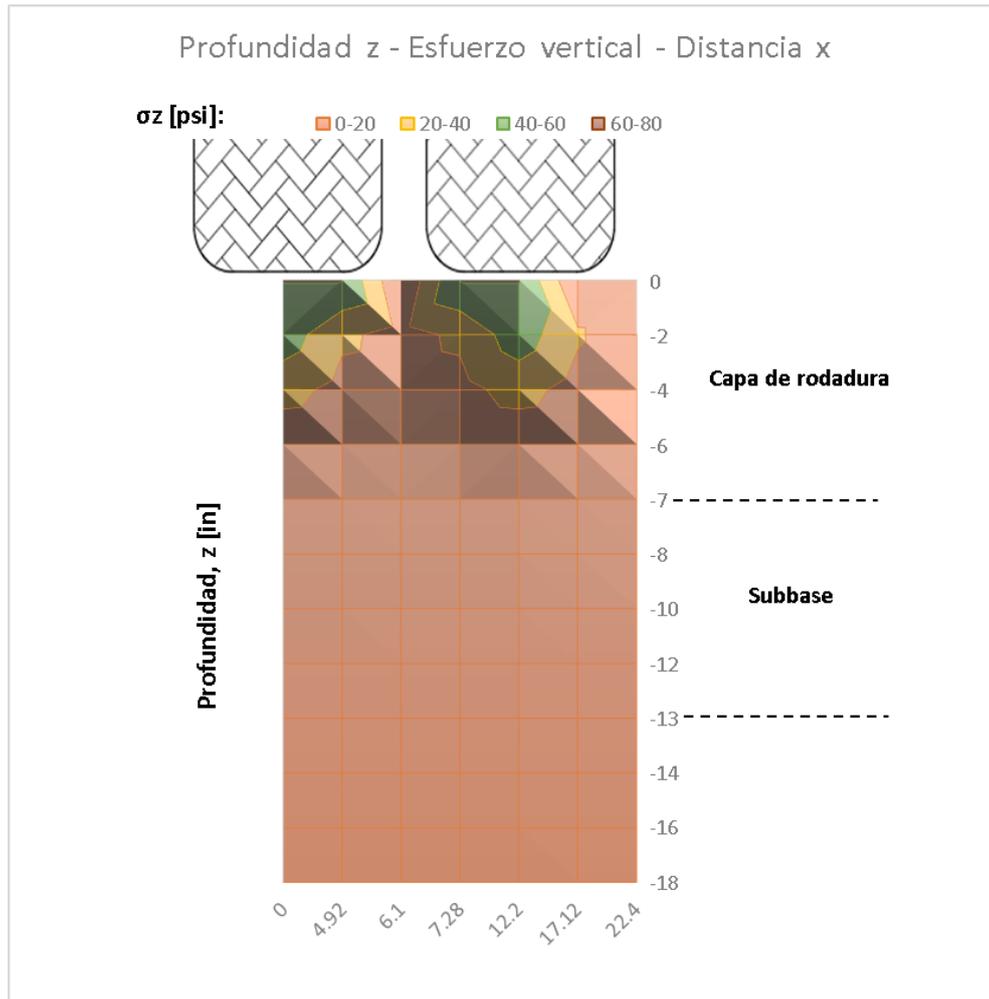


Figura 101. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido $e=7$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El esfuerzo mostrado en la Figura 101, en el eje de la llanta ($x=0$ [in]) a nivel de la subbase ($z=-7$ [in]) alcanza el 4.13% de la carga que provoca la rueda, y a nivel de subrasante ($z=-13$ [in]) 3.03% de la misma, aumentando en escasa magnitud los esfuerzos verticales.

Tabla 90

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=7$ [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	δz [in]						
0	0.00969	0.00986	0.00984	0.00986	0.00969	0.00935	0.00882
-2	0.00975	0.00989	0.00988	0.00989	0.00975	0.00935	0.00877
-4	0.00974	0.00988	0.00989	0.00988	0.00974	0.00935	0.00878
-6	0.00971	0.00986	0.00986	0.00986	0.00971	0.00933	0.00877
-7	0.00968	0.00983	0.00983	0.00983	0.00968	0.00931	0.00876

-8	0.0096	0.00975	0.00975	0.00975	0.0096	0.00924	0.00871
-10	0.00943	0.00957	0.00957	0.00957	0.00943	0.0091	0.0086
-12	0.00925	0.00938	0.00938	0.00938	0.00925	0.00894	0.00848
-13	0.00915	0.00928	0.00928	0.00928	0.00915	0.00886	0.00841
-14	0.0091	0.00923	0.00923	0.00923	0.0091	0.00881	0.00837
-16	0.00898	0.0091	0.0091	0.0091	0.00898	0.0087	0.00828
-18	0.00883	0.00895	0.00895	0.00895	0.00883	0.00857	0.00817
-20	0.00867	0.00878	0.00878	0.00878	0.00867	0.00843	0.00805
-22	0.0085	0.0086	0.00861	0.0086	0.0085	0.00828	0.00792

