

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERO CIVIL

**DISEÑO ESTRUCTURAL DEL TRAMO 2 DE LA VÍA MULAUTE – LA
FLORIDA APLICANDO EL MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA
AASHTO 2008 Y AASHTO 93**

**AUTOR:
CARLOS EDUARDO PALACIOS CARVAJAL**

**TUTOR:
HUGO FLORENCIO TORRES MERINO**

Quito, Junio del 2017

CESION DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Carlos Eduardo Palacios Carvajal con documento de identificación 1718308545, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida aplicando el método empírico – mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Carlos Eduardo Palacios Carvajal
1718308545
Junio del 2017

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto de titulación, Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida aplicando el método empírico – mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93, realizado por Carlos Eduardo Palacios Carvajal, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Junio del 2017



.....
Hugo Florencio Torres Merino
C.I. 1714771977

DEDICATORIA

A Luis Lincoln Palacios, gracias por todo

AGRADECIMIENTO

A Paul Palacios por ser mi ejemplo a seguir, Cristina Jaramillo por ser mi hermana del alma. Y sobre todo a mi familia que estuvo conmigo incondicionalmente.

INDICE

1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación.....	5
1.4 La Pregunta de investigación?	5
1.5 Delimitación.....	5
1.6 Importancia	5
1.7 Propuesta de intervención y beneficiarios.....	6
1.8 Objetivos	6
1.8.1 Objetivo general	6
1.8.2 Objetivos específicos	6
1.9 Localización general del proyecto	6
1.10 Limites	9
1.11 Topografía.....	10
1.12 Estudio de tráfico	11
1.13 Marco metodológico	14
CAPITULO 2.....	18
2. MODELO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE	18
2.1 Fundamento teórico.....	18
2.2 Factores que intervienen en el método AASHTO 93.....	23
2.4 Transito	24
2.5 Factor equivalente de carga (LEF).....	25
2.6 Factor de distribución por dirección (Fd)	27
2.7 Factor de distribución por carril (Fc)	28
2.8 Factor de crecimiento (g)	29
2.9 Cálculo de ejes equivalentes	30
2.9.1 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes	30
2.9.2 Procedimiento general para el cálculo de ejes equivalentes	31
2.9.3 Proyección del tránsito al tiempo de diseño.....	32
2.9.4 Factores estadísticos.....	33

2.9.5	Confiabilidad.....	33
2.9.5.1	Diseño del factor de confiabilidad	34
2.9.6	Desviador normal estándar.....	38
2.9.7	Error normal combinado, S_o	39
2.9.8	Serviciabilidad.....	39
2.10	Desempeño del pavimento (Performance)	41
2.11	Factores de la subrasante.....	42
2.11.1	Materiales	42
2.11.2	CBR (Valor de Soporte California)	43
2.11.3	Módulo de resiliencia.....	43
2.11.4	Drenaje (mi)	47
2.11.5	Coefficiente estructural de capa (a_i)	48
2.12	Factores de la subbase	48
2.12.1	Materiales	48
2.12.2	Coefficiente estructural de subbase (a_3).....	49
2.13	Factores de la base	51
2.13.1	Materiales	51
2.13.2	Coefficiente estructural de base (a_2)	51
2.13.3	Coefficiente estructural de bases tratadas con cemento (a_2).....	54
2.13.4	Coefficiente estructural de bases tratadas con asfalto (a_2).....	55
2.14	Factores de la carpeta asfáltica.....	56
2.14.1	Materiales	56
2.14.2	Tipos de mezclas asfálticas	56
2.14.3	Módulo dinámico	57
2.14.4	Coefficiente estructural de carpetas asfálticas (a_1)	62
2.15	Factor clima.....	63
2.16	Diseño de espesores	67
2.17	Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida para pavimento flexible.....	70
CAPITULO 3		78
3. MODELO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE – MEPDG 2008		78
3.1	Fundamento teórico.....	78

3.2	Generalidades	79
3.3	Nivel jerárquico.....	82
3.4	Factores que intervienen en los datos de entrada	83
3.4.1	Transito	83
3.4.1.1	Características generales para el tránsito.	85
3.4.1.2	Configuración del Eje	85
3.4.1.3	Ancho promedio del eje	85
3.4.1.4	Espaciado para un eje doble rueda	86
3.4.1.5	Separación de ejes	86
3.4.1.6	Distancia entre eje delantero y eje trasero.....	86
3.4.1.7	Deriva del transito	87
3.4.1.8	Dimensiones del neumático y presión de inflado	87
3.4.1.9	Localización de puntos de análisis para el cálculo de deterioros.....	88
3.4.2	Materiales	90
3.4.2.1	Módulo Dinámico	91
3.4.2.2	Ligante Asfáltico	92
3.4.2.3	Envejecimiento del ligante asfáltico	93
3.4.2.4	Relación de Poisson	93
3.4.2.5	Módulo Resiliente de capas granulares.....	94
3.5	Modelo Estructural del Pavimento.....	96
3.5.1	Modelos de respuesta de Pavimentos Flexibles	96
3.5.2	Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles	97
3.5.2.1	Deformación unitaria tensional admisible en la base de la carpeta asfáltica 98	
3.5.2.2	Deformación vertical de compresión admisible.....	99
3.5.2.3	Deflexión vertical admisible en la superficie.....	100
3.5.3	Teoría de capas.....	103
3.5.3.1	La solución por capas.....	103
3.5.3.1.1	Dos Capas	103
3.5.3.1.2	Tres Capas	103
3.5.3.1.3	Multi Capas	104
3.5.3.1.4	Radio de carga.....	104

3.6	Clima.....	104
3.6.1	Temperatura	104
3.6.2	Humedad	106
3.6.3	Velocidad del viento	107
3.7	Modelos de desempeño en la estructura del pavimento por la MEPDG	110
3.7.1	Agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica.....	111
3.7.2	Ahuellamiento	112
3.7.3	Daño acumulado del Pavimento	113
3.8	APLICABILIDAD ENTRE EL METODO AASHTO 93 Y MEPDG 2008..	114
3.9	Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida.....	115
3.9.1	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores calculados en el método AASHTO 93.....	121
3.9.2	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores mínimos para la carpeta asfáltica recomendados en la guía AASHTO 93.	123
3.9.3	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores de espesores mínimos igualando al número estructural.....	124
3.9.4	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga.	126
3.9.5	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de ahuellamiento.....	127
3.9.6	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 1000 veh/día).....	129
3.9.7	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga (TPDA = 1000 veh/día).....	130
3.9.8	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 3000 veh/día).....	131
3.9.9	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga (TPDA = 3000 veh/día).....	133
	Del cuadro de resumen de respuestas obtenidas de la variación de los espesores para mejorar el porcentaje de consumo de fatiga se puede analizar con la relación entre las deformaciones calculadas y la variación de espesores, como se indica en la siguiente figura:	136
	CAPITULO 4	137
4.	CUADRO DE CANTIDADES DE OBRA.....	137

CAPITULO 5	140
5. CONCLUSIONES	140
CAPITULO 6	142
6. RECOMENDACIONES	142
7. LISTA DE REFERENCIAS	143
8. ANEXOS	144

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM – Inicio de vía.....	9
Tabla 2. Coordenadas UTM – Final de vía.....	9
Tabla 3. Coordenadas globales – Inicio de vía.....	9
Tabla 4. Coordenadas globales – Final de vía.....	9
Tabla 5. Tipos de vehículos que circulan por la vía.....	13
Tabla 6. Periodo de Análisis.....	23
Tabla 7. Carga del eje de referencia.....	27
Tabla 8. Factor de distribución por carril.....	28
Tabla 9. Proyección y Crecimiento vehicular, Anual.....	29
Tabla 10. Factor de crecimiento vehicular.....	29
Tabla 11. Porcentaje de cada tipo de vehículos.....	30
Tabla 12. Determinación de ESAL's – Método AASHTO 93.....	32
Tabla 13. Determinación de ESAL's – Método AASHTO simplificado.....	32
Tabla 14. Niveles de confiabilidad recomendados para diferentes tipos de carreteras.....	38
Tabla 15. Desviador normal estándar, Z_R	38
Tabla 16. Error normal combinado, S_o (Para pavimentos flexibles).....	39
Tabla 17. Valores mínimos para P_t , para pavimentos flexibles.....	40
Tabla 18. Calidad de drenaje.....	47
Tabla 19. Valores de m_i , recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares para pavimento flexible.....	48
Tabla 20. Valores típicos del módulo dinámico del material de subbase granular....	50
Tabla 21. Valores típicos de K_1 y K_2 para materiales de subbase granular.....	50
Tabla 22. Valores típicos del módulo dinámico del material de base granular.....	53
Tabla 23. Valores del estado de esfuerzos para materiales de base granular.....	53
Tabla 24. Valores típicos de K_1 y K_2 para materiales de base granular.....	54
Tabla 25. Criterios Marshall.....	57
Tabla 26. Espesores mínimos recomendados para diseño de espesores de capas.....	69
Tabla 27. Espesores teóricos para cumplir con el SN requerido.....	77
Tabla 28. Matriz de ejes de carga.....	84
Tabla 29. Resumen de localización de puntos críticos para análisis.....	89

Tabla 30. Caracterización del Módulo de Elasticidad de Materiales.....	90
Tabla 31. Valores típicos para Relación de Poisson	94
Tabla 32. Valores recomendados para Relación de Poisson.....	94
Tabla 33. Valores recomendados de Módulos Resilientes para clasificación de suelo	95
Tabla 34. Análisis de la deformación unitaria tensional admisible en la base de la carpeta asfáltica en función del tránsito, $\epsilon r adm_{10-4}$	99
Tabla 35. Análisis de la deformación vertical de compresión admisible sobre la subrasante en función del tránsito, $\epsilon z adm_{10-4}$	100
Tabla 36. Análisis de la deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible en función del tránsito, $\Delta z adm_{mm}$	101
Tabla 37. Coeficientes para determinar agrietamiento <i>EAC</i> en kPa.	111
Tabla 38. Coeficientes para determinar ahuellamiento.....	112
Tabla 39. Aplicabilidad entre el método AASHTO 93 y MEPDG 2008.....	114
Tabla 40. Características de los materiales granulares.....	120
Tabla 41. Volumen de tránsito para el periodo de análisis.	121
Tabla 42. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – primera evaluación.....	121
Tabla 43. Respuestas críticas de deformaciones – primera evaluación	122
Tabla 44. Respuestas de consumo de la primera evaluación estructural	122
Tabla 45. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – segunda evaluación	123
Tabla 46. Respuestas críticas de deformaciones – segunda evaluación.....	123
Tabla 47. Respuestas de consumo de la segunda evaluación estructural.....	124
Tabla 48. Espesores mínimos prácticos para cumplir con el SN requerido.....	124
Tabla 49. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – tercera evaluación.....	125
Tabla 50. Respuestas críticas de deformaciones – tercera evaluación.....	125
Tabla 51. Respuestas de consumo de la tercera evaluación estructural.....	126
Tabla 52. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – cuarta evaluación.....	126
Tabla 53. Respuestas críticas de deformaciones – cuarta evaluación.....	126
Tabla 54. Respuestas de consumo de la cuarta evaluación estructural	127
Tabla 55. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – quinta evaluación.....	127
Tabla 56. Respuestas críticas de deformaciones – quinta evaluación.....	128
Tabla 57. Respuestas de consumo de la quinta evaluación estructural.....	128
Tabla 58. Volumen de tránsito para el periodo de análisis, TPDA = 1000 veh/día. 129	

Tabla 59. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – sexta evaluación	129
Tabla 60. Respuestas críticas de deformaciones – sexta evaluación	129
Tabla 61. Respuestas de consumo de la sexta evaluación estructural.....	130
Tabla 62. Respuestas críticas de deformaciones – séptima evaluación	130
Tabla 63. Respuestas de consumo de la séptima evaluación estructural	131
Tabla 64. Volumen de tránsito para el periodo de análisis, TPDA = 3000 veh/día. 131	
Tabla 65. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – octava evaluación.....	132
Tabla 66. Respuestas críticas de deformaciones – octava evaluación	132
Tabla 67. Respuestas de consumo de la octava evaluación estructural	133
Tabla 68. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – novena evaluación	133
Tabla 69. Respuestas críticas de deformaciones – novena evaluación	133
Tabla 70. Respuestas de consumo de la novena evaluación estructural	134
Tabla 71. Resumen de cálculos y respuestas	135
Tabla 72. Cantidades de obra con TPDA de 300 veh/día	137
Tabla 73. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 300 veh/día	137
Tabla 74. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 300 veh/día	137
Tabla 75. Cantidades de obra con TPDA de 1000 veh/día	138
Tabla 76. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 1000 veh/día	138
Tabla 77. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 1000 veh/día	138
Tabla 78. Cantidades de obra con TPDA de 3000 veh/día	138
Tabla 79. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 3000 veh/día	138
Tabla 80. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 3000 veh/día	139

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Provincia de Santo Domingo de los Tsachilas	6
Figura 2. Ubicación del sitio del proyecto	7
Figura 3. Ubicación del punto de Inicio y Final de vía.....	8
Figura 4. Ubicación del Experimento Vial de la AASHO sobre la futura autopista interurbana I-80, de la red Interestatal de los Estados Unidos.....	19
Figura 5. Comportamiento de dos secciones con la serviciabilidad final	33
Figura 6. Factor de Confiabilidad	35
Figura 7. Variables que intervienen en el factor de Confiabilidad	36
Figura 8. Evaluación del factor de Confiabilidad en la curva de distribución normal	38
Figura 9. Estimación del coeficiente estructural para subbases granulares	49
Figura 10. Estimación del coeficiente estructural para bases granulares.....	52
Figura 11. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con cemento..	54
Figura 12. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con asfalto.....	55
Figura 13. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con asfalto.....	62
Figura 14. Diagrama del registro histórico de distribución normal de la precipitación de Santo Domingo de los Tsáchilas	64
Figura 15. Estimación de la pérdida de serviciabilidad debido al clima.....	66
Figura 16. Nomograma para determinar el número estructural necesario para el diseño de espesores de capas.....	68
Figura 17. Determinación de espesores de capas usando el enfoque de análisis de capas.....	69
Figura 18. Modelo de números estructurales según la capa analizada	75
Figura 19. Resultado de espesores teóricos para el diseño estructural de la vía – Método AASHTO 93	77
Figura 20. Diagrama de flujo de las tres etapas del proceso de diseño y análisis de la MEPDG.....	80
Figura 21. Valor promedio del ancho del eje.....	85
Figura 22. Espaciado para un eje doble rueda.....	86
Figura 23. Separación de ejes.....	86
Figura 24. Distancia entre ejes	87
Figura 25. Localización de puntos de análisis para un Eje Simple – Rueda doble....	88
Figura 26. Localización de puntos de análisis para un Eje Tandem	88

Figura 27. Localización de puntos de análisis para un Eje Tridem	89
Figura 28. Medio homogéneo sujeto a una carga circular de radio “a” y presión uniforme “q”.....	97
Figura 29. Características mecánicas de cada una de la capa estructural	97
Figura 30. Esfuerzo de compresión y tensión sometida a una carga de rueda vehicular. Modelo de Bussinesq	101
Figura 31. Mecanismo de funcionamiento de la estructura del pavimento.....	102
Figura 32. Diagrama del registro histórico de temperaturas medias de Santo Domingo de los Tsáchilas	106
Figura 33. Diagrama del registro histórico de Humedades media de Santo Domingo de los Tsáchilas	107
Figura 34. Diagrama del registro histórico de la velocidad del viento de Santo Domingo de los Tsáchilas	109
Figura 35. Página de inicio del software “Weslea”.....	116
Figura 36. Selecccion de unidades	116
Figura 37. Ingreso de información estructural	116
Figura 38. Relleno de información estructural.....	117
Figura 39. Ingreso de información de carga por eje.....	117
Figura 40. Selección de las características del tipo de eje	118
Figura 41. Ingreso de información de los puntos para análisis	118
Figura 42. Posición de puntos críticos de acuerdo a la profundidad de análisis.....	118
Figura 43. Obtención de resultados.....	119
Figura 44. Análisis de resultados	119
Figura 45. Relación entre espesores de carpeta asfáltica y deformaciones calculadas	136
Figura 46. Relación entre espesores de carpeta asfáltica y porcentaje de consumo para fatiga.....	136
Figura 47. Análisis comparativo de costos	139

RESUMEN

El presente proyecto técnico de titulación para la obtención del título de pregrado de Ingeniería Civil tiene importancia en la parte de investigación del actual método de diseño de pavimentos flexibles “Guía de diseño de pavimentos empírico – mecanicista AASHTO 2008” y que aún no se lo considera en los manuales de diseño de las instituciones públicas y privadas.

Comparando con la antigua Guía de diseño de pavimentos AASHTO 93 desde el punto de vista de esfuerzos, deformaciones en el desempeño estructural que comprende cada capa en la estructura del pavimento y sobre todo desde el punto de vista económico.

Tomando en cuenta las características de las variables de cada método que influye en el tráfico como es el factor equivalente de carga y el espectro de carga, en el clima la precipitación, temperatura del aire, humedad, velocidad del viento y en los materiales conocer sus características estructurales y mecánicas.

Realizando una comparación de espesores para evaluar y analizar las respuestas del comportamiento bajo criterios establecidos por las normas que nos rigen.

PALABRAS CLAVES

PROYECTO, INGENIERIA, INVESTIGACION, METODO, DISEÑO, PAVIMENTO, EMPIRICO, MECANICISTA, AASHTO 2008, INSTITUCION, PUBLICA, PRIVADA, AASHTO 93, ESFUERZO, DEFORMACION, DESEMPEÑO, ESTRUCTURA, TRAFICO, FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA, ESPECTRO DE CARGA, CLIMA, PRECIPITACION, TEMPERATURA DEL AIRE, HUMEDAD, VELOCIDAD DEL VIENTO, MATERIALES, ESPESORES, EVALUAR, ANALIZAR, RESPUESTAS, CRITERIOS, NORMAS.

ABSTRACT

This project main to obtain the degree of Civil Engineering has importance in the research part of the present method of design of flexible pavements “Guide mechanistic – empirical pavement design AASHTO 2008” and that still it is not considered in the manuals of public and private institutions.

Comparing with “Guide pavement design AASHTO 93” from the point of view of stresses, deformations in the structural performance that comprises each layer in the structure of the pavement and economic point of view.

Taking into account the characteristics of the variables of each method that influences the traffic as it is that load equivalency factors and spectrum of load, in the climate precipitation, temperature, moisture, wind speed, and the materials to know their structural and mechanical characteristics.

Making a comparison to evaluate and analyze behavioral responses according to criteria established by the rules that govern us.

Keywords: PROJECT, ENGINEERING, INVESTIGATION, METHOD, DESIGN, PAVEMENT, EMPIRICAL, MECHANISTIC, ASSHTO 2008, INSTITUTION, PUBLIC, PRIVATE, AASHTO 93, STREESS, DEFORMATION, PERFORMANCE, STRUCTURE, TRAFICC, LOAD EQUIVALENCY FACTOR, SPECTRUM OF LOAD, CLIMATE, PRECIPITATION, TEMPERATURE, MOISTURE, WIND SPEED, MATERIALS, THICKNESS, EVALUATE, ANALYZE, ANSWERS, CRITERIA, STANDARS.

CAPITULO 1

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La AASHTO revisó en los años 72, 86 y 93 sus Guías de Diseño para pavimentos flexibles (tal como se verá en los próximos Capítulos), y aun cuando para 1993 ya se disponía de una versión calificada como “racional”, todavía se fundamentaba el procedimiento en un alto grado en valores experimentales. Por esta razón la AASHTO se dedicó a desarrollar un “Método Mecanicista”, en el que se pueda diseñar en base a los principios fundamentales de esfuerzos y deformaciones.

El enfoque Empírico – Mecanicista empieza a ser descrito en el último capítulo de la Guía de Diseño AASHTO 93 y como resultado de este enfoque para el año 2002, en el que la AASHTO propone el nuevo método de diseño que denomina: MEPDG (Guía de Diseño Empírico Mecanicista de Pavimentos). Este método ya para el 2008 se encuentra en su etapa final.

Los efectos climáticos y la carga de tráfico son las dos fuerzas más destructivas de los pavimentos, como por ejemplo los cambios de temperatura causan fisuras térmicas sobre los pavimentos y envejecen la carpeta asfáltica y sobre todo son los más difíciles de cuantificar de manera empírica.

El factor climático más perjudicial para un pavimento es la precipitación. Este puede llegar a desgastar capas como la base y sub-base hasta tener contacto con la subrasante y generar disminución de soporte, deformaciones permanentes y el deterioro del asfalto en forma de fisuras (agrietamiento).