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

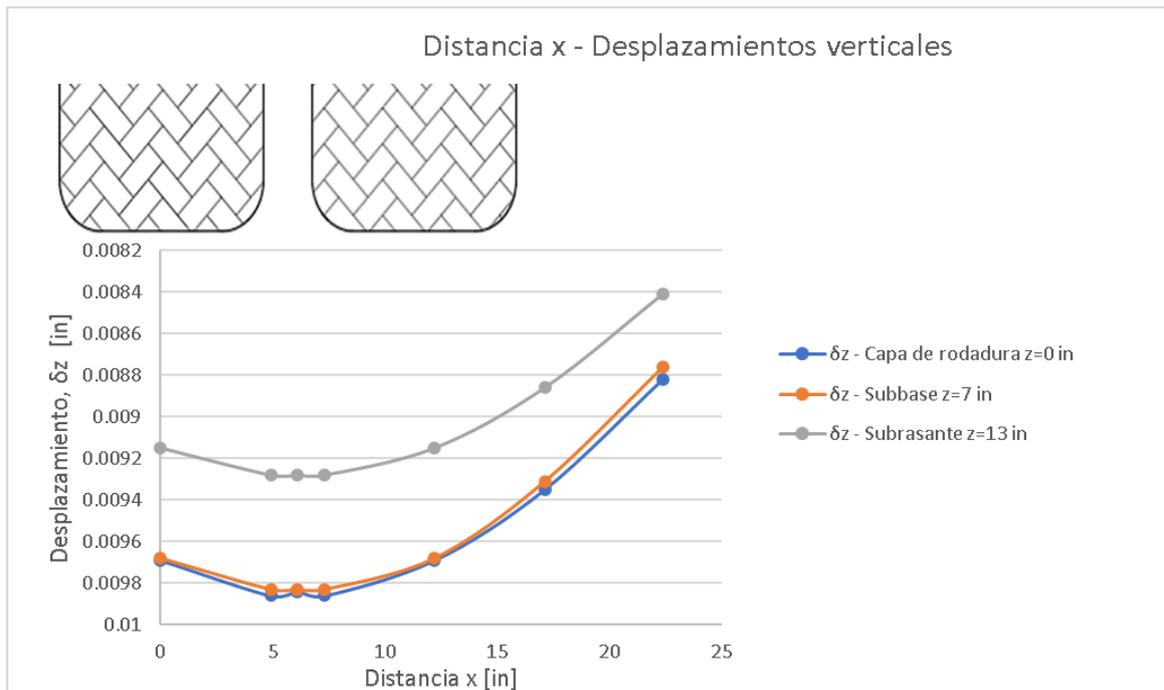


Figura 102. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido $e=7$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La capa de rodadura y la subbase tienen mayor desplazamiento al de la subrasante por la absorción de la mayoría de los esfuerzos por parte de la capa de hormigón. Ver Figura 102

Tabla 91

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
εz [in]							
0	1.95E-05	2.11E-05	2.13E-05	2.11E-05	1.95E-05	1.72E-05	1.39E-05
-2	3.63E-07	6.64E-06	9.59E-06	6.64E-06	3.63E-07	3.74E-06	6.02E-06
-4	1.06E-05	7.02E-06	6.30E-06	7.02E-06	1.06E-05	5.84E-06	1.95E-06
-6	2.14E-05	2.12E-05	2.10E-05	2.12E-05	2.14E-05	1.61E-05	1.00E-05
-7	2.96E-05	2.96E-05	2.94E-05	2.96E-05	2.96E-05	2.23E-05	1.40E-05
-8	8.37E-05	8.53E-05	8.52E-05	8.53E-05	8.37E-05	6.86E-05	5.00E-05
-10	8.65E-05	9.02E-05	9.02E-05	9.02E-05	8.65E-05	7.40E-05	5.76E-05
-12	9.54E-05	1.00E-04	1.01E-04	1.00E-04	9.54E-05	8.28E-05	6.59E-05
-13	1.03E-04	1.08E-04	1.08E-04	1.08E-04	1.03E-04	8.90E-05	7.05E-05
-14	5.44E-05	5.67E-05	5.67E-05	5.67E-05	5.44E-05	4.86E-05	4.07E-05
-16	6.79E-05	7.10E-05	7.11E-05	7.10E-05	6.79E-05	6.03E-05	4.98E-05
-18	7.66E-05	8.02E-05	8.03E-05	8.02E-05	7.66E-05	6.83E-05	5.69E-05
-20	8.20E-05	8.58E-05	8.59E-05	8.58E-05	8.20E-05	7.37E-05	6.21E-05
-22	8.54E-05	8.90E-05	8.91E-05	8.90E-05	8.54E-05	7.73E-05	6.59E-05

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

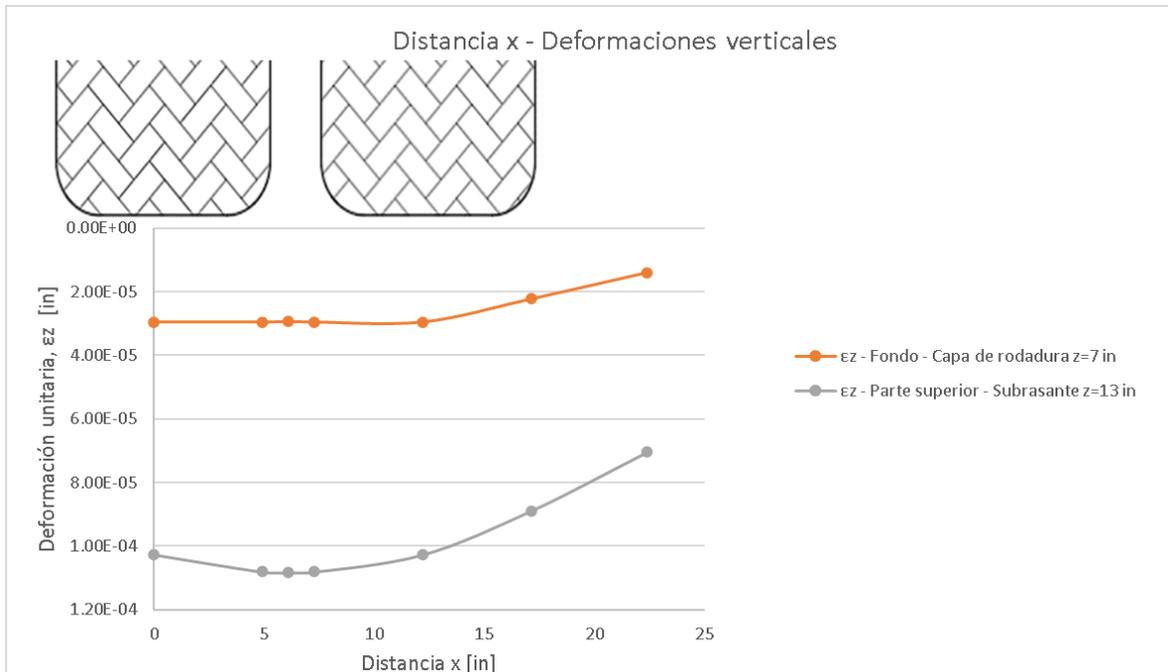


Figura 103. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e= 7 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 92*Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].*

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento rígido		
Línea de fondo - Capa de Rodadura		
Número de repeticiones permitidas =		6.85E+05
Deformación en tensión (-) =		-4.04E-05 in
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas =		3.31E+10
Deformación en compresión (+) =		4.68E-05 in
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño
1 (2 meses)	De rodadura	0.614%
1 (2 meses)	Subrasante	0.0000127%
2 (4 meses)	De rodadura	1.2280000%
2 (4 meses)	Subrasante	0.0000254%
3 (6 meses)	De rodadura	1.8430000%
3 (6 meses)	Subrasante	0.0000381%
4 (8 meses)	De rodadura	2.4570000%
4 (8 meses)	Subrasante	0.0000508%
5 (10 meses)	De rodadura	3.0710000%
5 (10 meses)	Subrasante	0.0000635%
6 (12 meses)	De rodadura	3.6850000%
6 (12 meses)	Subrasante	0.0000762%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 93*Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=7 [in].*

Resumen análisis de daño	
Línea de fondo - Capa de Rodadura	
Relación de daño=	12.900%
Parte superior - Subrasante	
Relación de daño=	0.000267%
Máxima relación de daño=	12.900%
Vida de diseño (años)=	7.75

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

- **Espesor de la capa de rodadura e= 9 [in].**

Tabla 94

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].