Así como la precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, junto con las características del material de pavimento, tales como la susceptibilidad a la

humedad y los daños por aumento de niveles freáticos, drenaje, infiltración, tienen un impacto importante sobre los resultados a largo plazo del pavimento.

La repetición de las cargas del tránsito causan deterioros; estas cargas aumentan, tanto en magnitud como en número de repeticiones, y cuando estas repeticiones de carga aplicadas directamente en la carpeta asfáltica y que generan un nivel de esfuerzo o deformación por debajo de su resistencia última de dicho material se lo conoce como fatiga o (agrietamiento) y la acumulación de deformaciones permanentes en las zonas donde más circulan las cargas del tránsito produciendo una disminución del volumen de las capas inferiores y que llega a producir el ahuellamiento.

El tránsito al pasar una y otra vez sobre una carpeta asfáltica como un efecto repetitivo depende de dos condiciones: primero de la intensidad de la acción reiterada, y segundo de la magnitud de la deformación inducida en cada aplicación de la carga; también influye las características mecánicas de cada capa de la estructura del pavimento que soporta las repeticiones de carga vehicular.

Como se conoce, ambos factores han crecido mucho en la red vial del Ecuador. El efecto de la deformación permanente resulta de la deformación que el pavimento sufre bajo un eje del vehículo que pasa (carga). Dicha deformación se recupera parcialmente cuando la rueda deja de oprimir, pero tal recuperación nunca es total; siempre queda un remanente, que conduce a una deformación permanente, la cual afecta el paso de los vehículos, aumentando su costo operativo y, eventualmente, conlleva al agrietamiento y a la ruptura de la carpeta asfáltica. Al agrietarse la carpeta el agua penetra en el interior del modelo estructural, formada generalmente por materiales pétreos que, de ser susceptibles, disminuirán su resistencia, creándose un daño general de la mencionada sección estructural.

Se debe tener en cuenta que en la estructura de un pavimento flexible, la carpeta asfáltica es la más rígida en relación a las demás capas. De tal manera que para proteger la carpeta asfáltica del agrietamiento producido por el efecto reiterado del tránsito es hacerla con un espesor mayor tal que el esfuerzo aplicado resulte muy pequeño en comparación con la resistencia de la capa; es decir, construirla por encima del umbral de fatiga, aun sabiendo que esto llevaría a la construcción inicial de carpetas de gran espesor. Ahora la falla por fatiga en la carpeta puede combatirse de dos maneras. Primero dando a la carpeta un espesor tal que el esfuerzo aplicado por el tránsito le permita aceptar todas las repeticiones con deformaciones tan pequeñas que no produzcan posibilidades de agrietamiento o de deformación permanente y, segundo, apoyando esa carpeta en otras capas suficientemente resistentes y poco deformables como para lograr el mismo efecto. Estos espesores de las capas de apoyo serán evaluados de tal manera que cumplan con los niveles de porcentaje de consumo tanto para la fatiga, como para la deformación permanente.

1.2 Planteamiento del problema

El Ecuador en los últimos diez años ha tenido un mayor incremento en la construcción de la red vial; lo cual es un pilar importante para el fomento de la productividad y el desarrollo económico, gracias a esto se requiere que la red vial tenga una serviciabilidad adecuada para el tránsito regular de los vehículos. Sobre todo en la Costa y específicamente en la provincia de Santo Domingo de los Tsachilas.

Es común que en los últimos años se hayan evidenciado deficiencias en materia de diseño y rehabilitación de las estructuras de pavimentos, puesto que no se han tenido a la mano los conocimientos necesarios, recursos y métodos de diseño capaces de

garantizar el cumplimiento de la vida útil para la cual se diseñan las estructuras de los pavimentos.

El ingeniero diseñador debe presentar su modelo estructural de la manera más fiel en el campo usando la guía de diseño AASHTO 93 para pavimentos flexibles, debido a que es un método empírico muy utilizado para el diseño gracias a que permite la consideración de muchas de las variables que intervienen en la interacción del pavimento con la carga producida por tránsito vehicular.

Ahora que empezamos a tener a la mano la Guía de Diseño Empírico Mecanicista de Pavimentos (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide – MEPDG), y que actualmente es la herramienta más completa que existe para el análisis y diseño de pavimentos. La MEPDG es el resultado de varios años de investigación en los Estados Unidos. Y ahora se pretende considerar el uso frecuente para el diseño en las carreteras del País.

La calidad de los materiales, características del tráfico, condiciones ambientales, tipos y niveles de deterioro de la carpeta asfáltica por regiones en el Ecuador (Sierra, Costa, Amazonía en estudio) son distintas, lo que ocasiona que un solo modelo de diseño para todas las regiones no sea suficiente para representar de la manera más real lo que sucederá con la estructura del pavimento, necesitándose un análisis complementario.

Para lograr este propósito el ingeniero diseñador debe tener conocimientos suficientes de este nuevo procedimiento de diseño, pero también es necesario que haya una capacitación práctica y teórica. Aun sabiendo que las condiciones para aplicar estos procedimientos son diferentes de acuerdo a los estudios generales tanto en tráfico, materiales y sobre todo en el clima.

1.3 Justificación

Este proyecto técnico de titulación inicia bajo el punto de vista investigativo universitario, para comprender de cierta manera el comportamiento empírico mecanicista de las estructuras de pavimentos flexibles y de esta manera ayudar con el conocimiento que exige el entorno profesional de nuestro país.

Para esto es muy necesario entender y manejar la guía de diseño AASHTO 93; de qué manera los factores que influyen en el método de análisis y diseño son tomados en cuenta para la nueva adaptación de la Guía de diseño empírico mecanicista MEPDG AASHTO 2008 y que fundamentalmente está resuelto para ayudarnos a predecir el desempeño de todas y cada una de las capas que conforman la estructura de un pavimento flexible.

Se acentúa el hecho de que se enfocara a las estructuras flexibles y faltara mucho más investigación con respecto a las estructuras rígidas y su comportamiento o desempeño ya que estas estructuras se utilizan en diversos proyectos nuevos.

1.4 La Pregunta de investigación?

¿Cuál de las dos alternativas es más óptima desde el punto de vista técnico – económico?

1.5 Delimitación

Este proyecto técnico de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil en la Universidad Politécnica Salesiana, fomenta la investigación, con el objetivo que la Unidad de Titulación sea la encargada de disponer la ejecución del proyecto.

1.6 Importancia

La razón fundamental de la realización de este proyecto técnico de titulación es dar a conocer otras posibilidades de diseño de una manera práctica y coherente para impulsar al progreso científico de nuestro medio.

1.7 Propuesta de intervención y beneficiarios

Consultores, Ingenieros diseñadores y personas relacionadas con el diseño estructural vial de pavimento flexible.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

- Definir la aplicabilidad entre el método empírico mecanicista AASHTO 2008 y método AASHTO 93 para pavimento flexible.

1.8.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis comparativo de costos entre el método de diseño empírico mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93
- Realizar un análisis de las variables involucradas en ambos métodos.
- Presentar una metodología de diseño alineada al método empírico mecanicista AASHTO 2008

1.9 Localización general del proyecto

Se encuentra ubicado en la provincia de Santo Domingo de los Tsachilas, al centro noreste del Ecuador.



Figura 1. Provincia de Santo Domingo de los Tsachilas

FUENTE: www.mapasecuador.net/mapa/mapa-santo-dom-de-los-tsachilas-mapa-ubicacion-territorial.html

Tiene una población aproximada de 450 000 habitantes, (censo realizado hasta el año 2010), se encuentra a una altura media de 665 msnm y la temperatura promedio es de 23° C. Y es una ciudad próspera y con mayor crecimiento poblacional del país.

El sitio de aplicación se encuentra en el centro norte de la ciudad de Santo Domingo, a 2 Km. de la vía E20 (Transversal norte) de la red vial; Cercano a la Finca *LA ESTANCIA*.

Mapa de Santo Domingo de los Tsachilas

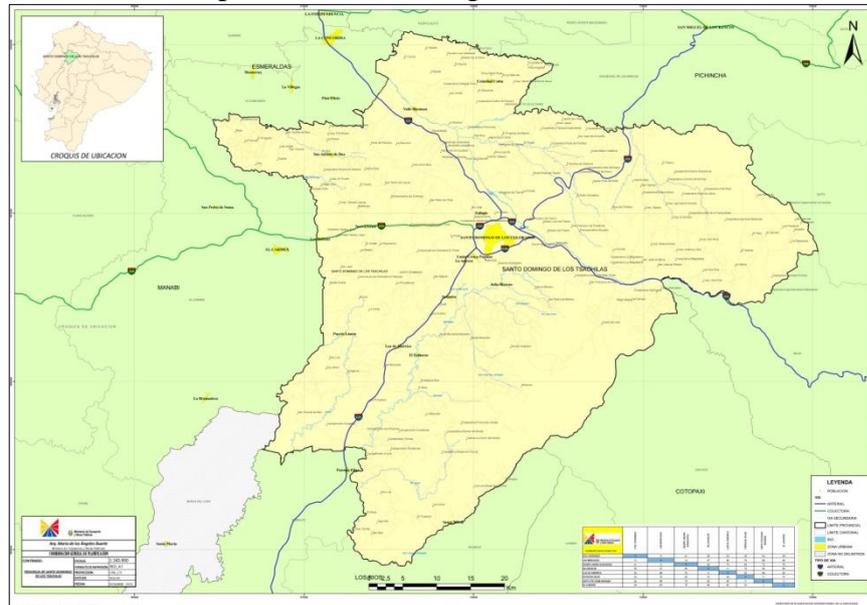


Figura 2. Ubicación del sitio del proyecto

FUENTE: www.zonu.com/fullsize1/2011-11-10-14886/Mapa-de-Santo-Domingo-de-los-Tsachilas-2010.html

TOPOGRAFIA DE LA VIA MULAUTE – LA FLORIDA (Escala 1:1000)

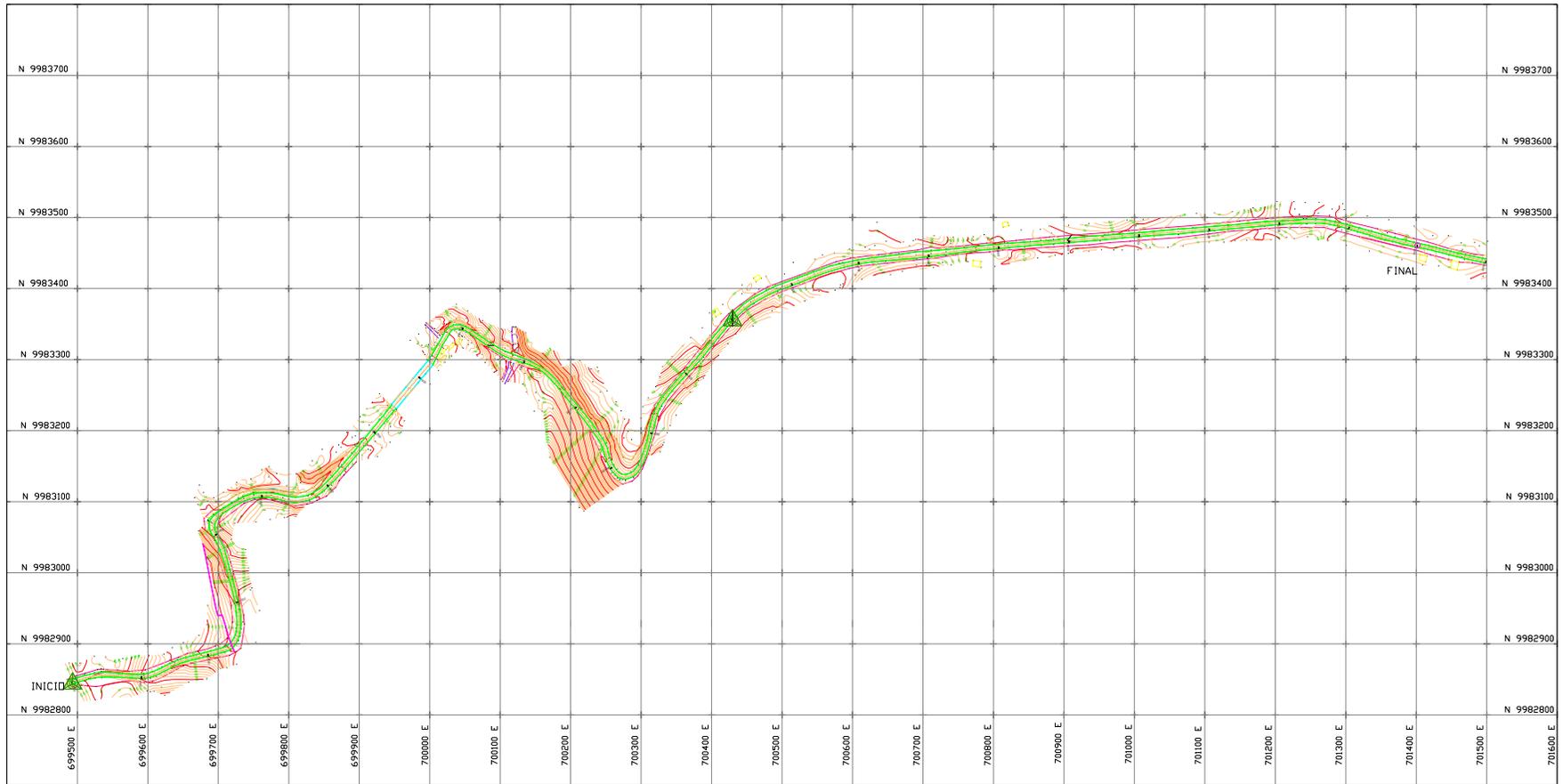


Figura 3. Ubicación del punto de Inicio y Final de vía.
FUENTE: Unidad de Titulación

La vía contara con una longitud de 2500 metros y una sección transversal de 10.20 metros (5.10 para cada sentido), un bajo volumen de tránsito vehicular y el acceso se lo puede realizar con el Sistema Nacional de Transporte público, directamente hasta el punto de aplicación del proyecto, con un tiempo aproximado de 15 min desde el centro de la ciudad de Santo Domingo. Esta vía objetivamente tiene una aplicación de diseño estructural para pavimento flexible por dos métodos y poder realizar la comparación técnica – económica.

Con las siguientes coordenadas UTM:

Tabla 1. Coordenadas UTM – Inicio de vía

NORTE	ESTE
9982844.04	699493.20

Tabla 2. Coordenadas UTM – Final de vía

NORTE	ESTE
9983460.05	701401.42

Y las siguientes coordenadas Globales:

Tabla 3. Coordenadas globales – Inicio de vía

LATITUD	LONGITUD
0° 9' 18.08" S	79° 12' 26.79" O

Tabla 4. Coordenadas globales – Final de vía

LATITUD	LONGITUD
0° 8' 58.44" S	79° 11' 25.28" O

1.10 Limites

Al Norte: Provincia de Esmeraldas y los cantones Puerto Quito y San miguel de los bancos

Al Sur: Las provincias de los Ríos y Cotopaxi

Al Este: Los Cantones de Quito y Mejía

Al Oeste: La provincia de Manabí

1.11 Topografía

Como una información brindada por la Unidad de Titulación para proyectos de investigación de la carrera de Ingeniería Civil, se presenta una breve descripción sobre la carta topográfica:

El terreno es ondulado, presenta en forma general con plano descendente al inicio, hasta la llegada al puente del cual empieza un ascenso hasta llegar al Km 3.5; el último tramo es plano.

De acuerdo a los datos tomados y representados en el plano topográfico un detalle de la pendiente longitudinal del trazado de la vía.

A continuación se detalla la topografía del terreno del trazado vial:

Absc. 2+000 al 2+160	Trazado descendente con pendiente de 11.3%
Absc. 2+160 al 2+380	Trazado descendente con pendiente de 9.7%
Absc. 2+380 al 2+420	Trazado descendente con pendiente de 2.4%
Absc. 2+420 al 2+460	Trazado ascendente con pendiente de 1.63%
Absc 2+460 al 2+540	Trazado descendente con pendiente de 4.60%
Absc 2+540 al 2+600	Trazado descendente con pendiente de 9.5%
Absc 2+600 al 2+640	Trazado descendente con pendiente de 3.69%
Absc 2+640 al 2+740	Trazado descendente con pendiente de 0.12%
Absc 2+740 al 2+780	Trazado ascendente con pendiente de 2.65%
Absc 2+780 al 2+940	Trazado ascendente con pendiente de 13.54%
Absc 2+940 al 3+080	Trazado ascendente con pendiente de 12.42%
Absc 3+080 al 3+420	Trazado ascendente con pendiente de 7.58%
Absc 3+420 al 3+640	Trazado ascendente con pendiente de 0.25%
Absc 3+640 al 4+500	Trazado ascendente con pendiente de 1.17%

Pendiente Transversal: Los principales elementos de la sección transversal que condicionan esos patrones son: el ancho y el número de carriles de circulación; el ancho y características de las bermas; las pendientes transversales de las calzadas; el ancho y características de los canchales centrales; los taludes de cortes y terraplenes; el sobre ancho de la calzada en las curvas horizontales, los gálibos horizontales y la visibilidad en las curvas horizontales; las defensas necesarias para impedir o reducir los efectos de los accidentes causados por vehículos descontrolados; los dispositivos para el drenaje superficial.

Puntos de control: Los levantamientos efectuados para el presente proyecto determina el relieve de la tierra, e identifica sus accidentes topográficos naturales y artificiales.

Los trabajos concernientes al trabajo topográfico también incluye la colocación de puntos de control, empleando BMs situados dentro y cerca del área en la cual se va a trabajar. Para ello se tiende una red de control vertical mediante líneas de nivelación que parten de BMs y cierran en BMs. Dependiendo de los requisitos de precisión, los levantamientos de control vertical pueden ser: de nivelación diferencial, trigonométricos, barométricos o con GPS. El método más preciso y ampliamente usado es la nivelación diferencial de precisión. Todas las estaciones y BMs se ubican en puntos favorables para su empleo futuro. Normalmente están marcados en discos de bronce de 9cm de diámetro, fijos en concreto o en roca firme.

Para el presente proyecto se establece dos puntos de control ubicados en el km 2 y otro en el km 4.5.

1.12 Estudio de tráfico

El tráfico es el resultado del flujo o circulación de vehículos en una vía o autopista. Para realizar el diseño es muy importante el conteo vehicular que circula por la vía.

La información del tráfico se basa en la caracterización del tráfico actual (cantidad y tipos de vehículos), para así formar proyecciones para un periodo de análisis.

Los flujos vehiculares se dividen en 2 tipos: Continuos que poseen la característica de que la velocidad de circulación es constante (para vías rurales) y Discontinuos que la velocidad no es constante (para vías urbanas).

La cantidad de vehículos o volumen de tráfico de una vía está determinado por el número y tipo de vehículos que pasan por un punto dado durante un tiempo establecido. Si la unidad de tiempo en el tramo es la hora, se define el volumen como Tráfico Horario; Si la unidad de tiempo en el tramo es el día, se define el volumen como Tráfico Diario; Si la unidad de tiempo en el tramo es el año, se define el volumen como Tráfico Anual; Por lo tanto, Tráfico promedio diario (TPD) sirve para justificar el diseño, clasificar la categoría de camino y hacer estudios para una justificación técnico – económica. El Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) se establece mediante el método de conteo y es el resultado del conteo de vehículos durante 24 horas al día durante los 365 días del año.

Para la determinación de volúmenes de tráfico existen varios métodos como son: Aforos o conteos cortos que realiza registros en el periodo donde se tiene entendido que hay mayor flujo de vehículos; aforos o conteos largos que realiza registros vehiculares entre 12 y 16 horas al día y en periodos que oscilan entre 3 y 10 días y aforos o conteos continuos que realiza registros vehiculares en periodos muy largos, en general las 24 horas durante los 365 días del año¹.

Para realizar los aforos, se utilizan instrumentos manuales e instrumentos muy sofisticados. Los más usados son: Manuales que son formularios de campo diseñados para que el registro visual de un operador haga el conteo; Instrumentales que son

¹ (Torres Hugo; “Apuntes de Vías y Pavimentos, Capitulo: Estudio de Tráfico – TPDA” Universidad Politécnica Salesiana – Sede Sur).

equipos mecánicos, electromecánicos, electrónicos, de radar satelital y guardan la información de registro en una base de datos.

La variación del volumen de tráfico se controla mediante: Variaciones horarias de acuerdo a la hora del día, es decir existen horas pico de alto tráfico, horas de medio tráfico y horas de poco tráfico; variaciones diarias de acuerdo al día durante la semana y variaciones estacionales de acuerdo a la estación del año.

El tráfico generado y proyecciones cuando se produce por las mejoras del proyecto y pueden ser diferente magnitud: Generado por el proyecto cuando una mejor superficie de rodadura o geometría más plana y recta, puede lograr la atracción de volúmenes adicionales de tráfico; Trafico atraído son aquellos volúmenes de tráfico adicionales que normalmente circulaban por otro punto y que ahora se conectan al nuevo proyecto; Generación de tráfico que se establecen por la producción industrial o por las facilidades que ofrece la carretera al desarrollo ganadero, agrícola e industrial; Tráfico generado desviado generalmente se aplican estos conceptos a volúmenes vehiculares que circulan por otros tramos de carreteras y que ahora son desviados hacia el nuevo proyecto².

La información necesaria fue entregada por parte de la Unidad de Titulación, y cuenta con un TPDA de 300 veh/día. A la vez se cuenta con un resumen del tipo de vehículos que circulan por la vía:

Tabla 5. Tipos de vehículos que circulan por la vía

25%	Vehículos livianos
25%	3A
25%	2DB
25%	T3-S3

FUENTE: Unidad de Titulación

² (Torres Hugo; “Apuntes de Vías y Pavimentos, Capitulo: Estudio de Trafico – TPDA” Universidad Politécnica Salesiana – Sede Sur)

Este tráfico debe considerarse para un periodo de análisis, y este valor radica en la importancia de la obra y la magnitud de tiempo que debe cubrir en función a su servicio.

1.13 Marco metodológico

Para el presente proyecto se cuenta con información básica para el estudio y aplicación de las alternativas de diseño.

Para el modelo de diseño estructural AASHTO 93 se cuenta con el TPDA que es producto de la información brindada por parte de la Unidad de Titulación. A continuación se deberá realizar el cálculo de los ejes equivalentes de 8.2 toneladas para un periodo de diseño (que está en función del nivel de importancia de la obra); determinando los factores equivalentes de carga, factor de distribución por carril, factor de distribución por dirección y la tasa de crecimiento vehicular. Fuente de la guía AASHTO.

De acuerdo a la ecuación general de diseño de pavimentos flexibles se deberá analizar y describir cada uno de las siguientes variables como son:

La *variable de confiabilidad* que valora la incertidumbre y provee una garantía para que la alternativa de análisis dure el tiempo considerado para el periodo de diseño.

La *variable de la desviación normal estándar* que varía de acuerdo al grado de confiabilidad.

La *variable de serviciabilidad* que valora el grado de calidad del pavimento para el desplazamiento del vehículo y toma en cuenta su desgaste natural en función del tiempo.

La *variable del error normal combinado* que toma en cuenta la calidad de los materiales de la construcción, propiedades de los materiales y como está la estimación del tránsito.

Para la caracterización de los materiales que conforman la estructura del pavimento y de la subrasante, en el análisis es la determinación del módulo resiliente.

El módulo resiliente representa el efecto combinado entre los diferentes módulos elásticos del material a lo largo de la vida de diseño, y está constituido en función de las condiciones climáticas, estados de esfuerzos que simulan las condiciones que existen en los pavimentos sometidos a cargas por las ruedas del vehículo en movimiento.

Se realizara la caracterización mediante el valor soporte del suelo - CBR la cual mide la resistencia al esfuerzo cortante del material de análisis; con ello se correlaciona el coeficiente estructural de capa.

Con información hidrológica basada en datos mensuales de estaciones pluviométricas se obtendrá una evaluación de las condiciones climáticas. El efecto de la precipitación en un pavimento se representa mediante los coeficientes de drenaje (m_i).

Una vez obtenida todas las variables necesarias se determina el número estructural de cada capa resolviendo la ecuación básica de diseño AASHTO 93; el número estructural de la subrasante es un indicativo del espesor total del pavimento. Luego determinar los espesores de capas reales; las cuales no necesariamente son espesores indicados o necesarios. Se deberá iterar los espesores de las capas con criterio profesional hasta seleccionar un número estructural mayor o igual al número estructural calculado para la subrasante mediante la ecuación general de pavimentos flexibles.

Este valor final seleccionado para el término SN (Número Estructural), es un número adimensional que expresa la resistencia requerida de la estructura del pavimento,

para una combinación dada de condiciones de subrasante, cargas equivalentes totales, y capacidad final.

Se debe tener en cuenta que la solución no es única, ya que depende de las condiciones de diseño, de los espesores, de los materiales y de la calidad de las capas seleccionadas.

Para el modelo de diseño estructural MEPDG 2008 como segunda alternativa se realizara un análisis profundo enfocado a determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones cuando estas se someten a cargas de tránsito y a cambios de temperatura, comparándolos con sus respectivos valores admisibles.

El comportamiento de los pavimentos flexibles se caracteriza por los criterios de falla que son el agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica, deflexión en la estructura y deformación por compresión en la subrasante.

El procedimiento de diseño se caracteriza por el criterio de ahuellamiento en la subrasante y en las capas de la estructura del pavimento se basa en la determinación de la deformación unitaria por compresión y su relación entre el número de repeticiones de carga causada por un espectro de carga.

El criterio de fatiga en la carpeta asfáltica se basa en la determinación de la deformación unitaria tensional admisible en función del número de repeticiones de carga y el módulo dinámico de la carpeta asfáltica.

Para el espectro de carga se analizara las características del eje de diseño, la magnitud de la carga por eje y por rueda, la presión de inflado de las ruedas, el área de contacto y la separación entre ruedas del tipo de eje.

La caracterización de los materiales de la estructura del pavimento y de la subrasante se realiza en base a los módulos dinámicos de los materiales, contemplando sus respectivos coeficientes de Poisson.

Inicialmente se evaluara la estructura del pavimento, y de esta manera se controlara los siguientes factores: *Control de fatiga* que es la deformación unitaria tensional actuante en la carpeta asfáltica y debe ser menor a la deformación unitaria tensional admisible con el fin de controlar la fatiga de la carpeta asfáltica ante las sollicitaciones del tránsito. *Control del agrietamiento o ahuellamiento* que es la deformación por compresión sobre la subrasante y deberá ser menor a la deformación por compresión admisible, con el fin de controlar la deformación de la subrasante.

En la práctica de diseño hay que tener en cuenta que la solución no es única, ya que depende de las condiciones de diseño, de los espesores, de los materiales y de la calidad de las capas seleccionadas.

Así pues quedaría dispuesto el modelo estructural definitivo por la segunda alternativa.

Una vez definido el modelo estructural por ambas alternativas se procede a elaborar un análisis de precios unitarios, su respectivo presupuesto. Para finalmente realizar una comparación de costos final.

CAPITULO 2

2. MODELO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE

2.1 Fundamento teórico

Del latín *pavimentum*, el pavimento es la capa o base que constituye el nivel de una vía en construcción o de una superficie no natural. Y su principal función es la de permitir la circulación de vehículos brindando seguridad y confort.

Hay que tener en cuenta que el pavimento puede revestirse con diferentes materiales, el termino suele asociarse a la mezcla o carpeta asfáltica.

Las denominadas mezclas asfálticas y de concreto son los materiales más comunes para crear el pavimento urbano, ya que tienen un buen rendimiento de soporte mejorando la circulación de los vehículos.

En el año de 1956 la AASHO (actualmente AASHTO), en el país de Estados Unidos de América, en el Estado de Illinois, cerca de Ottawa, comienza el proyecto de prueba de vías más completo y nunca antes ejecutado (AASHO Road Test). Que serviría como base de las nuevas guías de diseño que ahora utilizamos. Con una inversión económica de 27 millones de dólares americanos distribuidos en la construcción de pistas, operación e investigación, personal técnico, administración y laboratorios.

Tras dos años de construcción en el año 1958 comienza la aplicación de las cargas vehiculares sobre el pavimento.

Mapa de la AASHO Road Test

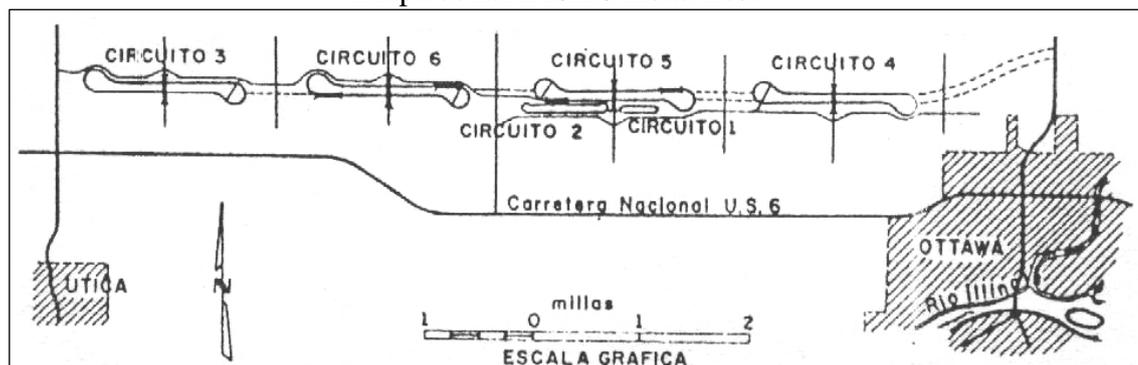


Figura 4. Ubicación del Experimento Vial de la AASHO sobre la futura autopista interurbana I-80, de la red Interestatal de los Estados Unidos

FUENTE: Experimento Vial de la AASHO

Para el año 1960 termina la medición de campo e inicia el análisis de toda la información recolectada en la prueba, en 1962 se publica la primera “Guía Provisional de Diseño de Pavimentos”.

Esta nueva guía enfoca su estudio en determinar el vínculo entre el número de repeticiones de carga vehiculares por ejes de diferentes configuraciones y magnitudes. Así como el comportamiento de diferentes secciones de pavimentos rígidos y flexibles, construidos sobre una misma fundación pero con diferentes espesores de subbases y bases.

Se introducen conceptos que caracterizan el funcionamiento de la vía como son la “Servicapacidad” que es la habilidad que tiene un pavimento para servir al tráfico para el cual fue diseñado y el “Comportamiento” que es la habilidad para servir al tráfico a lo largo del tiempo.

Para medir el comportamiento mediante el conocimiento de su servicapacidad cuando estuvo completamente nueva la vía así como en varios momentos del desarrollo de la prueba se crea el parámetro PSR (Present Serviceability Rating) o también conocido “Clasificación de servicio actual”.

Este nuevo parámetro calificaba con valores entre el 0 como valor menor y el 5 como el valor mayor para el estado del pavimento en cuanto a su funcionalidad.

La ecuación AASHO 1962 quedo de la siguiente manera:

$$\text{Log}W_{18} = 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{4.2-Pt}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} \right) \quad \text{ec.. 1}$$

Ecuación general o formula básica de la AASHO 1962 para pavimento flexible

Dónde:

W₁₈: Número de aplicaciones de ejes simples de 18.000 libras para un tiempo determinado.

SN: Número estructural o servicapacidad de la estructura para soportar las cargas bajo condiciones de diseño.

Pt: Es el valor de servicapacidad final para un tiempo determinado.

Esta ecuación general es aplicable bajo condiciones de material de fundación del sitio donde se realizó la operación e investigación. Por lo cual se ve necesario introducir los parámetros “Factor Regional” y “Valor soporte del suelo” y permite que esta ecuación sea apta para uso en diferentes condiciones.

Ya en el año 1972 tras 10 años de información acumulada en la determinación de espesores mediante la aplicación de la guía provisional, se incorpora el factor “Transito”; cambia el parámetro PSR por PSI (Present Serviceability Index) o también conocido “Índice de servicio actual” que incorpora mediciones del comportamiento mediante encuestas a los usuarios de las vías y serviría para cuantificar la perdida de serviciabilidad, calificando la condición del pavimento de 0 – 5; y se la denomina como Guía de diseño de pavimentos AASHTO 72.

La ecuación AASHTO 1972 quedo de la siguiente manera:

$$\text{Log}W_{18} = 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{4.2-Pt}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} \right) + \text{Log}\left(\frac{1}{R}\right) + K * (S_i - S_o) \quad \text{ec. 2}$$

Ecuación general o formula básica de la AASHTO 1972 para pavimento flexible

Dónde:

W₁₈: Número de aplicaciones de ejes simples de 18.000 libras

SN: Valor del número estructural

Pt: Es el valor de servicapacidad final para un tiempo determinado.

R: Valor del factor regional (Aplicable solo para Estados Unidos)

Si: Valor soporte del suelo para cualquier suelo en condición “i”

So: Valor soporte del suelo empleado en el AASHO road test

K: Constante de regresión (determinado como 0.372)

Como un valor de entrada o dato de ingreso para el valor soporte del suelo (Si) y que no puede ser obtenido directamente de ningún ensayo, se implementa una escala arbitraria para ser utilizado tanto en materiales de fundación como para las capas de subbase y base.

Para la resolución del algoritmo o ecuación general de pavimentos flexible como una manera simple de resolver es mediante una serie de tanteos, partiendo de un valor SN en función a la estimación del valor de carga equivalente acumulada. O mediante la utilización de un ábaco para valores de servicapacidad final de $pt = 2.5$ y $pt=2.0$

Ya para el año de 1983 la *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO) reviso la “Guía Provisional de Diseño de Pavimentos de 1962” y la “Guía de Diseño de Pavimentos de 1972”, y para el año 1986 concluye su revisión con la publicación de un nuevo “Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 86” y para 1993 redacta una Guía de pavimentos empírica conocida actualmente como “Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles AASHTO 93”.

Esta guía de diseño mantiene las ecuaciones de comportamiento de los pavimentos que se establecieron en el experimento vial de la AASHTO de 1962 y 72, lo que adicionalmente se introducen nuevos factores importantes de diferentes áreas de diseño como son:

- Factor de confiabilidad, debido al posible cambio de tránsito a lo largo del periodo de diseño, mediante un análisis de riesgo para los diversos tipos de vías a proyectar.
- Módulo resiliente (M_R) como una manera de cuantificar el proceso de cargas transmitidas por el tráfico.
- Empleo de los módulos resilientes para la determinación de los coeficientes estructurales de los materiales de la estructura del pavimento.
- Coeficiente de drenaje para estimación de los espesores.
- Características ambientales tales como la humedad y temperatura sobre las propiedades de los materiales.

La ecuación AASHTO 93 queda de la siguiente manera:

$$\text{Log}_{10}(N) = Z_r * S_o + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(M_R) - 8.07 \quad \text{ec. 3}$$

Ecuación general o formula básica de la AASHTO 93 para pavimento flexible

Dónde:

N : Número de ejes equivalentes de 8.2 t. en el carril de diseño durante el periodo de diseño

Z_r : Valor del desviador en una curva de distribución normal, función de la confiabilidad del diseño (R).

S_o : Error normal combinado de la previsión del tránsito y materiales.

ΔPSI : Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial P_o y final P_t .

M_R : Módulo resiliente de la subrasante, de las capas de bases y subbases granulares.

SN : Número estructural o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo condiciones de diseño.

Actualmente la guía de diseño de pavimentos AASHTO está razonablemente de acuerdo que no puede hacer todas las consideraciones y reconoce que es necesario complementar con un nuevo método “Mecanicista” basándose en propiedades mecánicas de los materiales bajo solicitaciones cuyo resultado es una respuesta del pavimento representado por esfuerzos y deformaciones, calculando el nivel de daño esperado en el periodo de diseño para los diferentes tipos de daños esperados.

A partir del año 2002 la AASHTO propone el nuevo método y que actualmente se lo reconoce como “Empírico – Mecanicista” para diseño de pavimentos. Ya que es una mezcla de conceptos empíricos para relacionar las respuestas de los pavimentos con su funcionamiento y conceptos mecanicistas para determinar la respuesta del pavimento después de ser sometida a cargas, mediante modelos matemáticos.

2.2 Factores que intervienen en el método AASHTO 93

A continuación se detallara con mayor énfasis cada uno de los factores:

2.3 Periodo de análisis

Es el tiempo que debe cubrir un servicio garantizando su correcto desempeño, tomando en cuenta por lo menos una rehabilitación que permita alcanzar el periodo de análisis deseado.

La guía AASHTO 93 recomienda el estudio del pavimento mayor o igual a 20 años, ya que pueden dar lugar a una mejor evaluación de las alternativas de diseño basadas en un análisis *Costo – Tiempo*.

Tabla 6. Periodo de Análisis

Tipo de Vías	PERIODO (años)
	Análisis
Urbana de alto volumen	30 – 50
Interurbana de alto volumen	20 – 50
Asfaltada de bajo volumen	15 – 25
Rodamiento de bajo volumen	10 – 20

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-7

El tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida; al estar en proceso de diseño se proyecta como una vía *asfaltada de bajo volumen* con un periodo de diseño de 20 años y se prevé una rehabilitación en medio de la vida del pavimento.

2.4 Transito

Para utilizar los procedimientos de diseño de pavimentos que se presentan en esta guía, al tráfico se debe convertir en un número de repeticiones de ejes equivalentes de un eje simple de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip, y para llevar a cabo esta conversión incluye:

1. Factores equivalentes de carga
2. La conversión de tráfico a la aplicación de carga de un solo eje equivalente de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip (ESAL)
3. Consideraciones de distribución de carriles

Para expresar la variación de ejes en términos de un único parámetro de diseño, es necesario el desarrollo de factores equivalentes de carga por eje; estos factores, cuando se multiplican por el número de ejes de un peso conocido, dan como resultado el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip que tendrá un efecto sobre el rendimiento de la estructura del pavimento.

El factor equivalente de carga representan la relación entre el número de repeticiones de cualquier magnitud y configuración (simple, tandem, tridem) necesaria para producir el mismo daño o en su defecto la misma reducción en PSI como una aplicación de un eje simple de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip. Los factores de equivalencia de carga se presentan más adelante en las tablas D1 al D9 para un rango de combinaciones estructurales de pavimentos, configuración y valores de serviciabilidad final de 2.0, 2.5 y 3.0 del Apéndice D de la Guía de diseño de

pavimentos AASHTO 93 – las ecuaciones de regresión que fueron utilizadas para generar estas tablas fueron presentadas en la AASHTO road test.

Para obtener los ESAL's de diseño es necesario imponerse un número estructural (SN) para pavimentos flexibles con un criterio razonable, y luego seleccionar los factores de equivalencia que figuran en las tablas D1 al D9. El uso de un SN de 5.0, para la determinación de los factores equivalentes de un eje simple de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip normalmente dan resultados que son lo suficientemente precisos para fines de diseño, a pesar de que el diseño final logre ser algo diferente. Si por error, esta suposición dará lugar a un sobredimensionamiento de ejes simples equivalentes de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip. Y se desean resultados más precisos a partir de un diseño computarizado es recomendable reducir (1 pulgada de pavimento asfáltico) a partir del valor asumido, el diseño de ESAL's (W18) se recalcula, y el diseño estructural determinada para el nuevo W18. El procedimiento debe continuarse hasta que los valores asumidos y calculados sean lo más parecidos.

Si el número de ejes equivalentes representa el total de los carriles en ambos sentidos de dirección, este número debe ser distribuido por su dirección y por los carriles para fines de diseño.

2.5 Factor equivalente de carga (LEF)

Es la relación de un eje con cualquier magnitud de carga sobre un eje equivalente de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip., y conlleva a cuantificar el daño en el índice de serviciabilidad actual.

$$LEF = \frac{N_x}{N_{18}} \quad \text{ec. 4}$$

Dónde:

N_{18} : Repeticiones de carga del eje de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip., en un tiempo t.

N_x : Repeticiones de carga de un eje X en un tiempo t

Basados en los resultados obtenidos en la AASHO Road Test, se presentan las siguientes ecuaciones de regresión para poder determinar los LEFs para pavimento flexible:

$$\frac{N_x}{N_{18}} = \left(\frac{L_x + L_{2s}}{L_{18} + L_{2x}} \right)^{4.79} \left(\frac{10^{\frac{G}{\beta_{18}}}}{\left(\frac{G}{10^{\beta_x}} \right) * (L_{2x})^{4.331}} \right) \quad \text{ec. 5}$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad \text{ec. 6}$$

$$\beta_x = 0.4 + \left(\frac{0.081(L_x + L_{2x})^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_{2x}^{3.23}} \right) \quad \text{ec. 7}$$

$$\beta_{18} = 0.4 + \left(\frac{0.081(18+1)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} 13.23} \right) \quad \text{ec. 8}$$

Dónde:

L_{18} : Carga del eje estándar en libras/1000

L_x : Carga del eje evaluado

L_2 : Código referencial para la configuración del eje

1: Eje simple

2: Eje tándem

3: Eje tridem

X: Factor de equivalencia de carga del eje evaluado

S: código para el eje estándar, igual a 1

G: Función de la proporción de la pérdida de serviciabilidad en un tiempo t, para la pérdida potencial observada en el punto $P_t = 1.5$

P_t : Índice de serviciabilidad final e indica que las condiciones del pavimento ya no son apropiadas.