Esfuerzos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	σ_z [psi]						
0	60.57	60.57	0	60.57	60.57	0	0
-2	54.363	26.011	15.007	26.011	54.363	24.415	0.101
-4	36.242	19.441	16.605	19.441	36.242	16.207	0.198
-6	16.858	10.079	9.249	10.079	16.858	8.021	0.643
-8	3.786	2.821	2.708	2.821	3.786	2.304	0.98
-9	1.585	1.597	1.593	1.597	1.585	1.344	1.045
-10	1.472	1.498	1.496	1.498	1.472	1.28	1.033
-12	1.31	1.346	1.345	1.346	1.31	1.183	1.01
-14	1.224	1.261	1.261	1.261	1.224	1.13	0.996
-15	1.212	1.249	1.25	1.249	1.212	1.123	0.994
-16	1.209	1.247	1.247	1.247	1.209	1.121	0.994
-18	1.193	1.229	1.23	1.229	1.193	1.109	0.987
-20	1.167	1.202	1.202	1.202	1.167	1.09	0.976
-22	1.136	1.168	1.169	1.168	1.136	1.066	0.961

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

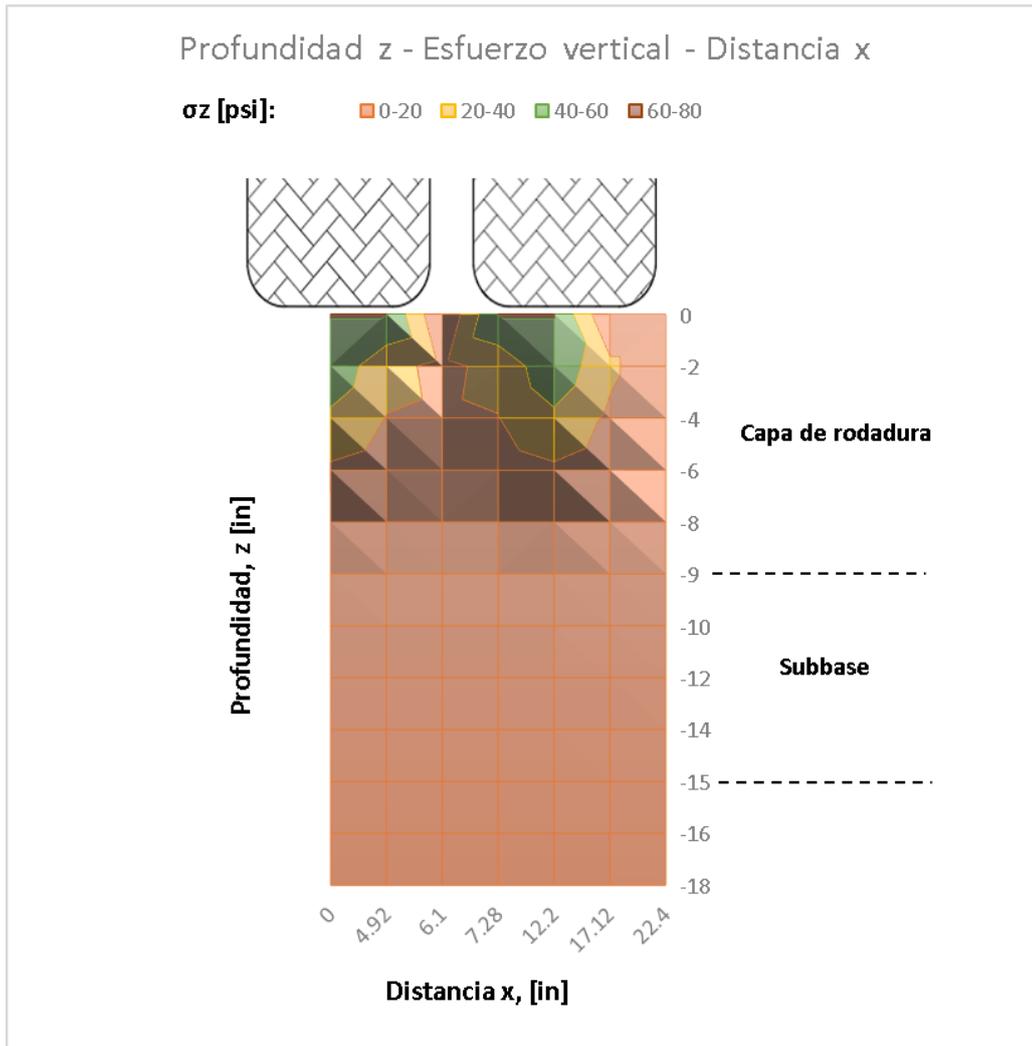


Figura 104. Distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento rígido $e=9$ [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Observando la Figura 104, existe un aumento en la disipación de esfuerzos, ya que el esfuerzo en el eje de la llanta ($x=0$ [in]) a nivel de la subbase ($z=-9$ [in]) alcanza el 2.61% de la carga que provoca la rueda, y a nivel de subrasante ($z=-15$ [in]) 2.00% de la misma.

Tabla 95

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido $e=9$ [in].

Desplazamientos verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	δz [in]						
0	0.0077	0.00776	0.00779	0.00776	0.0077	0.00747	0.00718
-2	0.00775	0.00782	0.00782	0.00782	0.00775	0.0075	0.00716
-4	0.00774	0.00782	0.00783	0.00782	0.00774	0.0075	0.00716
-6	0.00772	0.00781	0.00782	0.00781	0.00772	0.00749	0.00716

-8	0.00769	0.00778	0.00779	0.00778	0.00769	0.00747	0.00715
-9	0.00767	0.00776	0.00777	0.00776	0.00767	0.00746	0.00714
-10	0.00762	0.00771	0.00772	0.00771	0.00762	0.00741	0.0071
-12	0.00751	0.00759	0.0076	0.00759	0.00751	0.00732	0.00703
-14	0.00739	0.00747	0.00748	0.00747	0.00739	0.00721	0.00694
-15	0.00733	0.0074	0.00741	0.0074	0.00733	0.00716	0.0069
-16	0.00729	0.00737	0.00738	0.00737	0.00729	0.00713	0.00687
-18	0.00721	0.00729	0.0073	0.00729	0.00721	0.00706	0.00681
-20	0.00712	0.00719	0.0072	0.00719	0.00712	0.00697	0.00674
-22	0.00702	0.00709	0.0071	0.00709	0.00702	0.00688	0.00666

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

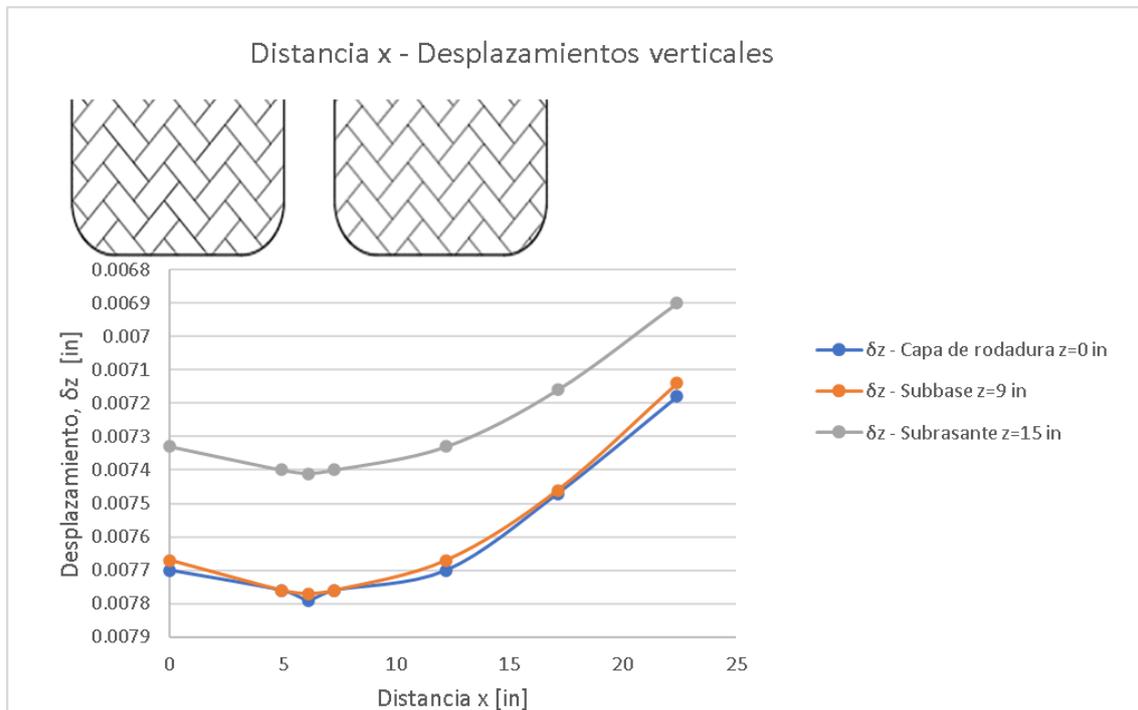


Figura 105. Desplazamientos verticales en la estructura del pavimento rígido e= 9 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 96

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].

Deformaciones unitarias verticales - Software Kenlayer - Pavimento rígido							
z [in]	x [in]						
	0	4.92	6.1	7.28	12.2	17.12	22.4
	εz [in]						
0	1.19E-05	1.36E-05	1.33E-05	1.36E-05	1.19E-05	1.16E-05	1.00E-05
-2	2.23E-06	4.95E-06	7.91E-06	4.95E-06	2.23E-06	2.76E-06	6.02E-06

-4	7.13E-06	2.40E-06	1.59E-06	2.40E-06	7.13E-06	2.28E-06	1.29E-06
-6	1.05E-05	8.78E-06	8.54E-06	8.78E-06	1.05E-05	6.95E-06	3.61E-06
-8	1.59E-05	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05	1.59E-05	1.26E-05	8.53E-06
-9	2.05E-05	2.09E-05	2.08E-05	2.09E-05	2.05E-05	1.62E-05	1.10E-05
-10	5.52E-05	5.67E-05	5.66E-05	5.67E-05	5.52E-05	4.67E-05	3.58E-05
-12	5.68E-05	5.91E-05	5.91E-05	5.91E-05	5.68E-05	4.98E-05	4.04E-05
-14	6.20E-05	6.48E-05	6.48E-05	6.48E-05	6.20E-05	5.50E-05	4.54E-05
-15	6.61E-05	6.92E-05	6.93E-05	6.92E-05	6.61E-05	5.86E-05	4.81E-05
-16	3.51E-05	3.63E-05	3.63E-05	3.63E-05	3.51E-05	3.21E-05	2.78E-05
-18	4.31E-05	4.48E-05	4.48E-05	4.48E-05	4.31E-05	3.91E-05	3.35E-05
-20	4.85E-05	5.04E-05	5.04E-05	5.04E-05	4.85E-05	4.41E-05	3.79E-05
-22	5.21E-05	5.41E-05	5.41E-05	5.41E-05	5.21E-05	4.77E-05	4.14E-05