β : Función que determina la relación entre la serviciabilidad y aplicaciones de eje de carga.

SN: Número estructural del pavimento

2.5.1 Factor equivalente de carga por eje (Ley generalizada de la cuarta potencia)

$$LEF = \left(\frac{P_i}{P_r}\right)^n \quad \text{ec. 9}$$

Este factor expresa en términos generales la magnitud de la carga aplicada al pavimento que producirá un mismo daño unitario, la cual corresponde a la relación de la carga del tipo de eje analizado (Pi) y la configuración del eje de referencia (Pr) elevada a un coeficiente empírico, en la AASHO Road Test se determinó el coeficiente empírico “n” en pavimentos flexibles oscila en un valor entre (3.8 – 4.2), lo que en promedio se llegó a utilizar un valor de 4.0 por ende se le conoce como la ley generalizada de la cuarta potencia o método simplificado.

$$LEF = \left(\frac{P_i}{P_r}\right)^4 \quad \text{ec. 10}$$

A continuación se presenta el siguiente cuadro con las características de acuerdo al tipo de eje y configuración de ruedas, que producirán en el pavimento el mismo de daño en referencia al eje simple rueda doble de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip.,

Tabla 7. Carga del eje de referencia

Eje de referencia	Configuración de ruedas	Carga		
		Kilolibras	Toneladas	Kilonewton
Simple	simple	14.5	6.6	65
Simple	doble	18.0	8.2	80
Tandem	doble	33.0	15.0	146.0
Tridem	doble	50.7	23.0	225.0

FUENTE: INVIAS, “Guía Metodológica para el diseño de Obras de rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras”, Cargas equivalentes de referencia, 2008. p. 57-62.

2.6 Factor de distribución por dirección (Fd)

Bajo un flujo vehicular contabilizado, la mayoría de las vías cuenta con un 50% de vehículos que circulan para una dirección y otro 50% hacia la dirección contraria a menos que por consideraciones especiales (tales como camiones cargados que se dirigen en una dirección y camiones vacíos en la otra dirección) o justificando alguna otra distribución, la AASHTO recomienda tomar el valor de 0.5 (50 por ciento).

2.7 Factor de distribución por carril (Fc)

Para una vía en análisis cualquiera podría ser el carril de diseño, y debido a que la circulación depende del número de carriles, por lo tanto se toma como referencia el carril más cargado, en consecuencia donde pasan los vehículos más pesados. La AASHTO recomienda en su guía de diseño la utilización del siguiente factor de distribución:

Tabla 8. Factor de distribución por carril

NUMERO DE CARRILES DE CADA DIRECCION	PORCENTAJE DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 t. EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4 o más	0.50 – 0.75

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-9

En el caso de tener una vía con un solo carril, asignado el 100 por ciento por dirección, tendrá el factor de distribución por carril 1, debido a que existe la probabilidad del 100 por ciento de que los vehículos pasen por ese carril.

Si existieran dos carriles en la misma vía, asignado el 50 por ciento por dirección, tendrá el factor de distribución por carril de 0.8 a 1.0, debido a que existe la probabilidad del 80 al 100 por ciento de que los vehículos pasen por uno de los dos carriles.

Si existieran tres carriles en la misma vía, asignado el 50 por ciento por dirección, tendrá el factor de distribución por carril de 0.6 a 0.8, debido a que existe la probabilidad del 60 al 80 por ciento de que los vehículos pasen por uno de los dos carriles.

Y para el caso de tener 4 o más carriles en la misma vía, asignado el 50 por ciento por dirección tendrán el factor de distribución por carril de 0.5 a 0.75, debido a que

existe la probabilidad del 50 al 75 por ciento de que los vehículos pasen por uno de los carriles.

2.8 Factor de crecimiento (g)

Cada día se incrementan un cierto número de vehículos a nuestro parque automotor, la incertidumbre nace en conocer dicho valor variable, este crecimiento variable viene a ser el incremento del volumen del tránsito, y se lo puede determinar mediante estudios probabilísticos, censos en peajes, gasolineras, etc.

El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), pone a disposición del público en general, los resultados del Anuario de Estadísticas de Transporte de los años 2011, 2012, 2013, 2014; con la correspondiente tabla de la tasa de crecimiento en la provincia de Santo Domingo de los Tsachilas:

Tabla 9. Proyección y Crecimiento vehicular, Anual

AÑO	Tasa de crecimiento vehicular (g) %
2011	1.35
2012	1.54
2013	1.74
2014	1.97

FUENTE: www.inec.gob.ec

De las proyecciones realizadas anualmente se tomara el año más reciente para realizar el factor de crecimiento total.

La guía de diseño AASHTO recomienda el uso del tráfico a través de todo el periodo de diseño para determinar el factor de crecimiento total, como se indica a continuación:

$$\text{Factor de crecimiento total} = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad \text{ec. 11}$$

Tabla 10. Factor de crecimiento vehicular

Periodo de análisis (n)	Factor sin crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11

6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Appendix D-24.

Donde g equivale a la relación del porcentaje para 100 y no deberá ser cero, si da un valor de cero el factor de crecimiento es igual al periodo de análisis.

2.9 Cálculo de ejes equivalentes

2.9.1 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes

Al existir una serie de repeticiones de cargas vehiculares por ejes de diferentes configuraciones y magnitudes; el volumen del tráfico se debe transformar en un valor de ejes equivalentes para una misma carga y que producirá el mismo efecto o daño que toda la composición del tránsito de vehículos. De acuerdo a la AASHTO la carga será de 8.2 t., 80 kN., o 18 kip., y se la denominara ESAL's.

Parcialmente se obtiene el siguiente porcentaje de vehículos de acuerdo al TPDA de 300 veh/día para la determinación del tráfico de diseño que hará uso de la vía durante el periodo de diseño

Tabla 11. Porcentaje de cada tipo de vehículos

Vehículos	%	Veh/día
Livianos	25	75
3A	25	75
2DB	25	75
T3 – S3	25	75

FUENTE: Unidad de Titulación

La metodología AASHTO establece la vida útil del pavimento de acuerdo al número de repeticiones de carga que deberá soportar antes de llegar a las condiciones de servicio final.

Ejemplo de cálculo del Factor de Equivalencia de Carga (LEF)

Tipo de eje: Simple

Carga: 7 t., (68.67 kN), (15431.460 lb.)

SN: 4 (Valor asumido en esta etapa y se comprueba en el diseño final)

Pt: 2.0

$$G = \log \left(\frac{4.2 - 2.0}{4.2 - 1.5} \right) = -0.08894$$

$$\beta_{15.43} = 0.4 + \left(\frac{0.081(15.43 + 1)^{3.23}}{(4 + 1)^{5.19} 1^{3.23}} \right) = 0.5611$$

$$\beta_{18} = 0.4 + \left(\frac{0.081(18 + 1)^{3.23}}{(4 + 1)^{5.19} 1^{3.23}} \right) = 0.6577$$

$$\frac{N_x}{N_{18}} = \left(\frac{15.43 + 1}{18 + 1} \right)^{4.79} \left(\frac{10^{\frac{-0.08894}{0.6577}}}{\left(10^{\frac{-0.08894}{0.5611}} \right) * (1)^{4.331}} \right)$$

$$\frac{N_x}{N_{18}} = 0.526$$

Por lo tanto $\frac{N_x}{N_{18}} \cong 52.6\%$ de cargas admisibles W_{18} con un eje simple de 7 t.

Finalmente, el $LEF = 0.526$ (Ver Anexo A – Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes simples y $Pt = 2.0$).

2.9.2 Procedimiento general para el cálculo de ejes equivalentes

Ahora se describirá la distribución de carga por eje de acuerdo al tipo de vehículo que circula por la vía:

Tabla 12. Determinación de ESAL's – Método AASHTO 93

Tipo de Veh.	Tipo de eje	Veh/día	Peso (t.)	Peso (kN)	Peso (Kips)	LEF	ESAL's Veh/día*LEF
3A	Simple	75	7	68.67	15.43	0.526	39.45
	Tándem	75	20	196.20	44.08	3.202	240.15
2DB	Simple	75	7	68.67	15.43	0.526	39.45
	Tándem	75	11	107.91	24.24	0.263	19.73
T3 – S3	Simple	75	7	68.67	15.43	0.526	39.45
	Tándem	75	20	196.20	44.08	3.202	240.15
	Tridem	75	24	235.44	52.90	1.521	114.08
Σ ESAL's							732.46

FUENTE: Propia

732.46 repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 t., 80 kN., o 18 kips; al año cero.

Factor equivalente de carga por eje se determina de la siguiente manera:

Tabla 13. Determinación de ESAL's – Método AASHTO simplificado

Tipo de Veh.	Veh/día	TIPO DE EJE			Factor Daño	ESAL's Veh/día*Factor daño
		Simple - Simple	Tandem	Tridem		
3A	75	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$		4.425	331.88
2DB	75	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{11}{15}\right)^4$		1.554	116.55
T3-S3	75	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$	$\left(\frac{24}{23}\right)^4$	5.611	420.83
Σ ESAL's						869.26

FUENTE: Propia

869.26 repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 t., 80 kN., o 18 kips; al año cero.

2.9.3 Proyección del tránsito al tiempo de diseño

Ahora se determina el número total de repeticiones que pasaran por el tiempo de diseño tomando en cuenta el valor mayor entre ambos métodos analizados de ESAL's de los vehículos pesados, tomando en cuenta el factor carril, el factor de dirección, la tasa de crecimiento y el periodo de análisis con la siguiente ecuación:

$$N = N_d * 365 * F_d * F_c * \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad \text{ec. 12.}$$

El número de repeticiones por el método AASHTO será:

$$N = 869.26 * 365 * 0.5 * 1.0 * \frac{(1 + 0.0197)^{20} - 1}{0.0197}$$

$$N = 3\,843\,040$$

3'843.040 repeticiones de ejes equivalentes que pasaran para el tiempo de diseño del pavimento.

2.9.4 Factores estadísticos

2.9.5 Confiabilidad

La confiabilidad (R) por su sigla en inglés "Reability" es una variable o una incertidumbre natural en todo lo relacionado con el diseño de pavimentos. Tal vez la incertidumbre es la de estimar las cargas de ejes vehiculares que pasaran en el futuro sobre la vía. Los materiales y la construcción también introducen una significativa medida de la variabilidad.

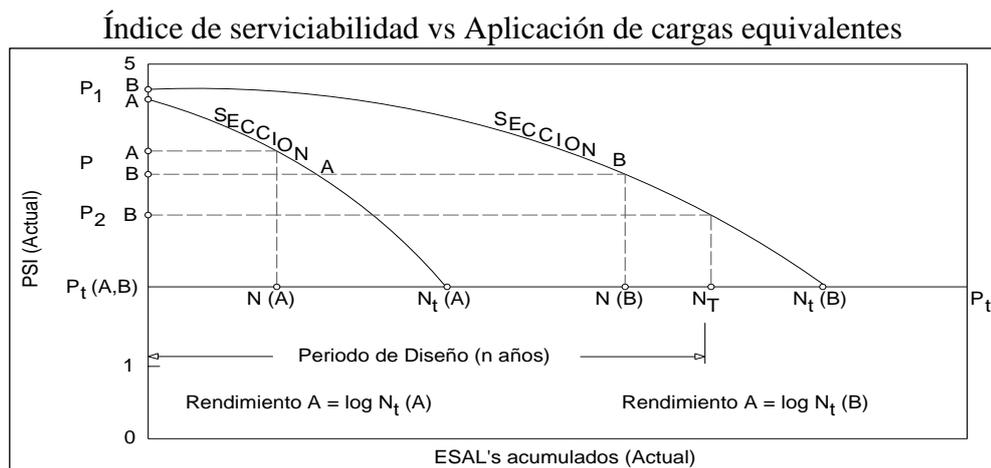


Figura 5. Comportamiento de dos secciones con la serviciabilidad final
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-55

Para diseño y determinación de la confiabilidad, hay tres pasos que se deben tomar en cuenta:

1. Al inicio del periodo de diseño

$$P = P_1 \text{ (generalmente mayor a 4.0)}$$

$$N = 0$$

2. Cuando la sección de serviciabilidad alcanza el valor final o el nivel mínimo permitido para una rehabilitación o reconstrucción.

$$P = P_t \text{ (generalmente se asume para diseño 2.0 o 2.5)}$$

$$N = N_t$$

Como se muestra en la figura 5 la sección A alcanza una serviciabilidad (P_t) antes y la sección B después de terminar el periodo de diseño.

3. Al final del periodo de diseño para las secciones cuyos índices de serviciabilidad todavía exceden P_t .

$$P = P_2$$

$$N = N_T$$

El proceso del diseño del pavimento requiere prever, w_T , del periodo de diseño de ESAL, N_T ; por lo tanto

$$w_T(\text{previsto}) = g * N_T(\text{actual}) \quad \text{ec. 13}$$

Dónde:

g : representa una previsión incierta la cual se basa en la experiencia adquirida, en un rango entre 0.5 – 2.

w_T : trafico previsto (Número total de ESAL's).

N_T : trafico futuro al final del periodo de diseño

2.9.5.1 Diseño del factor de confiabilidad

Los componentes principales que intervienen son: el diseño y el comportamiento de pavimento

En lo que se refiere a la confiabilidad, el diseño del pavimento - implica tres pasos principales:

1. Prever un, w_T , del actual período de diseño ESAL, N_T
2. Multiplicar w_T por un factor de confiabilidad seleccionado, $F_R \geq 1$
3. Prever del comportamiento real del pavimento, N_t , por $W_t = w_T \times F_R$ a través de una ecuación de diseño que expresa W_t como una función de los factores de diseño de pavimentos.

Los tres pasos implican cuatro puntos básicos de los intervalos de ESAL y escalas de log ESAL como se muestra en la figura 6. El primer punto es para el tráfico en el período de diseño (N_T y $\log N_T$); el segundo es para determinar el tráfico (w_T y $\log w_T$). El tercero y cuarto punto son para el comportamiento del pavimento, determinado ($\log W_t$) y el actual ($\log N_t$).

Puntos y desviaciones básicas para diseño – comportamiento de la Confiabilidad

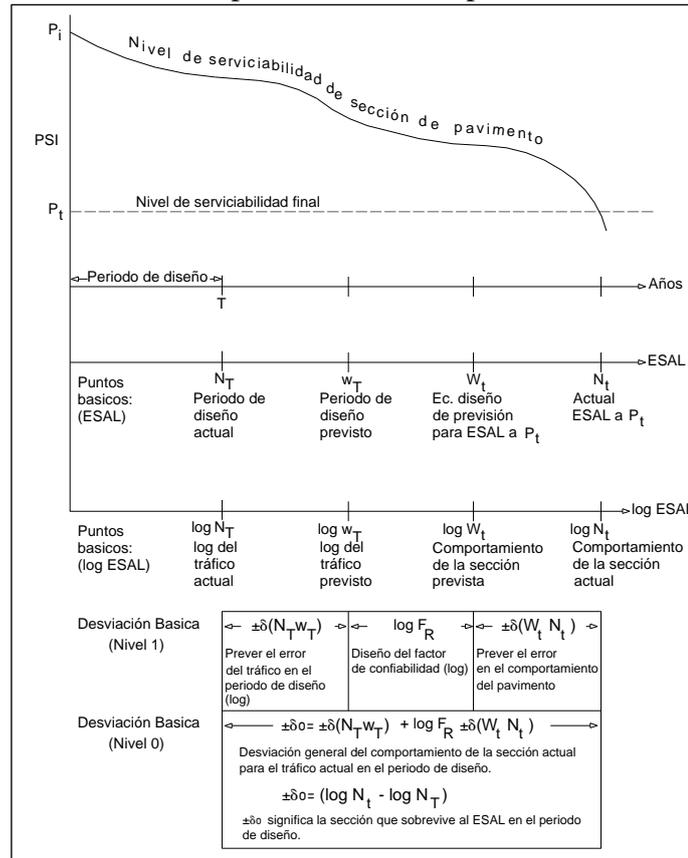


Figura 6. Factor de Confiabilidad

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-58

Los tres intervalos (\log ESAL) formados por los cuatro puntos básicos se muestran como (nivel 1), desviación básica:

1. Prever el error del tráfico en el período de diseño:
2. Diseño del factor de confiabilidad (log):
3. Prever el error en el comportamiento del pavimento

La cuarta desviación básica es la suma de los tres primeros, tanto geométrica y algebraicamente.

4. Desviación general del comportamiento de la sección para el tráfico actual en el período de diseño.

Distribución básica para diseño – comportamiento de Confiabilidad

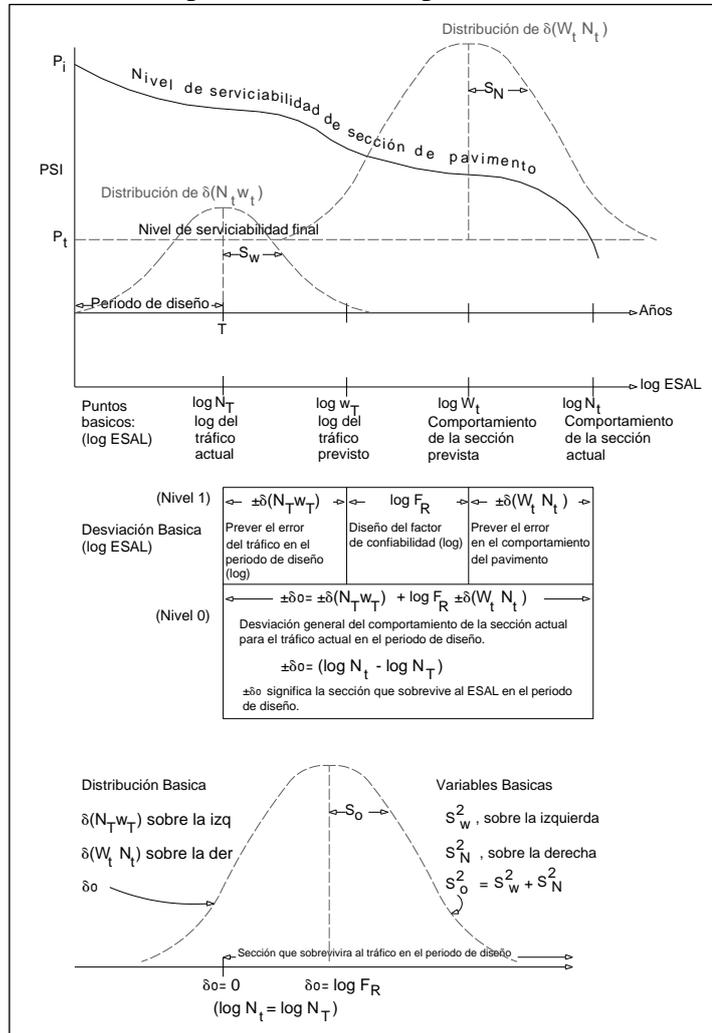


Figura 7. Variables que intervienen en el factor de Confiabilidad
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-59

La distribución probabilística para la desviación general del comportamiento de diseño (δ_0) se detalle en la figura 8 y es la base para las definiciones de diseño - comportamiento de la confiabilidad y el factor de diseño de la confiabilidad.

El área punteada por encima del rango $\delta_0 \geq 0$ corresponden a la probabilidad de que $N_t \geq N_T$, es decir, que una sección de pavimento sobrevivirá al tráfico en el período de diseño con $p \geq p_t$. Esta probabilidad se define como el nivel de confiabilidad,

R/100, del proceso del diseño - comportamiento, en el que R se expresa como porcentaje. Por lo tanto, la definición de confiabilidad viene dada por:

$$R(\%) = 100 * Prob(N_t \geq N_T) \quad \text{ec. 14}$$

$$R(\%) = 100 * Prob(\delta_o \geq 0) \quad \text{ec. 15}$$

Dónde:

N_t : Es el número de ESAL's de 8.2 t. u 80 kN hasta llegar a su serviciabilidad final

N_T : Es el número de ESAL's de 8.2 t. u 80 kN que pasaran sobre el pavimento en su periodo de diseño.