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

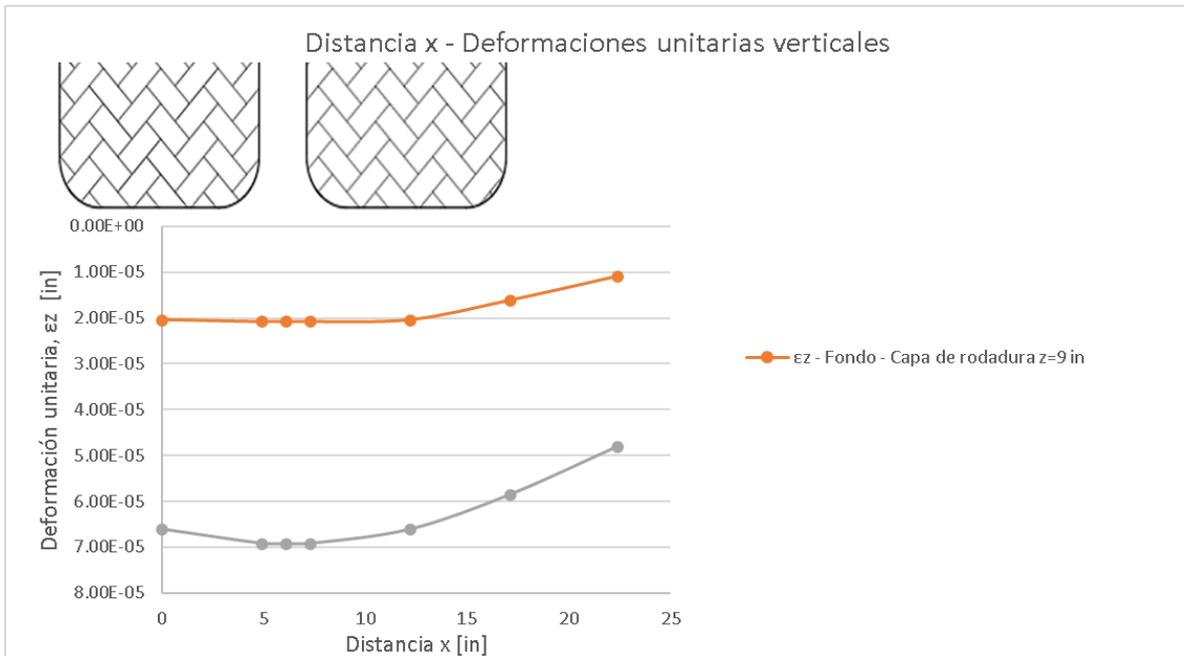


Figura 106. Deformaciones unitarias verticales en la estructura del pavimento rígido e=9 [in].

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 97

Análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].

Análisis de daño - Software Kenlayer - Pavimento rígido		
Línea de fondo - Capa de Rodadura		
Número de repeticiones permitidas =	2.38E+06	
Deformación en tensión (-) =	-2.77E-05 in	
Parte superior - Subrasante		
Número de repeticiones permitidas =	2.20E+11	
Deformación en compresión (+) =	3.07E-05 in	
Análisis de daño por periodo		
Periodo	Capa	Relación de daño

1 (2 meses)	De rodadura	0.177%
1 (2 meses)	Subrasante	0.00000191%
2 (4 meses)	De rodadura	0.354%
2 (4 meses)	Subrasante	0.00000383%
3 (6 meses)	De rodadura	0.531%
3 (6 meses)	Subrasante	0.00000574%
4 (8 meses)	De rodadura	0.708%
4 (8 meses)	Subrasante	0.00000765%
5 (10 meses)	De rodadura	0.884%
5 (10 meses)	Subrasante	0.00000956%
6 (12 meses)	De rodadura	1.061%
6 (12 meses)	Subrasante	0.00001148%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Tabla 98

Resumen de análisis de daño - Software Kenlayer – Pavimento rígido e=9 [in].

Resumen análisis de daño	
Línea de fondo - Capa de Rodadura	
Relación de daño=	3.714%
Parte superior - Subrasante	
Relación de daño=	0.0000402%
Máxima relación de daño=	3.714%
Vida de diseño (años)=	26.92

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

En la Tabla 98, se observa que la vida de diseño aumenta excesivamente. Esto no es económicamente rentable, por lo cual se descarta esta opción de espesor de la capa de rodadura.

4.5 Análisis del daño a lo largo de la vida útil de los pavimentos.

Tomando en cuenta la vida de diseño proporcionada por el software Kenlayer, se optó por elegir la mejor opción de cada pavimento con respecto al espesor de la capa de rodadura, para el pavimento flexible con un espesor de 5 pulgadas y para el pavimento rígido un espesor de 8 pulgadas, los cuales muestran una máxima relación de daño de 16.73% y 6.72% respectivamente (Ver Tabla 83, 88), cabe mencionar que la relación de daño expresa el porcentaje de daño a lo largo de un año vida de los pavimentos.

En la Tabla 99, se aprecia el daño que sufre la capa de rodadura a lo largo de los 10 años de diseño, sin cumplirlos. La vida útil estimada por el software es

aproximadamente 6 años (Ver Tabla 83), sin embargo, la vía debe tener un grado de serviciabilidad aceptable, por lo que 4 años de vida útil sería lo más conveniente, con un deterioro de la vía de 66.92%.

Tabla 99

Relación de daño a lo largo de la vida útil – Pavimento flexible e=5 [in].

Pavimento flexible	
No. Años	Relación de daño
0	0%
1	16.730%
2	33.460%
3	50.190%
4	66.920%
5	83.650%
6	100.380%
7	117.110%
8	133.840%
9	150.570%
10	167.300%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

El pavimento rígido cumple con la vida útil de diseño (Ver Tabla 100), obteniendo una relación de daño al final de los 10 años de 67.19%.

Tabla 100

Relación de daño a lo largo de la vida útil – Pavimento rígido e=8 [in].

Pavimento rígido	
No. Años	Relación de daño
0	0%
1	6.719%
2	13.438%
3	20.157%
4	26.876%
5	33.595%
6	40.314%
7	47.033%
8	53.752%
9	60.471%
10	67.190%

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

Se resumen en la Figura 107, el desempeño de los dos pavimentos, siendo el pavimento rígido el que posee una pendiente menos pronunciada, aseverando un mejor comportamiento que el pavimento flexible.



Figura 107. Relación de daño a lo largo de la vida útil de los pavimentos.

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

4.6 Análisis del costo de construcción y mantenimiento de los pavimentos.

De acuerdo con el presupuesto de mantenimiento de los dos tipos de pavimentos, se observa en la Tabla 101 el lapso que tiene cada uno, incluyendo el costo directo final en el que el pavimento rígido es más económico.

Tabla 101

Costo de mantenimiento rutinario y periódico – Pavimento flexible y rígido.

	Costo de mantenimiento rutinario y periódico			
	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
M. Rutinario	\$ 1,002.87	c/d 6 meses	\$ 25.51	c/d 6 meses
M. Periódico	\$ 91,093.03	c/d 2 años	\$ 4,577.58	c/d 3 años

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La Tabla 102 presenta el costo final de inversión en cada uno de los pavimentos, incluyendo el mantenimiento periódico, el cual para el pavimento flexible se lo realiza cada 2 años y para el pavimento rígido cada 3 años, estos valores se encuentran con caracteres de color rojo, y además el mantenimiento rutinario realizado cada 6 meses. Se observa que el pavimento flexible en su inversión de construcción inicial es 66.2% del costo del pavimento rígido, sin embargo, el costo de mantenimiento influye directamente en el costo capitalizado, en consecuencia, el pavimento rígido tiene un costo final del 59.3% del costo del pavimento flexible.

Tabla 102*Costo acumulado de construcción y mantenimiento – Pavimento flexible y rígido.*

Costo acumulado en periodo de vida (Construcción y mantenimiento)		
Periodo de vida [años]	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
0	\$ 232,936.59	\$ 351,894.18
0.5	\$ 233,939.45	\$ 351,919.69
1	\$ 234,942.32	\$ 351,945.20
1.5	\$ 235,945.19	\$ 351,970.70
2	\$ 328,041.09	\$ 351,996.21
2.5	\$ 329,043.96	\$ 352,021.72
3	\$ 330,046.82	\$ 356,624.82
3.5	\$ 331,049.69	\$ 356,650.32
4	\$ 423,145.59	\$ 356,675.83
4.5	\$ 424,148.46	\$ 356,701.34
5	\$ 425,151.33	\$ 356,726.85
5.5	\$ 426,154.20	\$ 356,752.36
6	\$ 518,250.10	\$ 361,355.45
6.5	\$ 519,252.96	\$ 361,380.96
7	\$ 520,255.83	\$ 361,406.47
7.5	\$ 521,258.70	\$ 361,431.98
8	\$ 613,354.60	\$ 361,457.49
8.5	\$ 614,357.47	\$ 361,483.00
9	\$ 615,360.34	\$ 366,086.09
9.5	\$ 616,363.20	\$ 366,111.60
10	\$ 617,366.07	\$ 366,137.11

Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

La Figura 108 representa el costo capitalizado de cada pavimento relacionado con el periodo de vida previamente establecido, es decir que el pavimento rígido obtiene una mayor rentabilidad cuando supera la mitad del tercer año de su periodo de vida, teniendo relación con la investigación realizada por (Vega, 2018).

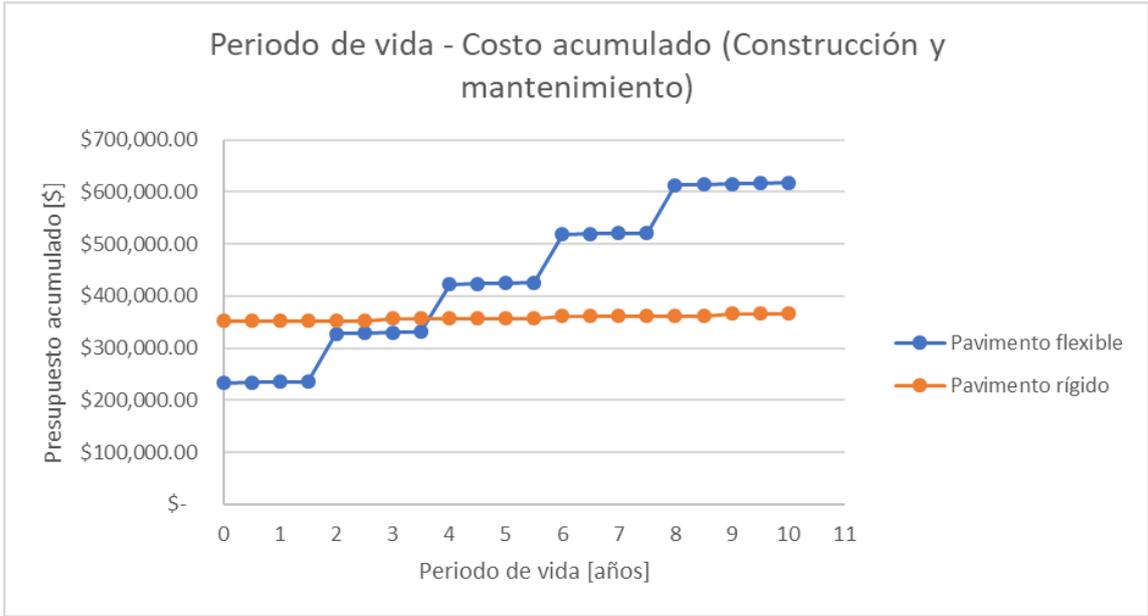


Figura 108. Costo capitalizado a lo largo de la vida útil de cada tipo de pavimento.
 Realizado por: Sebastián Cadena, Ana Galarza

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se evaluó las características y propiedades del suelo de una vía rural empedrada de la parroquia La Libertad, ubicada en el cantón Espejo provincia del Carchi, tanto en laboratorio como en campo, caracterizando al suelo como tipo CH según la clasificación SUCS con una humedad promedio de 45%, límite líquido de 60% y límite plástico de 22%. En cuanto a las propiedades, la capacidad portante del suelo sin empedrado (CBR) de 5.45% y la capacidad portante incluyendo el empedrado (CBR de campo) de 10.35%. Obteniendo como resultado un suelo de alta plasticidad, el mismo que mejora su resistencia cuando el empedrado se encuentra presente como parte de su estructura.
- El estudio del tráfico se determinó por dos metodologías, para el pavimento flexible la metodología de la AASHTO 93, dando como resultado el número de ejes equivalentes (ESAL) de $2.5218E+05$, el cual representa el número de repeticiones acumuladas de un eje tándem estándar de 8.2 toneladas. Para el pavimento rígido se aplicó la metodología de la PCA con un valor de $8.76E+04$, ésta asocia al número de repeticiones esperadas acumuladas con el peso y el tipo de cada eje vehicular. Para obtener resultados en iguales condiciones en la simulación del software, se optó por el número de repeticiones de $2.5218E+05$, ya que resulta más ventajoso utilizar el mismo eje y carga en la simulación computacional de los dos tipos de pavimento.
- Del capítulo de diseño de los pavimentos, se obtuvo un espesor de 4 pulgadas en la capa de rodadura y una subbase de 5 pulgadas para el pavimento flexible, éste se diseñó con metodología AASHTO 93, la cual se enfoca en conceptos de confiabilidad y serviciabilidad, así como en la variabilidad del tránsito y otros factores que afectan el desempeño del pavimento. Por otro lado, el pavimento rígido se diseñó con metodología PCA, basándose en análisis de fatiga y erosión, dando un resultado de 8 pulgadas en la capa de rodadura y 6 pulgadas en la subbase.

- Según los datos arrojados por el software Kenlayer para el pavimento flexible, se representa en los gráficos de esfuerzo, desplazamiento y deformación, que el pavimento con el espesor de diseño ($e= 4$ [in]), no tiene una debida capacidad de desempeño, caso contrario sucede con el espesor de 5 pulgadas, el cual mejora la capacidad de disipar los esfuerzos verticales alrededor del 23%, así como, disminuye deformaciones del fondo de la capa de rodadura en un 13%, que ocasionan patologías como es el ahuellamiento por fatiga, por otro lado el desplazamiento de la capa de rodadura en el eje de la rueda es 0.025 pulgadas, 0.07% menor al del espesor de diseño. De acuerdo con el análisis de daño del software esta opción de espesor del asfalto en frío tiene una vida útil de 5.98 años llegando al 100% de daño, lo que por razones de serviciabilidad no es admisible, por tanto, la vida útil que se adoptó es de 4 años llegando a un rango de daño de 66.92%.