Para el cálculo de R y para evaluar el factor de diseño confiabilidad ($\log F_R$) es necesario cambiar la escala δ_o a la correspondiente escala-Z para una desviación normal estándar por la relación:

$$Z = (\delta_o - \bar{\delta}_o)/S_o \quad \text{ec. 16}$$

$$Z = (\delta_o - \log F_R)/S_o \quad \text{ec. 17}$$

En el punto donde $\delta_o = 0$, Z se convierte en Z_R , donde:

$$Z_R = (-\log F_R)/S_o \quad \text{ec. 18}$$

Para un nivel de confianza dado, por ejemplo R es igual a 90 por ciento, Z_R se puede encontrar en tablas de la curva normal estándar y corresponde a la zona de la parte inferior izquierda de la curva de -0 a $(100 - R)/100$. Si R es igual a 90 por ciento, la tabla 14 muestra el valor de $Z_R = -1,28$ como porcentaje de área de la parte inferior izquierda, o mediante la siguiente ecuación:

$$\log F_R = -Z_R * S_o \quad \text{ec. 19}$$

Para entender de mejor manera se indica con la siguiente figura de distribución normal:

Definición de Confiabilidad y Evaluación del factor de diseño de confiabilidad

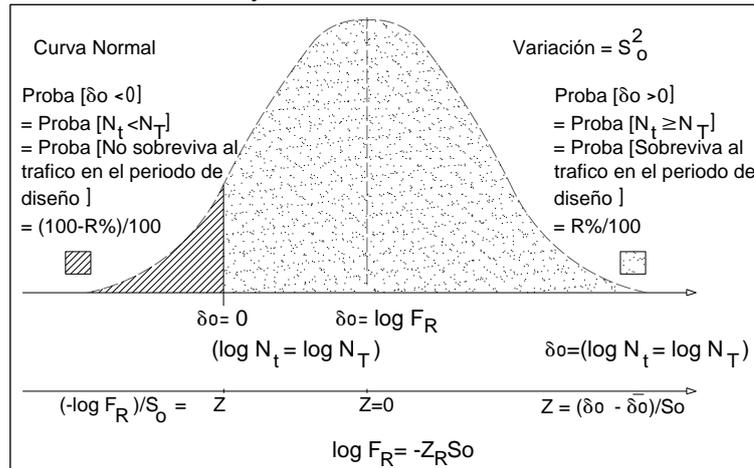


Figura 8. Evaluación del factor de Confiabilidad en la curva de distribución normal
 FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-61

La Confiabilidad en el diseño de un pavimento se caracteriza en términos de ESAL's

La confiabilidad está relacionada con la aparición de fallas en el pavimento.

En el siguiente cuadro se presentan los niveles de confianza recomendados por las AASHTO para los diferentes tipos de carreteras:

Tabla 14. Niveles de confiabilidad recomendados para diferentes tipos de carreteras

TIPO DE CARRETERA	NIVEL DE CONFIABILIDAD, R (%)	
	URBANA	INTERURBANA
Autopistas y carreteras importantes	85.0 – 99.9	80.0 – 99.9
Arterias principales	80.0 – 99.0	75.0 – 95.0
Colectoras	80.0 – 95.0	75.0 – 95.0
Locales	50.0 – 80.0	50.0 – 80.0

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-9

2.9.6 Desviador normal estándar

Al seleccionar un valor de Confiabilidad (R) para el análisis hay que tomar en cuenta que cada porcentaje tiene un valor propio como “Desviador normal estándar” y se presentan como recomendación de la AASHTO en el siguiente cuadro:

Tabla 15. Desviador normal estándar, Z_R

CONFIABILIDAD, R (%)	DESVIADOR NORMAL ESTANDAR, Z_R
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	-3.750

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-62

2.9.7 Error normal combinado, S_o

Toma en cuenta como un error la calidad de la construcción, de las propiedades de los materiales de la estructura de la vía, de la incertidumbre de conocer si están bien los resultados del tráfico, al tener una buena estimación el valor S_o será menor y en caso contrario de no estar seguros de los resultados el valor S_o será mayor; continuación se presentan como recomendación de la guía AASHTO 93 en el siguiente cuadro:

Tabla 16. Error normal combinado, S_o (Para pavimentos flexibles)

PROYECTO DEL PAVIMENTO	ERROR NORMAL COMBINADO, S_o
Rango para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
Construcción nueva	0.45
Sobrecapas	0.50

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. I-62

El valor desviador normal estándar y el error normal combinado ($Z_r \cdot S_o$) de la ecuación 18, es una condicional presente que actúa como un factor de seguridad, ya que siempre actuara como valor negativo y al ser despegado de la ecuación general de diseño de pavimentos de la AASHTO incrementara la carga de diseño ($\log_{10} N$).

2.9.8 Serviciabilidad

El serviciabilidad de un pavimento se define como su capacidad de servir a todo tipo de tráfico (autos y camiones). La principal medida de la capacidad de servicio es el índice de serviciabilidad actual (PSI), que va de 0 (vía intraficable) a 5 (vía

perfecta). La filosofía básica de diseño de esta Guía es la serviciabilidad - concepto de desempeño, que proporciona un medio de diseño para un pavimento basado en un volumen total de tráfico específico y un nivel mínimo de serviciabilidad deseado al final del período de operación.

La selección del menor valor de PSI o índice de serviciabilidad final (Pt) se basa en el índice más bajo que se tolerará antes de una rehabilitación, revestimiento, o una necesaria reconstrucción vial. Un índice de 2.5 o mayor se sugiere para el diseño de las vías principales y 2.0 para las vías con los volúmenes de tráfico de menor importancia. Uno de los criterios para la identificación de un nivel mínimo de serviciabilidad puede establecerse sobre una encuesta y aceptación del público. Los siguientes valores son pautas generales para los niveles mínimos de serviciabilidad final Pt obtenidos a partir de estudios en relación con la AASHO Road Test.

Tabla 17. Valores mínimos para Pt, para pavimentos flexibles

Índice de serviciabilidad final, Pt	% de usuarios que aceptan como buena la condición de servicio del pavimento
3.0	12
2.5	55
2.0	85

FUENTE: AASHO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-10

Para vías relativamente menores donde la economía es limitada, se sugiere que el diseño se logre mediante la reducción del período de diseño o el volumen total de tráfico, o cuando mediante una encuesta para una serviciabilidad final sea menor a 2.0.

El Índice de Servicapacidad Inicial es función del diseño de pavimentos y del grado de calidad durante la construcción. El valor establecido en la AASHO Road Test para los pavimentos flexibles fue de 4.2 y que mantiene actualmente.

Una vez establecidas P_o y P_t , la siguiente ecuación debe aplicarse para definir el cambio total en el índice de serviciabilidad.

$$\Delta PSI = P_t - P_o$$

ec. 20

2.10 Desempeño del pavimento (Performance)

Conceptos actuales en el comportamiento del pavimento incluyen algunas consideraciones sobre el rendimiento funcional, el rendimiento estructural y la seguridad. La guía AASHTO se basa principalmente en el rendimiento funcional y estructural.

El comportamiento estructural de un pavimento se refiere a su condición física, es decir, la aparición de grietas, fisuras, defectos u otras condiciones que afecten negativamente a la capacidad de transporte de carga de la estructura de pavimento.

El rendimiento funcional de un pavimento se refiere a qué tan bien el pavimento sirve al usuario. En este contexto, el confort de conducción o la calidad es la característica dominante. Con el fin de cuantificar el confort de conducción, el concepto de "serviciabilidad - desempeño" fue desarrollado por la AASHO Road Test en 1957.

El concepto de serviciabilidad se basa en cinco reglas fundamentales, resumidas de la siguiente manera:

1. Las carreteras son para la comodidad y conveniencia del viajero (usuario).
2. Confort, calidad de rodadura, es una cuestión de respuesta subjetiva a la opinión del usuario.
3. Serviciabilidad puede ser expresado por la media de las calificaciones tomadas por todas las vías y que se denomina como "Calificación de servicio".
4. Hay características físicas de un pavimento que se pueden medir de manera objetiva y que puede estar relacionado subjetivamente con el índice de serviciabilidad.

5. El rendimiento puede ser representado por la historia del servicio de un pavimento.

2.11 Factores de la subrasante

2.11.1 Materiales

Los materiales de las capas utilizadas para la construcción de la estructura del pavimento flexible deben diseñarse para soportar los factores climáticos y sobre todo las cargas del tránsito. Para lo cual serán controladas y supervisadas bajo las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras públicas (MTO) y AASHTO. Las capas que se usan frecuentemente sobre la subrasante son: la subbase, la base y la carpeta asfáltica. En ciertos casos cuando sea necesario se colocaran capas que mejoran la estructura del pavimento y son conocidos como mejoramientos o capas estabilizadas.

Los espesores de las capas están en función de la calidad de la subrasante, del clima y el número estructural establecido de la ecuación general de la Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles AASHTO 93.

Inicialmente se utilizaban para los primeros diseños de pavimentos propiedades de la subrasante tales como: clasificación de suelos, Granulometría, Resistencia al corte, Plasticidad, y después se generalizo el uso de cargas estáticas o de baja velocidad de deformación como el CBR, ensayos de compresión simple. Y con el fin de complementar el comportamiento bajo el pavimento en lo que respecta a deformaciones y las tensiones que demuestran estos ensayos se utiliza el valor del módulo resiliente (M_R) y que se obtiene directamente por ensayos triaxiales cíclicas, por corte directo o mediante ecuaciones de correlación a partir de valores determinados de CBR.

2.11.2 CBR (Valor de Soporte California)

Una de las características que tiene el suelo y que puede ser medida e interpretadas bajo un ensayo que mide la resistencia al esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controladas que opone dicho suelo a la penetración y se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para penetrar un pistón de 3 pulgadas cuadradas (plg^2) de área en una muestra de 6 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de altura, establecida a una velocidad de 0.05 pulgadas/minuto y el esfuerzo requerido para introducir el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón de piedra requerida.

2.11.3 Módulo de resiliencia

La propiedad del material que se utilizara para caracterizar el suelo firme para el diseño de pavimentos es el módulo resiliente (M_R). El procedimiento para la determinación del M_R , se detalla profundamente en la AASHTO, método T 274.

El módulo resiliente es una medida de la propiedad elástica del suelo y que se reconocen algunas características no lineales.

El módulo resiliente fue seleccionado para sustituir el valor de soporte suelo utilizado en las anteriores ediciones de la Guía de diseño debido a:

- Indica una propiedad básica del material que se puede utilizar en el análisis mecanicista de un sistema multi-capas para la predicción de la aspereza, agrietamiento, ahuellamiento, fisuras, etc.
- Ha sido reconocido internacionalmente como un método para la caracterización de materiales para su uso en el diseño y evaluación de pavimentos.
- Las técnicas están disponibles para la estimación de las propiedades de M_R , de diversos materiales del lugar del ensayo no destructivo.

Se ha reconocido que muchas agencias no tienen el equipo necesario para realizar la prueba del módulo resiliente. Por lo tanto, se presentan factores adecuados que se pueden utilizar para estimar el M_R , conociendo el valor de CBR, los resultados de las pruebas de índice de suelo. El desarrollo de estos factores se basa en el estado de unas correlaciones conocidas. Una gama de tipos de suelo, saturación y densidades deberían incluirse en el programa de pruebas para identificar sus efectos principales. Las ecuaciones de correlación para la conversión de CBR y resistencia hacia el módulo resiliente se mostraran las adelante.

Heukelom y Klomp han informado de correlaciones entre el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos del valor de CBR, mediante la compactación dinámica, y la in situ. La correlación está dada por la siguiente ecuación:

$$M_R = 1500 * CBR \quad \text{ec. 21}$$

Los datos en los que se desarrolló esta ecuación oscilaron entre 750 y 3000 ensayos CBR aproximadamente. Esta relación ha sido ampliamente utilizada por las consultorías e investigadores y se considera muy razonable para suelos de grano fino con un CBR menor o igual a 10. El CBR debe corresponder a la densidad de campo esperado.

$$M_R = 2555 * CBR^{0.61} \quad \text{ec. 22}$$

Esta ecuación propuesta por el Laboratorio de Investigaciones de transporte y Carreteras (TRRL) de los Estados Unidos y sugiere el uso para valores de CBR mayores a 10.

La colocación de un suelo firme es una consideración importante en lo que respecta al diseño estructural de pavimentos. Con el fin de mejorar la fiabilidad del diseño, es necesario tener en cuenta como un requisito importante la compactación. Sin

embargo, hay algunas situaciones en las que el consultor deber solicitar modificaciones en las especificaciones:

1. Los criterios básicos para la compactación de suelos firmes deben incluir un requisito de densidad apropiada. Los procedimientos de inspección deber ser adecuados para asegurar que la densidad especificada que se alcance durante la construcción.
2. Los suelos que son exclusivamente expansivos deben recibir una consideración especial. Una solución consiste para modificar los efectos perjudiciales debido a la expansión. Los suelos expansivos a menudo pueden mejorarse mediante la compactación a contenidos de agua de 1 o 2 por ciento por encima del óptimo. En algunos casos, puede ser más económico para el tratamiento de suelos expansivos mediante la estabilización con una mezcla adecuada, como por ejemplo: cal o cemento, o para revestir un espesor sustancial en una membrana a prueba de agua para estabilizar el contenido de agua.
3. Problemas con suelos altamente orgánicos están relacionadas con su naturaleza extremadamente compresible y se acentúan cuando los depósitos no son uniformes en propiedades o profundidad. Los depósitos locales, o los de profundidad relativamente baja, son a menudo retirados y reemplazados con un material adecuado. Los problemas asociados con los depósitos más profundos y más amplios se han solucionado mediante la colocación de muros de contención de pre consolidación, en algún momento con las disposiciones especiales para la eliminación rápida del agua para acelerar la consolidación.

4. Disposiciones especiales para los tipos de suelo en condiciones variables, pueden incluir escarificado y re compactación, el tratamiento de una capa superior de los suelos firmes con una mezcla conveniente, utilizando profundidades apreciables de suelos firmes más adecuados (seleccionados o prestados), el exceso de excavación, de corte y colocación de una capa uniforme de material seleccionado en ambas áreas de corte y relleno, o el ajuste en el espesor de la subbase en las transiciones de un tipo de suelo a otro.
5. Aunque el procedimiento de diseño se basa en el supuesto de que se adoptaran disposiciones para el drenaje superficial y sub-superficial, algunas situaciones pueden requerir que se preste especial atención al diseño y construcción del sistema de drenaje. El drenaje es particularmente importante cuando se encuentran flujos de agua, o donde los suelos son particularmente susceptibles a la expansión o la pérdida de fuerza con el aumento de contenido de agua. En un drenaje subterráneo se puede incluir el suministro de una capa adicional de material permeable bajo el pavimento para la interceptación y recogida de agua, desagües y tuberías para la recolección y transmisión de agua. En un drenaje superficial se puede requerir instalaciones tales como diques, zanjas pavimentadas y cunetas.
6. En ciertos suelos firmes se plantean serias dificultades en la construcción. Estos son principalmente los suelos no cohesivos, que se desplazan fácilmente en el material utilizado para construir el pavimento, y los suelos de arcilla húmeda, los cuales no pueden compactarse con altos contenidos de agua debido a los desplazamientos y que requieren largos periodos de tiempo para que alcance un adecuado contenido de agua. Medidas utilizadas para

aliviar estos problemas de construcción pueden ser (1) la mezcla con los materiales granulares, (2) la adición de aditivos adecuados a las arenas para proporcionar cohesión, (3) la adición de aditivos adecuados a las arcillas para acelerar el secado o aumentar la resistencia al corte, y (4) Cubrir con una capa de material seleccionado para actuar como una plataforma de trabajo para la construcción de la estructura del pavimento.

2.11.4 Drenaje (mi)

El tratamiento para un nivel esperado de drenaje para un pavimento flexible se lo realiza mediante el uso de coeficientes de capa. El factor para la modificación del coeficiente de capa se lo relaciona como un valor de m_i , y se ha integrado en la ecuación para determinar el espesor real (D_i), junto al número estructural (SN) y al coeficiente estructural de capa (a_i).

La siguiente tabla presenta la calidad de drenaje para las capas de base y subbase granular de acuerdo a las características del material.

Tabla 18. Calidad de drenaje

CALIDAD DE DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
EXCELENTE	2 horas
BUENO	1 día
REGULAR	1 semana
POBRE	1 mes
MUY MALO	El agua no evacua

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-12

El efecto de drenaje en la capa del pavimento no se toma en cuenta debido a que se lo considera como una capa impermeable.

La siguiente tabla presenta los valores recomendados como una función de la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo durante el año en la que la estructura del pavimento normalmente estaría expuesta a los niveles de humedad cercanos a la saturación. Obviamente, esta última depende de la precipitación anual promedio y las condiciones de drenaje que prevalecen.

Tabla 19. Valores de m_i , recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares para pavimento flexible.

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1%	1 – 5%	5-25%	Más de 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy malo	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-25

2.11.5 Coeficiente estructural de capa (a_i)

Se describe un método para estimar los coeficientes estructurales de capa (valores a_i) recomendados por la AASHTO requeridos para el diseño estructural del pavimento flexible. Un valor se le asigna a cada material de las capas en la estructura con el fin de convertir los espesores reales a números estructurales (SN), y es una medida de la capacidad relativa del material para funcionar como un componente estructural del pavimento y resistir las cargas solicitantes. La siguiente ecuación general para el número estructural refleja el impacto relativo de los coeficientes de capa y de los espesores.

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i \quad \text{ec. 23}$$

2.12 Factores de la subbase

2.12.1 Materiales

En la estructura del pavimento flexible, por encima de la subrasante se encuentra la subbase y consiste en una capa de material granular compactado, se distingue de la subrasante por sus especificaciones estrictas en cuanto a la resistencia, plasticidad y gradación de sus materiales, sin embargo debe ser de menor calidad que la base, por cuestiones de economía. Su función es de soportar y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la superficie de rodadura del pavimento hacia la subrasante absorbiendo las variaciones estructurales a dicho suelo que puedan afectar a la subrasante.

2.12.2 Coeficiente estructural de subbase (a3)

La siguiente figura es una carta establecida por la AASHTO para estimar el coeficiente estructural, con base de uno de cuatro diferentes resultados de pruebas de laboratorio de materiales de subbases granulares, incluyendo el módulo resiliente de la subbase (E_{sbg}).

Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la sub-base granular

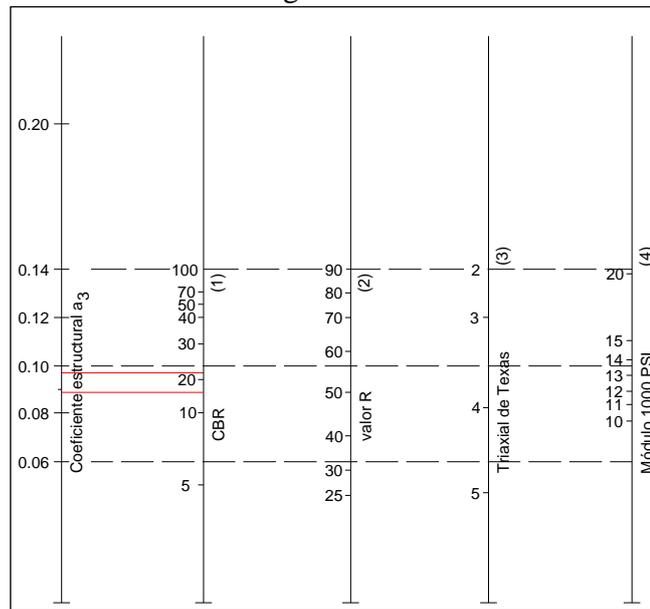


Figura 9. Estimación del coeficiente estructural para subbases granulares
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-21

La siguiente relación puede utilizarse, en reemplazo de la carta de diseño, para determinar el coeficiente estructural de una material de subbase granular (a_3), a partir de su módulo resiliente (E_{sbg}) y de la capacidad de soporte del material (CBR):

$$a_3 = 0.227 \log(E_{sbg}) - 0.839 \quad \text{ec. 24}$$

$$a_3 = 0.058 CBR^{0.19} \quad \text{ec. 25}$$

Dónde:

E_{sbg} : Módulo del material de subbase granular (lb/pulg²)

CBR: Capacidad de soporte del material de subbase granular, (%)

El módulo resiliente del material de subbase se obtiene mediante ensayos de laboratorio y esta principalmente en función del estado de esfuerzos; su ecuación general es:

$$E_{sbg} = K_1 \theta^{K_2} \quad \text{ec. 26}$$

Dónde:

θ : Estado de esfuerzos o sumatoria de los esfuerzos principales, $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (lb/pulg²).

K_1, K_2 : Coeficientes obtenidos en laboratorio; dependen de la calidad de los materiales.