Lo que ocasiona que la vida útil del espesor de diseño sea un valor bajo en los resultados de la simulación con el software, es que la estructura normal de un pavimento flexible está compuesta de tres capas: base, subbase y capa de rodadura, y en este estudio solo se implementaron 2 de ellas, por lo que sería recomendable aumentar 1 pulgada al espesor diseñado con metodología AASHTO 93.

- Para el pavimento rígido los datos proporcionados por el software Kenlayer, exponen que el espesor de diseño ($e= 8$ [in]), tiene la suficiente capacidad de disipar esfuerzos verticales, impidiendo que éstos lleguen a la subrasante en gran escala, esto se evidencia al tener apenas el 2.43% de la presión de contacto superficial, en dicha capa. En cuanto a las deformaciones del fondo de la capa de rodadura se obtuvo un valor máximo de $2.44E-05$ pulgadas y el desplazamiento de la capa de rodadura en el eje de la rueda es 0.0086 pulgadas, siendo relativamente muy bajos. Con respecto al análisis de daño que el software proporciona, esta opción de espesor tiene una vida útil de 14.88 años llegando al 67.19% de daño, por lo que se adoptó como el espesor óptimo para la capa de rodadura del pavimento de hormigón con fibras de acero tipo Dramix.
- Realizado el análisis económico de los dos tipos pavimento para 1 kilómetro de longitud de vía, el pavimento flexible (subbase de 5 pulgadas y carpeta

asfáltica de 5 pulgadas) es el más económico teniendo una inversión inicial de \$ 232,936.59, mientras que el pavimento rígido (subbase de 6 pulgadas y carpeta de rodadura rígida de 8 pulgadas) un valor inicial de \$ 351,894.18, el cual es 33.8% más costoso. Con relación al mantenimiento que necesitarán los dos tipos de pavimento en sus capas de rodadura, se tiene el mantenimiento rutinario con un costo para el pavimento flexible de \$ 1,002.87, que se recomienda realizarlo cada 6 meses, y para el pavimento rígido de \$ 25.51 en el mismo periodo de tiempo, en el caso del mantenimiento periódico, el pavimento flexible tiene un costo de \$91,093.03 que se lo sugiere realizar cada 2 años, para el pavimento rígido \$ 4,577.58 recomendado cada 3 años.

- Como conclusión, se afirma que el pavimento rígido de hormigón con fibras de acero tipo Dramix tiene un mejor rendimiento que el pavimento flexible bituminoso de asfalto colocado en frío, ya que distribuye de mejor manera los esfuerzos generados por el tráfico vehicular, impidiendo que la subrasante sufra deformaciones excesivas que provoquen patologías graves. Adicional a esto, el daño generado sobre la estructura del pavimento a lo largo de la vida útil es bajo comparándolo con el pavimento flexible, lo que hace que brinde una mayor serviciabilidad, además esto influye directamente en el mantenimiento que se debe realizar. Aunque el costo de construcción es superior al del pavimento flexible, se compensa con el costo muy bajo de su mantenimiento. Por estas razones se recomienda el uso de un pavimento rígido de hormigón reforzado con fibras de acero tipo Dramix sobre vías empedradas.

5.2 Recomendaciones

- Si se desea analizar y construir un pavimento flexible bituminoso en frío se recomienda aumentar 2 pulgadas al espesor diseñado con metodología AASHTO 93 de la capa de rodadura, o aumentar una capa de base, para así obtener mejores resultados en la serviciabilidad del mismo y disminuir costos de mantenimiento.

- Para realizar un conteo vehicular más preciso se recomienda usar contadores automáticos de tráfico, esto ayudará a tener una mejor eficiencia al momento de diseñar el espesor para un pavimento.
- Se recomienda obtener propiedades y características no lineales de los materiales que conforman la estructura del pavimento, y de esta manera poder realizar una simulación computacional más cercana a la realidad.
- Para futuras investigaciones se sugiere realizar modelos físicos que representen la estructura real del pavimento, para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO-93. (1993). *AASHTO Guide for: Desing of Paviement Structures*. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Offials.
- AJ McCormanck and Son. (20 de Enero de 2019). *Paving and Hard-landscape Consultants*. Obtenido de Pavement Layers Sub-bases: www.pavingexpert.com/subbase.htm
- American Concrete Institute Committee 544. (2002). *Report on Fiber Reinforced Concrete ACI 544.1R-96*. Michigan: American Concrete Institute.
- Armijos, J., Iza, L., & Quiñonez, C. (2012). *Estudio de tráfico en la vía Cumbayá-Pifo(L=15.00Km) y propuesta para su mejoramiento*. Quito : Universidad Central del Ecuador.
- Asociación técnica de emulsiones bituminosas. (2002). *Mezclas Abiertas en Frío*. Madrid: Asociación técnica de emulsiones bituminosas.
- ASTM D 4429 –04. (2012). *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place*. Pensilvania: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1602/C1602-12. (2012). *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. Pensilvania: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 7263. (2009). *Métodos de prueba estándar para Determinación de laboratorio de la Densidad (Peso de la unidad) de las muestras de suelo*. West Conshohocken: ASTM.
- Boada, G. (17 de Abril de 2020). *Técnicas de construcción y conservación vial con emulsiones asfálticas*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Botasso, G., González, R., & Rodríguez, P. (1 de Agosto de 2015). *Revista Vial*. Obtenido de <http://revistavial.com/sellado-de-pavimentos/>
- Botía, W. (2015). *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Burgos, B. (2014). *Análisis Comparativo entre un pavimento rígido y un pavimento flexible para la ruta S/R: Santa Elvira– El Arenal, En la Comuna de Valdivia*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