Para materiales de subbase granular, los valores recomendados de los coeficientes de laboratorio son:

Tabla 20. Valores típicos del módulo dinámico del material de subbase granular

Estado de humedad	Ecuación	Estado de esfuerzos, θ (lb/pulg ²)		
		$\theta=5$	$\theta=7.5$	$\theta=10$
Húmedo	$5400 \theta^{0.6}$	14183	18090	21497
Saturado	$4600 \theta^{0.6}$	12083	15410	18312

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-22

En la siguiente tabla se presentan algunos valores de los coeficientes de laboratorio K_1 y K_2 , recomendados por la guía AASHTO para materiales de subbase, en función del estado de humedad del material.

Tabla 21. Valores típicos de K_1 y K_2 para materiales de subbase granular

Condición de humedad	K_1	K_2
Seca	6000 – 8000	0.4 – 0.6
Húmeda	4000 – 6000	0.4 – 0.6
Saturada	1500 – 4000	0.4 – 0.6

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-20

2.13 Factores de la base

2.13.1 Materiales

La capa base es la porción de la estructura del pavimento, que se encuentra ubicado bajo la carpeta asfáltica y sobre la subbase; en el caso de no existir la capa de la subbase sobre la subrasante, cumpliría la función de dar soporte estructural. Transmite y distribuye las cargas generadas por el tránsito, a la subbase. El uso de la capa base puede tener variantes como la estabilización con emulsión asfáltico o con cemento.

La base estará constituido de un material granular de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deber ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, y todas estas propiedades dependerán de proporción de finos con respecto al agregado grueso.

2.13.2 Coeficiente estructural de base (a_2)

La siguiente figura proporciona una carta o nomograma que puede utilizarse para estimar el coeficiente estructural, a_2 , en función de cuatro diferentes resultados de pruebas de laboratorio de materiales de base granular, incluyendo el módulo resiliente de la base (E_{sbg}).

Variación del coeficiente a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular

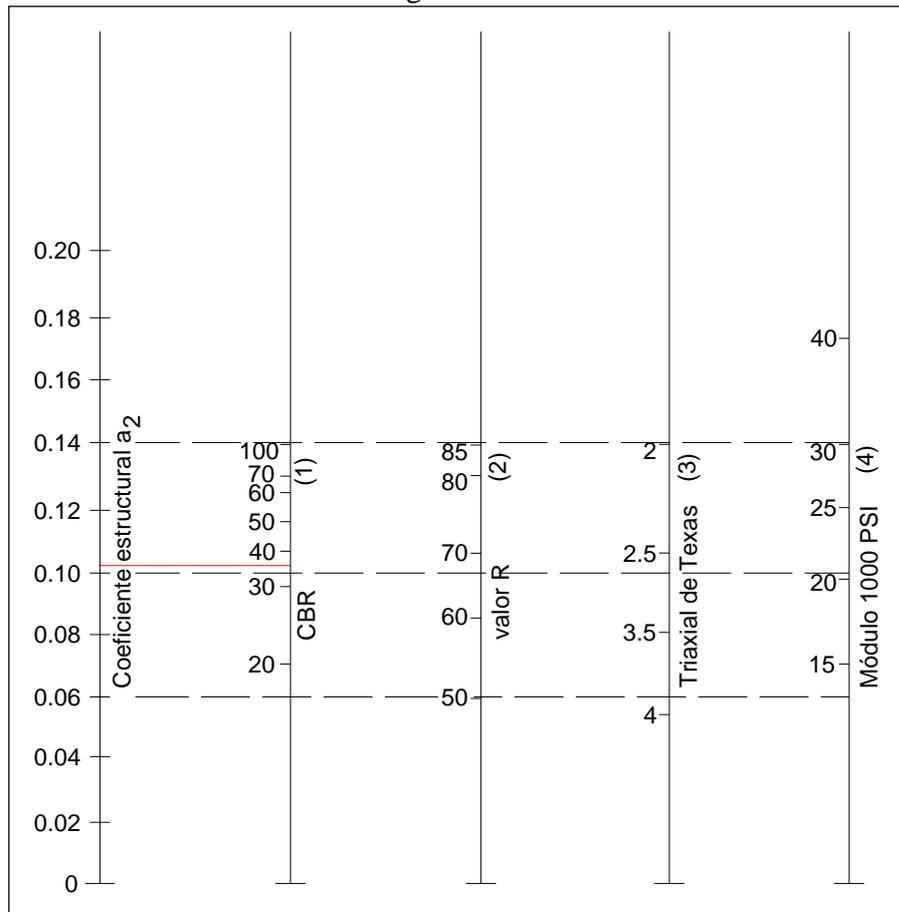


Figura 10. Estimación del coeficiente estructural para bases granulares
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-19

La siguiente relación puede utilizarse en reemplazo de la carta de diseño, para determinar el coeficiente estructural de un material de base granular (a_2) a partir de su módulo resiliente (E_{sbg}) y de la capacidad de soporte del material (CBR).

$$a_2 = 0.249 \log(E_{sbg}) - 0.977 \quad \text{ec. 27}$$

$$a_2 = 0.032 CBR^{0.32} \quad \text{ec. 28}$$

Dónde:

E_{sbg} : Módulo del material de base granular (lb/pulg²)

CBR: Capacidad de soporte del material de base granular, (%)

El módulo resiliente del material de base se obtiene mediante ensayos de laboratorio y esta principalmente en función del estado de esfuerzos; su ecuación general es:

$$E_{sbg} = K_1 \theta^{K_2}$$

ec. 29

Dónde:

θ : Estado de esfuerzos o sumatoria de los esfuerzos principales, $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (lb/pulg²).

K_1, K_2 : Coeficientes obtenidos en laboratorio; dependen de la calidad de los materiales.

Para materiales de subbase granular, los valores recomendados de los coeficientes de laboratorio son:

K_1 : varía de 3000 a 8000.

K_2 : varía de 0.5 a 0.7

Tabla 22. Valores típicos del módulo dinámico del material de base granular

Estado de humedad	Ecuación	Estado de esfuerzos, θ (lb/pulg ²)			
		$\theta=5$	$\theta=10$	$\theta=20$	$\theta=30$
Seco	$8000 \theta^{0.6}$	21012	31848	48273	61569
Húmedo	$4000 \theta^{0.6}$	10506	15924	24136	30784
Saturado	$3200 \theta^{0.6}$	8404	12739	19309	24627

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-20

A continuación se presentan algunos valores para el estado de esfuerzos (θ) en capas de base, en función del módulo resiliente de la subrasante y del espesor de la carpeta asfáltica.

Tabla 23. Valores del estado de esfuerzos para materiales de base granular

Espesor de concreto asfáltico (pulgadas)	Módulo resiliente de la subrasante, M_R (lb/pulg ²)		
	3000	7500	15000
< 2	20	25	30
2 – 4	10	15	20
4 – 6	5	10	15
> 6	5	5	5

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-20

En la siguiente tabla se presentan algunos valores de los coeficientes de laboratorio K_1 y K_2 , recomendados por la guía AASHTO para materiales de subbase, en función del estado de humedad del material.

Tabla 24. Valores típicos de K_1 y K_2 para materiales de base granular

Condición de humedad	K_1	K_2
Seca	6000 – 10000	0.5 – 0.7
Húmeda	4000 – 6000	0.5 – 0.7
Saturada	2000 – 4000	0.5 – 0.7

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-20

2.13.3 Coeficiente estructural de bases tratadas con cemento (a_2)

La siguiente figura proporciona una carta que puede utilizarse para estimar el coeficiente estructural, a_2 , para materiales de base tratados con cemento a partir de su módulo de elasticidad (E_{sbg}) o mediante el valor de su resistencia a la compresión inconfínada a los 7 días.

Variación del coeficiente a_2 para bases tratadas con cemento para diferentes parámetros de resistencia

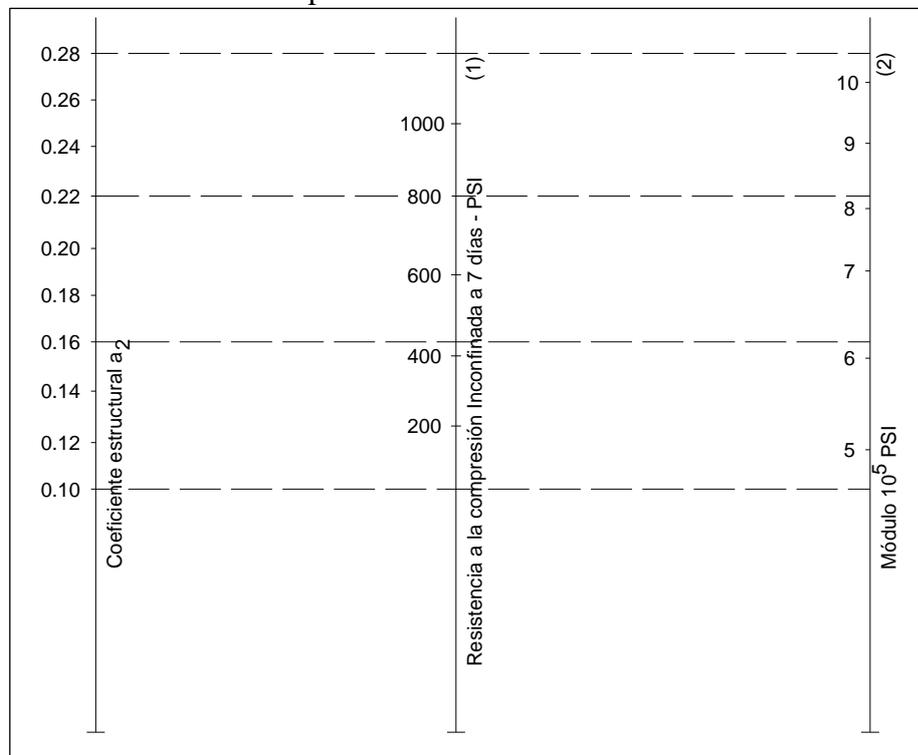


Figura 11. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con cemento

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-23

La siguiente relación puede utilizarse en reemplazo de la carta de diseño, para determinar el coeficiente estructural de un material de base tratada con cemento (a_2) a partir de la resistencia a la compresión.

$$a_2 = 0.0918(f'c)^{0.514} \quad \text{ec. 30}$$

Dónde:

$f'c$: Resistencia a la compresión del hormigón (MPa).

2.13.4 Coeficiente estructural de bases tratadas con asfalto (a_2)

La siguiente figura proporciona una carta que puede utilizarse para estimar el coeficiente estructural, a_2 , para materiales de base tratados con asfalto (base estabilizada con emulsión asfáltica) a partir de su módulo de elasticidad (E_{bee}) o mediante, su estabilidad Marshall.

Variación del coeficiente a_2 para bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia

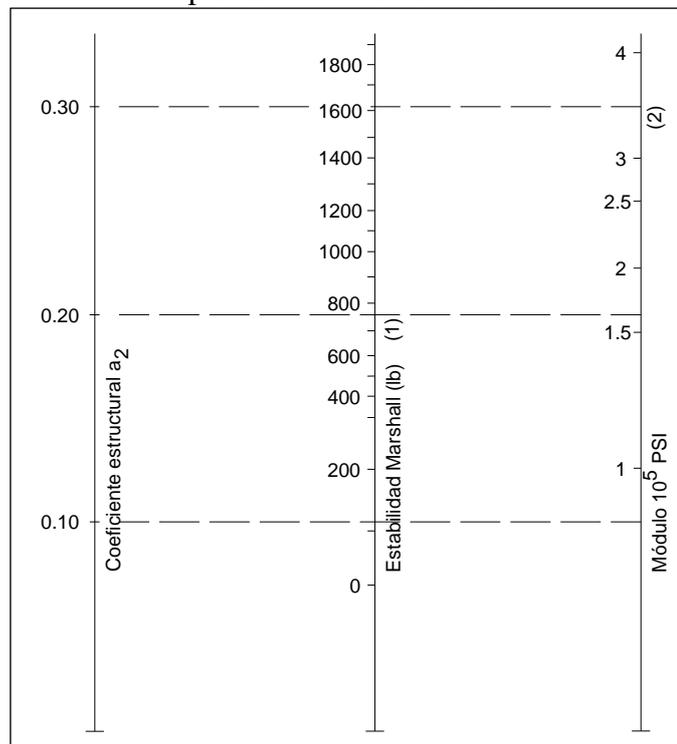


Figura 12. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con asfalto
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-24

La siguiente relación puede utilizarse en reemplazo de la carta de diseño, para determinar el coeficiente estructural de un material de base tratada con asfalto (a_2) a partir de la estabilidad de Marshall.

$$a_2 = 0.0074 EM^{0.415} \quad \text{ec. 31}$$

Dónde:

EM: Estabilidad Marshall de la base tratada con asfalto en Newton (N).

2.14 Factores de la carpeta asfáltica

2.14.1 Materiales

El material bituminoso para la fabricación de la mezcla será una emulsión asfáltica producto de la refinación del petróleo, que unirá a un tipo de agregados de buena calidad, cumpliendo con las normas de Emulsión Aniónica AASHTO M140 y Emulsión Catiónica AASHTO M208.

Los agregados granulares pétreos deben cumplir con las normas AASHTO T96; equivalente de arena AASHTO T176; límite plástico AASHTO T90; límite líquido AASHTO T89, desintegración al sulfato de sodio AASHTO T104, firmeza AASHTO T104, dureza ASTM C131, y deben cumplir con los ensayos de control de calidad estipulados por Norma Ecuatoriana Vial (NEVI 2012) – MTOP Volumen II “ensayos previos”.

2.14.2 Tipos de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas pueden clasificarse de acuerdo al rango de temperatura de construcción, de acuerdo a la granulometría de sus agregados y en función de su utilidad en la estructura del pavimento. La temperatura usada en el diseño de las mezclas se elige por conveniencia en la construcción, dependiendo de las condiciones climáticas prevalecientes en el sitio de obra y la reología del asfalto. La granulometría de la mezcla de agregados es uno de los factores que influyen

directamente en el empaquetamiento de las partículas de agregados y por lo tanto, en las propiedades volumétricas que se necesitan para cumplir con una determinada exigencia de tráfico³.

2.14.3 Módulo dinámico

En el diseño de pavimentos las características elásticas y dinámicas de las capas son de gran importancia, tales como: El módulo dinámico, la relación de Poisson, las cuales pueden ser obtenidas mediante probetas elaboradas en laboratorio o extraídas directamente de las capas de la estructura del pavimento una vez que se hayan colocado.

A continuación se indicaran varios modelos de cálculo:

Una de las formas más frecuentes de obtener el módulo dinámico es mediante datos característicos del ensayo Marshall, especialmente con el valor de la Estabilidad de Marshall.

Tabla 25. Criterios Marshall

Criterio	Tráfico	
	Alto (ESAL's > 1 000000)	
	Min	Max
Numero de golpes por cara	75	
Estabilidad, N	8006	
Flujo, 0.25 mm	8	14
Vacíos de aire, %	3	5
Vacíos lleno de asfalto, %	65	75

FUENTE: NEVI-12. Volumen 3. Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. p. 922

Existen varias maneras prácticos para la obtención de los módulos dinámicos de las carpetas asfálticas, entre los cuales tenemos a los siguientes:

- Ensayos de laboratorio
- Formulas empíricas
- Nomogramas

³ (Pine B, 2011, The Bailey Method. Achieving Volumetric and HMA Compactability, 8. Lexington).

Mediante ensayos de laboratorio los más frecuentes son:

- *Ensayo de compresión inconfiada*

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{ec. 32}$$

Dónde:

E_d : Modulo dinámico

σ_d : Esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en el ensayo de compresión inconfiada

ϵ_r : Deformación elástica recuperable

En las carpetas asfálticas, teniendo en cuenta la susceptibilidad térmica y las cargas de los vehículos, el valor del módulo dinámico dependerá de la temperatura de la mezcla (T) y del tiempo de aplicación de la carga (t).

$$E_d(T, t) = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{ec. 33}$$

- *Ensayos mezclas asfálticas* y requiere de la norma ASTM D3497-79 (2003)
- *Tracción de flexión de una viga cargada en el tercio central*; utilizando la ecuación general:

$$E_s = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \quad \text{ec. 34}$$

Dónde:

E_s : Modulo calculado en el centro de deflexión

P: Es la carga dinámica, con P/2 aplicada en los tercios centrales

L: Longitud de la viga entre apoyos

b: Ancho de la viga

h: Altura de la viga

Δ : Deflexión en el centro de la viga

- *Tracción indirecta* y se requiere de la norma ASTM D4123-82 (95)

$$E_d = \frac{P(\mu+0.2734)}{\delta t_p} \quad \text{ec. 35}$$

Dónde:

E_d : Modulo dinámico (lb/pulg²)

P: Carga dinámica aplicada (libras)

μ : Relación de Poisson

δ : Deformación total recuperable (pulgadas)

t_p : Espesor de la probeta (pulgadas)

El uso de fórmulas generales para la determinación del módulo dinámico para carpetas asfálticas tenemos las siguientes:

Del Instituto del Asfalto

$$E = 100000 * 10^{\beta_1} \quad \text{ec.36}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 f^{-1.1} \quad \text{ec. 37}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_3} \quad \text{ec. 38}$$

$$\beta_3 = 0.553883 + 0.028829(P_{200} f^{-0.1703}) - 0.03476V_v + 0.070377\tau + 0.931757f^{-0.02774} \quad \text{ec. 39}$$

$$\beta_4 = 0.483V_b \quad \text{ec. 40}$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log(f) \quad \text{ec. 41}$$

Dónde:

E: Modulo dinámico (lb/pulg²)

f: Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación (Hertz)

T: Temperatura de la mezcla (°F)

P_{200} : Porcentaje en peso del agregado que pasa el tamiz 200

V_v : Porcentaje en volumen de vacíos con aire en la mezcla

V_b : Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla

τ : Viscosidad del asfalto a 70°F

La viscosidad del asfalto a una temperatura de 70°F se puede estimar por medio de la siguiente expresión:

$$\tau = 29508.2(P_{70^{\circ}F})^{-2.1939} \quad \text{ec. 42}$$

Dónde:

$P_{70^{\circ}F}$: Penetración del asfalto a 70°F (25°C)

Fórmulas de Heukelom y Klomp

Teniendo los datos del módulo dinámico del asfalto (S_b) y los porcentajes en volumen que conforman la mezcla bituminosa, se puede estimar el módulo dinámico de la carpeta asfáltica (S_m) con ayuda de las siguientes formulas:

$$S_m = \left[1 + \frac{2.5}{n} \left(\frac{C_v}{1-C_v} \right) \right]^n \quad \text{ec. 43}$$

$$n = 0.83 \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right) \quad \text{ec. 44}$$

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b} \quad \text{ec. 45}$$

Dónde:

S_m : Modulo dinámico de la mezcla asfáltica (Mpa)

S_b : Modulo dinámico del asfalto (Mpa)

V_b : Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla

V_g : Porcentaje del volumen de agregados de la carpeta asfáltica

Fórmula General de Witczak

Se puede aplicar la ecuación predictiva de Witczak a partir de parámetros volumétricos y de características específicas de los agregados y del ligante asfáltico en un rango de temperaturas (-17.7 a 54.4 °C), y frecuencias de carga (0.1 a 25 Hz).

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \quad \text{ec. 46}$$

Dónde:

E^* : Módulo dinámico de la carpeta asfáltica, psi

V_a : Contenido de vacíos de aire, %

V_{beff} : Contenido de asfalto efectivo, % por volumen.

ρ_{34} : Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg).

ρ_{38} : Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9.53 mm (3/8 pulg).

ρ_4 : Porcentaje retenido acumulado en la malla No. 4.

ρ_{200} : Porcentaje pasando en la malla No. 200.

η : Viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

f : Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación y la altura de la muestra de asfalto y se lo determina de la siguiente manera:

$$t = 10^{(0.005h - 0.2 - 0.94 \log V_{op})} \quad \text{ec. 47}$$

Dónde:

t : Tiempo de aplicación de la carga (segundos.)

h : Espesor probable de la carpeta asfáltica (mm).

V_{op} : Velocidad de operación (km/h).

La frecuencia de aplicación de la carga define el efecto dinámico de la carga a la estructura y se encuentra asociado al tiempo de aplicación de la carga como se indica a continuación:

$$f = \frac{1}{2\pi t} \quad \text{ec. 48}$$

Dónde:

f : Frecuencia de aplicación de la carga (Hz)

t : Tiempo de aplicación de la carga (segundos.)

2.14.4 Coeficiente estructural de carpetas asfálticas (a₁)

La siguiente figura proporciona una carta que puede utilizarse para estimar el coeficiente estructural, a₁, partiendo de su módulo elástico (E_{ca}).

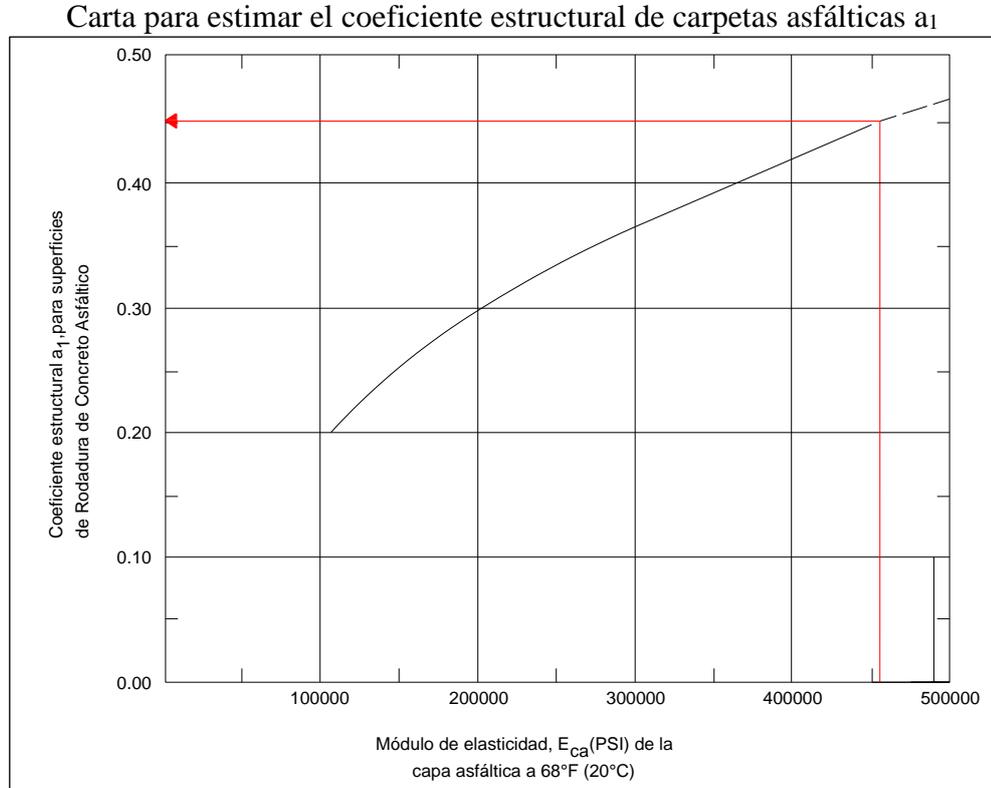


Figura 13. Estimación del coeficiente estructural para bases tratadas con asfalto
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-18

Las siguientes relaciones pueden utilizarse en reemplazo de la carta de diseño, para determinar el coeficiente estructural de las carpetas asfálticas (a₁) a partir de su módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E) o de la Estabilidad de Marshall (EM)

$$a_1 = 0.0052E^{0.555} \quad \text{ec. 48}$$

$$a_1 = 0.0078EM^{0.441} \quad \text{ec. 49}$$

Dónde:

a₁: Coeficiente estructural de carpeta asfáltica.

E: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en Mega Pascal (Mpa).

EM: Estabilidad Marshall en Newton (N).

2.15 Factor clima

La precipitación como elemento del clima, es uno de los más variables, la precipitación al igual que la temperatura, es uno de los elementos climáticos que más influye en la naturaleza y sobre todo en el comportamiento de la estructura del pavimento. Su distribución temporal y espacial condiciona los ciclos agrícolas y forestales, así como el desarrollo de las principales especies vegetales y animales. Esta variable también influye, notoriamente, sobre otros rubros de la económica y el desarrollo en la circulación vial.

La adjetivación de la precipitación se hará, en general, en función de la intensidad media en mm/h durante una hora. Sin embargo, puesto que hay varias clases de precipitación es conveniente establecer distintos adjetivos para la intensidad según la clase de precipitación:

- Llovizna.- En el caso de la llovizna no se hará distinción de intensidad, ya que por su definición la intensidad en mm/h es despreciable. Sin embargo hay que tener cuidado en no confundirla con la lluvia débil.
- Lluvias y chubascos.- En este caso la distribución si puede hacerse en mm/h. se agrupan los dos tipos porque las intensidades pueden ser similares, ya que se diferencian principalmente en la forma de comienzo y final y en las variaciones bruscas de intensidad que se observan en los chubascos.

Débiles.- Cuando su intensidad es menor o igual que 2 mm/h.

Moderadas.- Su intensidad es mayor que 2 y menor o igual que 15 mm/h.

Fuertes.- Son aquellos cuya intensidad es mayor que 15 y menor o igual que 30 mm/h.

Muy fuertes.- Su intensidad es mayor que 30 y menor o igual que 60 mm/h.

Torrenciales.- Para intensidades mayores de 60 mm/h.

A continuación se observará cómo está distribuida la precipitación en la localidad de Santo Domingo de los Tsáchilas, la misma que puede ser representativa para una gran extensión territorial con similares condiciones ambientales y altitudes sobre el nivel medio del mar. (n.m.d.m.).

La siguiente figura indica que la distribución de la precipitación es muy irregular en el transcurso del año y observando que cronológicamente es bimodal por representar dos picos, uno en el primer cuatrimestre y otro en el último cuatrimestre del año; así se observa que en enero hay una importante presencia de lluvia, la misma que se va incrementando de forma paulatina pero constante hasta el mes de abril, luego existe un descenso brusco en la ocurrencia de las precipitaciones y que su presencia va en permanente disminución hasta ser mínima en el mes de agosto; luego, empieza una ligera recuperación desde septiembre y continúa en ascenso hasta el mes de diciembre.

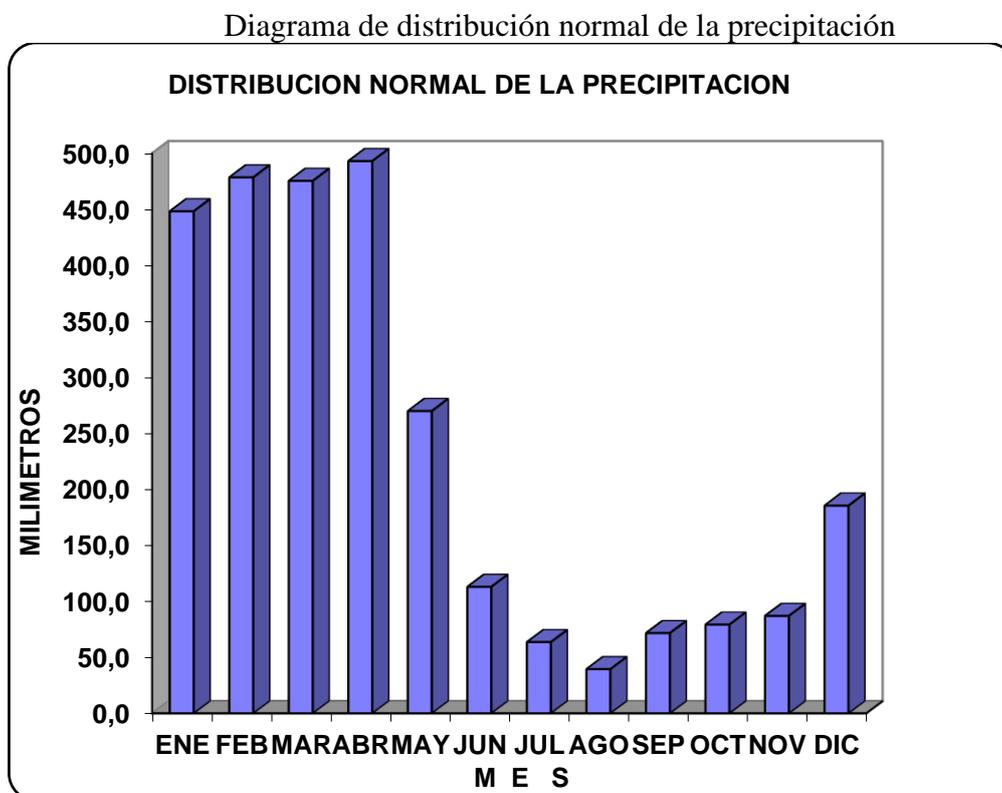


Figura 14. Diagrama del registro histórico de distribución normal de la precipitación de Santo Domingo de los Tsáchilas

FUENTE: Información proporcionado por el Departamento de Aviación Civil del Ecuador

La presencia de lluvias en estos meses, obedece a condiciones propias de la naturaleza de esta zona y región, así como a irrupciones por subsidencia de aire húmedo proveniente desde la cuenca amazónica por niveles altos.

La presencia de lluvias con valores importantes como en diciembre (158.9 mm), hay que recordar que (1 mm) de lluvia equivale a (1 litro de agua por metro cuadrado de superficie) la presencia e incremento de las precipitaciones, se deben a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.T), que es un sistema océano atmosférico que se genera en los océanos y que sigue del sol en un mes de retraso aproximadamente; este sistema atmosférico empieza a emigrar hacia el hemisferio sur, inicios de noviembre, para posicionarse sobre la latitud cero a finales de diciembre, con lo que empieza la influencia de lluvias en la parte norte, centro e inferior del litoral ecuatoriano, los valores promedios de los últimos 35 años demuestra que a medida que desciende hacia la latitud cero y llega hasta los 03° de latitud sur, la presencia de lluvia en este lugar (Santo Domingo de los Tsáchilas) son importantes enero (448.3 mm), febrero (478.5 mm), marzo (475.4 mm) y en abril que es máximo (493.1 mm) y empieza la disminución en mayo (127.3 mm), justamente cuando el sol ya se localiza sobre el hemisferio norte y por supuesto la (Z.C.I.T.), también se encuentra sobre este hemisferio. El promedio anual del valor de la precipitación es de (2780.2 mm).

Por lo tanto al tener un promedio de 8 meses al año de elevadas precipitaciones y categorizando el porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación de la tabla 19, se considera que tendrá un valor superior al 25%.

De manera general los cambios en la temperatura y en la precipitación tienen mucha influencia en la resistencia, durabilidad y capacidad de soporte de los materiales y/o

mezclas del pavimento, así como del material de fundación, a través de varios mecanismos, especialmente en nuestro clima tropical por el fenómeno de hinchamiento.

En el caso de que exista un suelo expansivo, y el diseño de pavimento no lo tome en cuenta como para prevenir sus efectos adversos, la pérdida de serviciabilidad a lo largo del periodo de análisis debe ser estimada y sumada a la pérdida debido a la repetición de las cargas acumuladas.

La siguiente figura muestra, de una manera conceptual, la pérdida de serviciabilidad en relación al tiempo, en este caso por una combinación de hinchamiento y de heladas. (Esto no se aplica en nuestro país).

Carta para estimar la pérdida de serviciabilidad debido al hinchamiento y heladas

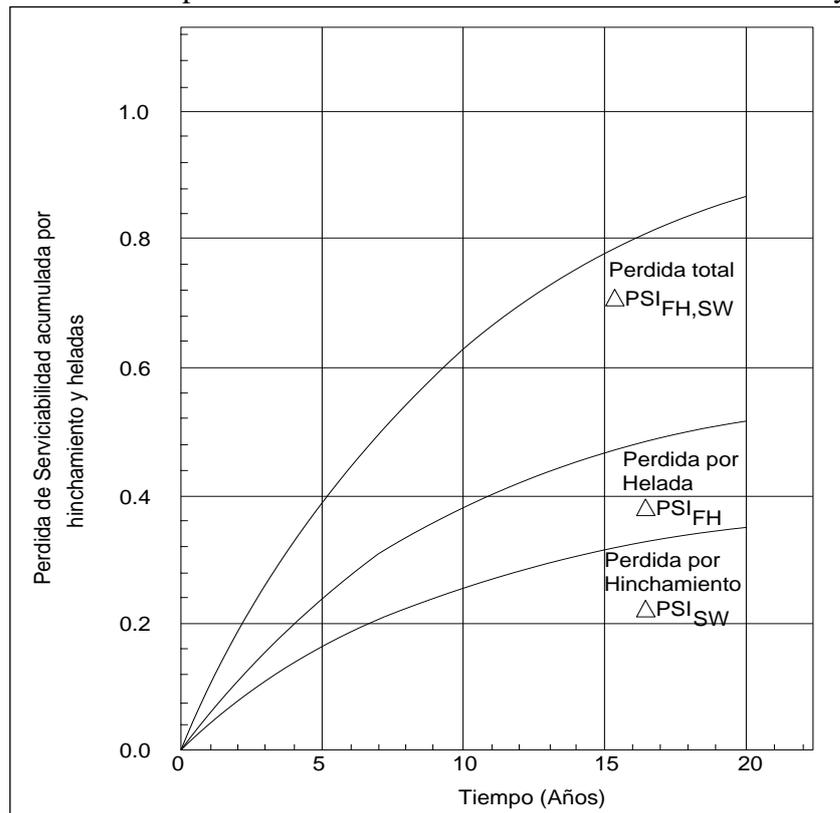


Figura 15. Estimación de la pérdida de serviciabilidad debido al clima
FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-11

2.16 Diseño de espesores

Para determinar el diseño del número estructural (SN) se presenta la siguiente figura con el nomograma recomendado por la Guía de diseño de pavimentos AASHTO 93 para lo cual se requiere las siguientes especificaciones:

- La estimación del tráfico futuro, $N_{8.2}$
- La confiabilidad, R
- El error normal combinado, S_o
- El módulo resiliente para la subrasante, M_R
- La pérdida de serviciabilidad $\Delta PSI = P_o - P_t$

Una vez seleccionado el número estructural SN es recomendable identificar una serie de espesores de capa de pavimento, las cuales, combinadas proveerán de capacidad estructural al pavimento y podrán soportar la carga de diseño.

La siguiente ecuación es base fundamental para convertir los valores de SN en espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad \text{ec. 50}$$

Dónde:

a_1, a_2, a_3 : coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica, base y subbase respectivamente.

D_1, D_2, D_3 : Espesor requerido (en pulgadas) de la carpeta asfáltica, base y subbase respectivamente.

m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje para capa de base y subbase respectivamente.

El uso de la ecuación para SN o del monograma no tiene una solución única, debido a que pueden existir varias combinaciones con distintos espesores de capas que pueden ser soluciones satisfactorias para la estructura de pavimento.

Nomograma recomendado por la AASHTO para determinación del número estructural

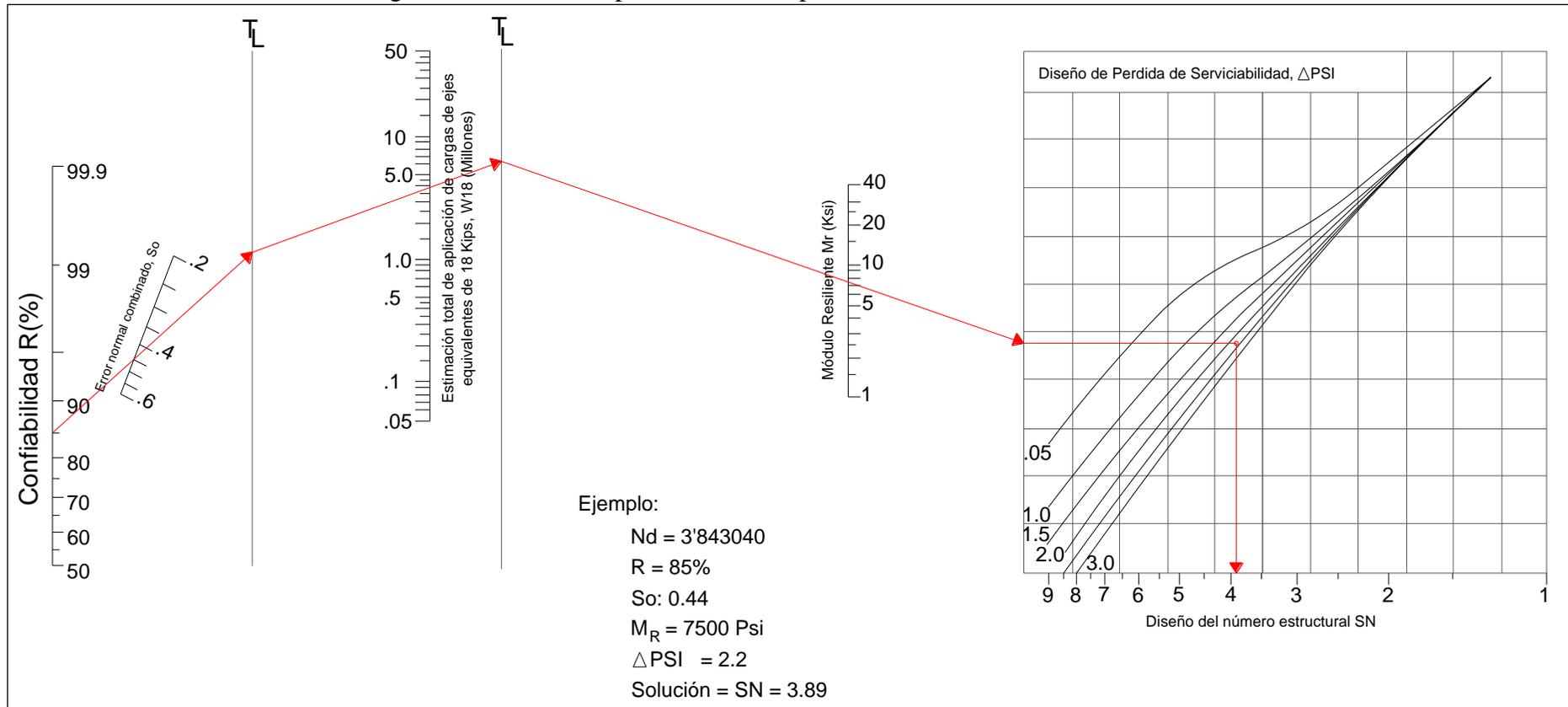


Figura 16. Nomograma para determinar el número estructural necesario para el diseño de espesores de capas

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-32

Una vez determinado el espesor de las capas del pavimento flexible se deberá redondear hacia un valor entero o media pulgada. Al seleccionar valores apropiados para los espesores de capa, será necesario tener en cuenta el factor económico junto con las limitaciones de construcción y mantenimiento a fin de evitar que se produzca un diseño antieconómico. A continuación se muestra la tabla con valores de espesores mínimos prácticos para la carpeta asfáltica y de base granular.

Tabla 26. Espesores mínimos recomendados para diseño de espesores de capas

Espesores mínimos (pulgadas)		
Tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18 kips)	Carpeta Asfáltica	Base Granular
Menor a 50000	1 o Tratamiento superficial	4.0
50001 – 150000	2.0	4.0
150001 – 500000	2.5	4.0
500001 – 2 000000	3.0	6.0
2 000001 – 7 000000	3.5	6.0
Mayor a 7 000000	4.0	6.0

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-35

La estructura de pavimento flexible debe ser diseñada de acorde con los principios mostrados en la siguiente figura. Como primer paso el número estructural requerido sobre la subrasante debe ser calculado y luego se harán los ajustes requeridos con la utilización de las siguientes ecuaciones:

Procedimiento para determinar el espesor de las capas del pavimento

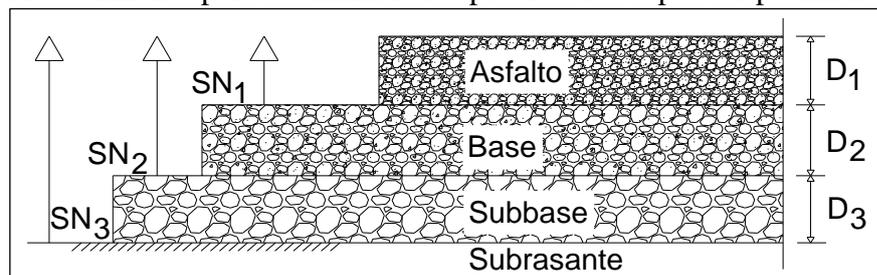


Figura 17. Determinación de espesores de capas usando el enfoque de análisis de capas

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. p. II-36

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad \text{ec. 51}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1 \quad \text{ec. 52}$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2} \quad \text{ec. 53}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2 \quad \text{ec. 54}$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3} \quad \text{ec. 55}$$

$$D_4^* \geq \frac{SN_4 - (SN_3^* + SN_2^* + SN_1^*)}{a_4 m_4} \quad \text{ec. 56}$$

Dónde:

D, a, m y SN son los valores previamente definidos.