- Cabrera, A., & Urgiles, D. (2017). *Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Caiza, Á. (2011). *Análisis de la capa de rodadura de la vía Iligo –Tahuaicha– San Jorge del cantón Patate y su relación en la calidad de vida de los habitantes del sector*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Calle, H. (2014). *Costos de construcción y diseño de pavimentos rígidos y flexibles (Método AASHTO-93)*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés .
- Carter, T. (26 de Abril de 2003). Gravel base provides the key to a blacktop driveway's firm foundation. *Chicago Tribune*, pág. 2.
- CEMEX. (2015). *Estudios económicos de alternativas base cemento en firmas de carreteras y en infraestructura ferroviaria*. Madrid: Publicaciones CEMEX.
- Coduto, D. (2001). *Foundation design. Principles and practices. Second edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Consejo de Directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica . (2002). *Catálogo de deterioros de Pavimntnos Rígidos* . Santiago de Chile : Consejo con la corrdinación de la Dirección Nacional de Vialidad de la Republica de Chile.
- Consejo de directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica . (2002). *Catálogo de deterioros de pavimentos Flexibles* . Montreal: Consejo con la coordinación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México .
- Diario abc. (03 de Septiembre de 2015). *abc*. Obtenido de <https://www.abc.com.py/edicion-impres/a/economia/mopc-promete-que-taparan-todos-los-baches-de-ruta-ix-1404396.html#!>
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (5 de Enero de 2016). *Agua Potable / EPMAPS - AGUA QUITO*. Obtenido de <http://www.aguaquito.gob.ec/agua-potable-0>
- Escámez, A. (2018). *Sistema de pisos sin juntas condúctil VRS ¿Evolución o revolución?* Madrid: Monofloor.
- Facultad de Ciencias y Tecnología. (2004). *Texto Guía de Pavimentos*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Farinango, D. (2014). *Análisis comparativo de costos entre el pavimento rígido y pavimento flexible*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

- Fernández, E. (2009). *Diseño de espesores para pavimentos de hormigón en carreteras y calles método de la Portland Cement Association*. La Paz: Instituto boliviano del cemento y el hormigón.
- Fernandez, J. (200). *Pavimentos bituminosos en frío*. Barcelona: Editores Tecnicos asociados, S.A.
- Fernández, M. (2014). *Hormigones Reforzados con fibras de acero*. Madrid: Informes de la Construcción.
- García, R. (2015). *Diseño de Pavimento asfáltico por el Método AASHTO-93 empleando el software Disaashto-93*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- González, G., & Vanegas, E. (2016). *Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Grupo ACME. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquia "La Libertad (Alizo)"*. Cantón Espejo: Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural La Libertad.
- Herrera, P. (2014). *Estudio del pavimento de las vías del barrio Salacalle, perteneciente a la parroquia Saquisilí, cantón Saquisilí, provincia de Cotopaxi y su incidencia en la calidad de vida de los habitantes*. Ambato : Universidad Técnica de Ambato.
- Hofacker, A. (2008). *Rapid lean construction - quality rating model*. Manchester: s.n.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: Person Prentice Hall.
- Hurtado, R. (2016). *Análisis comparativo entre pavimento flexible y rígido para uso en ruta cantonal de El Guarco*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Finland: VTT Building Technology.
- Kumar, H. (2013). *Analysis of flexible pavement using Kenlayer*. Kurukshetra: National Institute of Technology Kurukshetra.
- Luna, G. (2014). *Estudio del hormigón, guía didáctica para el diseño de mezclas*. Quito: Edicumbre.
- Ministerio de Obras Públicas. (2002). *MOP-001-F*. Quito.

- Ministerio de transporte instituto Nacional de Vías. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Molina, J., & King, L. (2015). *Determinación de las características de tránsito enmarcadas en el tráfico promedio diario anual (TPDA), espectro de carga y ancho de vía, en las arterias viales E30 Manta-Portoviejo, E30 Rodeo-Portoviejo, que confluyen en la ciudad de Portoviejo*. Manabí: Universidad Técnica de Manabí.
- Morales, K., Orozco, E., & Campos, S. (2012). *Determinación de los Factores Equivalentes de Carga y Cálculo de los Ejes Equivalentes de Carga (Esal's) de la Carretera León –Poneloya*. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- MTOP Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial*. Quito: Subsecretaría de Infraestructura del Transporte.
- MTOP Esmeraldas. (2012). *Estudio de Ingeniería de la carretera Santo Domingo-Esmeraldas y la estructuración jurídica, técnica y Económico-Financiera. Re-20-EIS-MTOP-2012*. Quito: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- NTE INEN 860. (2011). *Áridos. 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.
- NTE-INEN-855. (2010). *Áridos. Determinación de impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón*. Quito.
- Packard, R. G. (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Illinois: Portland Cement Association.
- Perez, G., & Andagua, K. (2015). *Evaluación de las técnicas de diseño de pavimentos básicos para la conservación vial del tramo v de la carretera Acobamba – Puente Alcomachay en el departamento de Huancavelica*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Ramírez, F., & Samaniego, J. (2016). *Estudio comparativo de los efectos sobre la resistencia a la flexión del hormigón reforzado con fibras (HRF) usando macro fibras de acero Dramiz RC-6535-BN y de polipropileno/polietileno TUF-STRANDSF*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Ramos, B., & Muñiz, C. (2013). *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de graduación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles*. Managua: Universidad Centroamericana .
- Robles, R. (2018). *Diseño de un pavimento rígido para el segmento vial de la carrera 2 este entre la calle 41B sur y calle 42A sur del barrio La Victoria la localidad de San Cristóbal de la ciudad de Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Rogers, M. (2003). *Highway Engineering*. Dublin: Blackwell Publishing Ltd.
- Samad, E. (2011). *Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method*. Jakarta: Civil Engineering Forum .
- Sánchez, J., Mateos, I., Díaz, B., & Cobo, A. (2016). *Evolución del coeficiente de Poisson de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero* . Madrid: Escuela Técnica Superior de Edificación.
- Silva, L. (2014). *Comportamiento de hormigón reforzado con fibras de acero y su influencia en sus propiedades mecánicas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Solórzano, S., Salas, M., Sequeira, W., & Loria, L. (2015). *Guía para inspectores para bacheo formal con mezcla asfáltica en caliente*. San José: LanammeUCR.
- Suarez, J. (2010). *Deslizamientos: Técnicas de remediación*. Bucaramanga: Geotecnología S.A.S.
- T.A.M.S-ASTEC. (2003). *Normas de Diseño Geométrico de Carreteras*. Quito: Protecvia CIA. LTDA.
- U.S. Department of Transportation . (2006). *Geotechnical Aspects of Pavement Reference Manual. Chapter 3.0*. Washington D.C: National Highway Institute.
- U.S. Department of Transportation . (2015). *Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs* . Washington D.C.: Office of Asset Management, Pavements, and Construction .
- Universidad Nacional de Colombia . (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá: Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías .

- Universidad Nacional de Ingeniería de Lima. (2006). *Primer taller de mecánica de suelos*. Lima: Facultad de Ingeniería Civil.
- Vega, D. (2018). *Diseño de los pavimentos de la carretera de acceso al nuevo Puerto de Yurimaguas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Zambrano, W. (2016). *Diseño Estructural de Pavimentos*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Zúñiga, R. (2015). *Mezcla Asfáltica en caliente*. Santiago de Chile : Ministerio de Obras Públicas.