D*, SN* indica que representa el valor actualmente usado, que debe ser igual o mayor al valor requerido.

2.17 Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida para pavimento flexible.

Para lo cual se calculara el valor SN usando la ecuación general de diseño AASHTO 93 para pavimentos flexibles; ec. 3:

$$\text{Log}_{10}(N) = Z_r * S_o + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(M_R) - 8.07$$

TRANSITO:

N = 3843040 repeticiones de ejes equivalentes que pasaran para el tiempo de diseño del pavimento.

$$\text{Log}(N) = 6.5846$$

CONFIABILIDAD

Nivel de confiabilidad del 85% por ser una vía colectora y por tratarse de una vía asfaltada de bajo volumen (R=85% y $Z_R = -1.037$)

ERROR NORMAL COMBINADO

Se adopta ($S_o = 0.44$) recomendado por ser una construcción nueva.

INDICE DE SERVICIABILIDAD

El índice de serviciabilidad inicial recomendado por la AASHTO es de 4.2,

El índice de serviciabilidad final asumido para la caracterización del índice de serviciabilidad es de 2.0

Usando la ec. 20 queda de la siguiente manera:

$$\Delta PSI = P_t - P_o$$

$$\Delta PSI = 4.2 - 2.0$$

$$\Delta PSI = 2.20$$

En el caso de detectarse hinchamiento en la subrasante, se deberá calcular la pérdida de serviciabilidad por hinchamiento mostrado en la figura 15; valor que deberá ser restado del ΔPSI .

Para el caso de suelos de mala calidad, tales como A-6, A-7 o cuando se obtiene un suelo de cimentación con un valor de CBR menor a 7, se deberá incluir una capa superior de mejoramiento con un CBR igual o mayor a 20%.

Para la estimación del SN de la subrasante el valor del CBR obtenido en campo es de 5% por lo tanto para obtener el módulo resiliente se utiliza la ec. 21:

$$M_R = 1500 * CBR$$

$$M_R = 1500 * 5\%$$

$$M_R = 7500 \text{ Psi}$$

Reemplazando las variables de la ecuación general de diseño queda la siguiente expresión:

$$6.5846 = -1.037 * 0.44 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{2.20}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(7500) - 8.07$$

Para determinar el valor de variable SN (conocido como numero estructural) se puede realizar mediante el reemplazo de distintos valores numéricos en la ecuación anteriormente descrita hasta lograr la igualdad dicha ecuación, a este proceso se le

conoce como interacción o mediante el Monograma para determinar el número estructural de la figura 16; por tanto el valor $SN = 3.89$ (SN requerido para la determinación de los espesores de capas y deberá ser menor o igual al SN calculado). En relación con el coeficiente de drenaje y considerando que el sector de la Mulaute – La Florida es de alta pluviosidad, se asume una calidad de drenaje Regular (ver Tabla 18) y que más del 25 por ciento de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Considerando esto, se puede elegir un valor de $m_i = 0.80$ (ver Tabla 19).

Para la estimación del SN del **mejoramiento** el valor de CBR min por especificación MOP = 20%

Para la determinación del módulo resiliente para valores de CBR mayores al 10% se utiliza la ec. 22.

$$MR = 2555 * CBR^{0.61}$$

$$MR = 2555 * 20^{0.61}$$

$$MR = 15886 \text{ Psi}$$

Coefficiente estructural $k = 0.089$ de acuerdo a la figura 9

Coefficiente de drenaje = 0.8 (Se considera agregados de origen sedimentario regular)

Reemplazando las variables de la ecuación general de diseño queda la siguiente expresión:

$$6.5846 = -1.037 * 0.44 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{2.20}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(15886) - 8.07$$

El valor de $SN = 3.01$

Para la estimación del SN de la **subbase granular** el valor del CBR min por especificación MOP = 30%, se utiliza la ec. 22

$$MR = 2555 * CBR^{0.61}$$

$$MR = 2555 * 30^{0.61}$$

$$MR = 20344 \text{ Psi}$$

Coeficiente estructural 3 = 0.097 de acuerdo a la figura 9

Coeficiente de drenaje = 1.0 (Se considera agregados de origen sedimentario Bueno)

Reemplazando las variables de la ecuación general de diseño queda la siguiente expresión:

$$6.5846 = -1.037 * 0.44 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{2.20}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(20344) - 8.07$$

El valor de SN = 2.75

Para la estimación del SN de la **base granular** el valor del CBR min por especificación MOP = 80%, se utiliza la ec. 22

$$MR = 2555 * CBR^{0.61}$$

$$MR = 2555 * 80^{0.61}$$

$$MR = 37006 \text{ Psi}$$

Coeficiente estructural 2 = 0.11 de acuerdo a la figura 10

Coeficiente de drenaje = 1.2 (Se considera agregados de origen sedimentario excelente)

Reemplazando las variables de la ecuación general de diseño queda de la siguiente expresión:

$$6.5846 = -1.037 * 0.44 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{2.20}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \text{Log}(37006) - 8.07$$

El valor de SN = 2.22

Características de la mezcla asfáltica

La siguiente información fue brindada por la Prefectura de Santo Domingo de los Tsáchilas del Departamento de Obras Publicas basado en las características de la mezcla asfáltica y de los materiales granulares que se utilizan frecuentemente en el diseño y construcción de vías del sector.

% agregados: 85.5%

% de asfalto: 11%

% de vacíos: 3.5%

Retenido en Tamiz 3/4": 1%

Retenido en Tamiz 3/8": 10%

Retenido en Tamiz 4: 22%

Pasa Tamiz 200: 4%

Penetración del asfalto a 25°C: 57 décimas de milímetros

Índice de penetración: -0.8

Hay que tener en cuenta que la temperatura de ensayo de la mezcla asfáltica está en función de la temperatura media anual que es de 23.5°C

Velocidad de circulación: 60 Km/h

Espesor probable de la carpeta asfáltica: 20 cm

Utilizando la ecuación 47 y 48 para determinar la frecuencia de aplicación de carga

$$t = 10^{(0.005(200) - 0.2 - 0.94 \log(60))}$$

$$t = 0.134 \text{ s.}$$

$$f = \frac{1}{2\pi(0.134)}$$

$$f = 1.184 \text{ Hz}$$

Frecuencia de carga: 1.184 Hertz

Viscosidad del ligante: 3.33 Poises

Utilizando la ecuación 46 para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica:

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a -$$

$$0.802208 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a} \right) + \frac{3.871977-0.0021\rho_4+0.003958\rho_{38}-0.000017(\rho_{38})^2+0.005470\rho_{34}}{1+e^{(-0.603313-0.31335 \log(f)-0.393532 \log(\eta))}}$$

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932 * 4 - 0.001767(4)^2 - 0.002841 * 22 - 0.058097 * 3.5 -$$

$$0.802208 \left(\frac{11}{11+3.5} \right) + \frac{3.871977-0.0021*22+0.003958*10-0.000017(10)^2+0.005470*1}{1+e^{(-0.603313-0.31335 \log(1.184)-0.393532 \log(3.33))}}$$

$$\log E^* = 2.964682414 + \frac{3.869127}{1.43523378}$$

$$\log E^* = 5.660474482$$

$$E = 10^{5.660474482}$$

$$E = 457587 \text{ PSI}$$

$$E = 32179.2 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 3155 \text{ Mpa}$$

Una vez conocido el valor del Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, y de acuerdo con la figura 13 obtenemos el valor del coeficiente estructural $a_1 = 0.451$

Resumen de valores SN

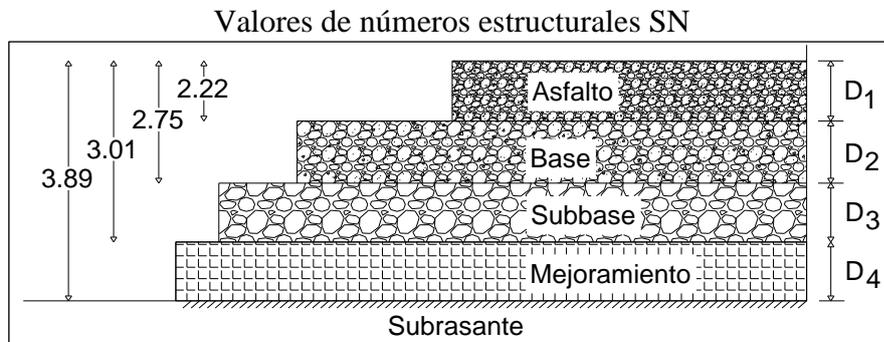


Figura 18. Modelo de números estructurales según la capa analizada
FUENTE: Propia

Determinación de los espesores Di

Calculo del espesor de la carpeta asfáltica (D₁):

$$SN1 = a_1 * D_1$$

Utilizando la ec. 51

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$D_1^* \geq \frac{2.22}{0.451}$$

$$D_1^* = 4.92 \text{ plg.}$$

Calculo del espesor de la capa Base granular (D₂):

$$SN_2 = SN_1 + a_2 * D_2 * m_2$$

Utilizando la ec. 53

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$D_2^* = \frac{2.75 - 2.22}{0.11 * 1.2}$$

$$D_2^* = 4.01 \text{ plg.}$$

Calculo del espesor de la capa Subbase granular (D₃):

$$SN_3 = SN_1 + SN_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Utilizando la ec. 55

$$D_3^* \geq \frac{(SN_3 - (SN_2^* + SN_1^*))}{a_3 m_3}$$

$$D_3^* = \frac{(3.01 - (0.53 + 2.22))}{0.097 * 1.0}$$

$$D_3^* = 2.68 \text{ plg.}$$

Calculo del espesor de la capa Mejoramiento (D₄):

$$SN_4 = SN_1 + SN_2 + SN_3 + a_4 * D_4 * m_4$$

Utilizando la ec. 56

$$D_4^* \geq \frac{(SN_4 - (SN_3^* + SN_2^* + SN_1^*))}{a_4 m_4}$$

$$D_4^* = \frac{(4.62 - (0.30 + 0.63 + 2.68))}{0.089 * 0.8}$$

$$D_4^* = 12.36 \text{ plg.}$$

Comentario: Para llevar a cabo la comparación de ambos métodos de diseño se empleara los espesores calculados teóricamente para el espesor de la carpeta asfáltica y el espesor mínimo tomando en cuenta la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93 (tabla 26) que recomienda emplear los espesores mínimos prácticos para la carpeta asfáltica y base granular en función de los ejes equivalentes de 18 kips.

Tabla 27. Espesores teóricos para cumplir con el SN requerido

	Asfalto	Base	Sub-base	Mejoramiento
Di (plg)	4.92	4.01	2.68	12.36
ai	0.451	0.11	0.097	0.089
mi	-	1.20	1.00	0.80

SN =	$a1 \cdot D1 + a2 \cdot D2 \cdot m2 + a3 \cdot D3 \cdot m3 + a4 \cdot D4 \cdot m4$						
SN =	2.22	+	0.53	+	0.26	+	0.88
SN =	3.89						

SN requerido =	3.89
----------------	------

FUENTE: Propia

Hay que tener presente que la solución no es única, debido a que se debe determinar los espesores mínimos prácticos; siempre y cuando esté presente la consideración de mantener una viabilidad económica aceptable de acuerdo al tipo de proyecto e importancia de la obra e incluso conociendo si dichos valores cumplan con los esfuerzos y deformaciones admisibles, como se verá más adelante.

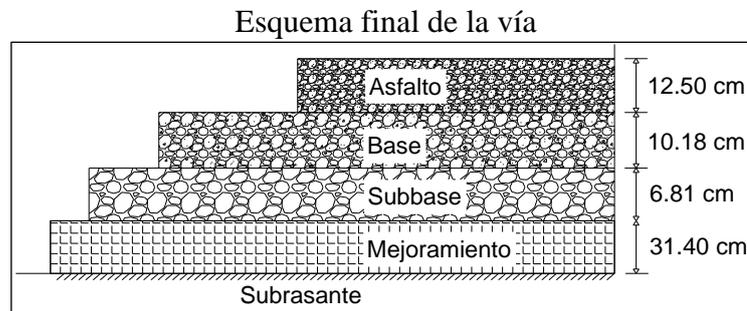


Figura 19. Resultado de espesores teóricos para el diseño estructural de la vía – Método AASHTO 93

FUENTE: Propia

CAPITULO 3

3. MODELO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE – MEPDG 2008

3.1 Fundamento teórico

Conocido en el mundo investigativo como método de diseño Empírico – Mecanicista y como uno de los métodos más prometedores para el diseño estructural de vías nuevas y rehabilitadas. Hay estudios que señalan a Sudáfrica como uno de los primeros países en reconocer este sistema en los años 70; en Dinamarca se lo reconoció como el método Estándar de diseño, luego adoptado por la Shell que introdujo estos conceptos en los Estados Unidos por el Instituto de Asfalto en 1982. El uso de estos conceptos paso por mucho tiempo estancado por su dificultad en la determinación de los módulos elásticos de los materiales que conforman la estructura del pavimento.

La falta de relación en los conceptos que en su momento existieron sobre estos materiales debido al cambio de sus variables de entrada condujo a resultados inciertos, cálculos poco realistas y sobre todo por falta de experiencia que en aquel tiempo no tenían para su fundamento.

Estas variables de entrada se relacionan directamente a los factores climáticos y sobre todo a las características propias de los materiales.

Debido a todo esto, hacia el año de 1996 la AASHTO JTFP (Joint Task Force on Pavements) o Grupo de trabajo conjunto sobre pavimento de la AASHTO; recolecta todas las experiencias de la ingeniería de pavimentos extraída de los organismos viales y en cooperación con NCHRP (National Cooperative High Research Program) o Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Autopistas y en colaboración con la ayuda del gobierno de turno, ayudo al fortalecimiento de las bases

fundamentales para el método de diseño Empírico – Mecanicista conocido como el Proyecto 1-37A.

El objetivo clave del proyecto 1-37A en el desarrollo de Guía de diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados de pavimentos del 2002 “Fase II” fue el desarrollo de una guía que utilice bases de modelos mecanicistas existentes y datos basados que reflejen el estado actual de la estructura del pavimento y sobre todo proporcionar una equidad en la base de diseño para todos los tipos de pavimentos.

Este nuevo enfoque se lo conoce como MEPDG (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide) o Guía de diseño de pavimentos Empírico – Mecanicista que se completó en el 2004 y lanzado al público para su revisión y evaluación.

Una revisión formal de la guía se llevó a cabo en el 2007 en conjunto con el proyecto NCHRP 1-40A dando lugar a nuevas mejoras y que han sido incorporadas en el MEPDG bajo el nombre del proyecto 1-40D y con la introducción de un nuevo software versión 1.0.

3.2 Generalidades

El Método Empírico – Mecanicista junta dos grandes etapas de análisis para el diseño de pavimentos; las propiedades de los materiales y los respectivos análisis matemáticos que se utilizaran para predecir esfuerzos, deformaciones y deflexiones (conocidas en la guía como respuestas) dentro del pavimento cuando se somete a cargas de tránsito y los cambios de temperaturas producidas por el clima. Este primer análisis se basa en las leyes físicas de la mecánica. (MECANICISTA).

En la etapa mecanicista, se podrá utilizar soluciones analíticas (Burmister, Boussineq), la teoría de Elementos finitos o la Teoría elástica multicapa.

El conjunto de modelos utilizan los valores de las respuestas calculados para predecir empíricamente el comportamiento del pavimento. Esta predicción se determina a través de los daños acumulados o fallas observadas en los pavimentos flexibles.

Esta etapa se la conoce como: Etapa EMPIRICA, y depende de la predicción estadística sobre la condición del pavimento en un tiempo dado, y de la base de las respuestas críticas obtenidas.

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo de las etapas del proceso de análisis y diseño de la MEPDG.

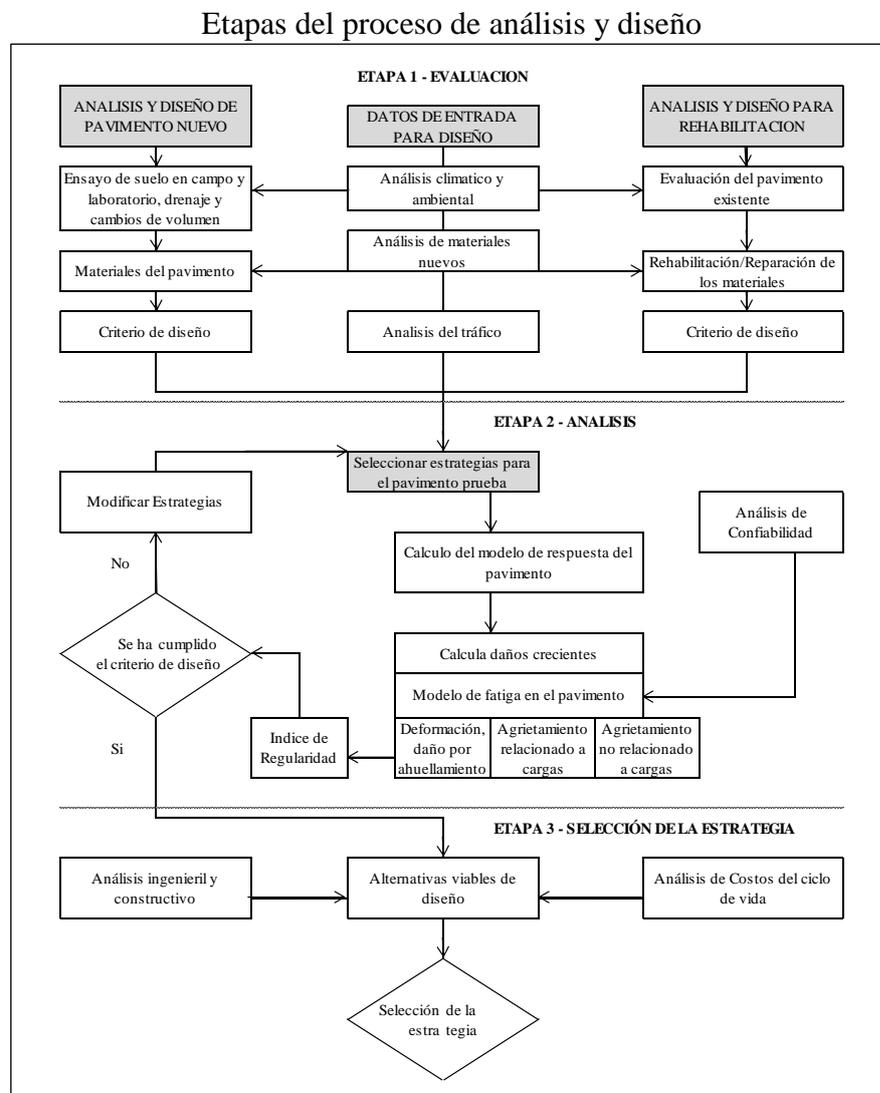


Figura 20. Diagrama de flujo de las tres etapas del proceso de diseño y análisis de la MEPDG.

FUENTE: AASHTO Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, 2008, p 2

Los pasos básicos para el proceso de diseño de pavimentos de MEPDG se describen a continuación:

1. **Selección de la estrategia para el diseño de prueba.** En este paso el ingeniero diseñador puede utilizar la Guía AASHTO 1993 o cualquier procedimiento de diseño con el objetivo de definir la sección transversal del diseño de prueba.
2. **Selección de los criterios adecuados de desempeño (umbral), para los indicadores y el nivel de confiabilidad de diseño del proyecto.** Los criterios de diseño o indicadores de desempeño deben incluir la magnitud de los principales deterioros como la fatiga y la regularidad superficial del pavimento (IRI), los cuales son los principales causantes de una rehabilitación o reconstrucción vial.
3. **Obtención de todos los datos de entrada para el diseño de prueba del pavimento bajo consideración.** Los datos de entrada se agrupan en seis amplios temas: información general del proyecto, criterios de diseño, tráfico, clima, estructura de capas y propiedades de los materiales (incluyendo las características de diseño)
4. **Ejecución de un Software que simplifique el análisis mecánico** En este paso se examinan los datos de entrada para verificar el correcto ingreso de los mismos, además de la respectiva evaluación de los parámetros arrojados en la salida correspondientes a los indicadores de desempeño.
5. **Revisión del diseño de prueba, si fuese necesario.** Si el diseño de prueba adoptado contiene errores de entrada, anomalías en las respuestas del material, se reevalúa, cambiando los datos de entrada del diseño de prueba en

el software de una manera iterativa hasta que los criterios desempeño se cumplan satisfactoriamente.

3.3 Nivel jerárquico

El nivel jerárquico de los datos que se ingresan en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico – Mecanicista y que se relacionan con el nivel de confiabilidad deseada por el ingeniero diseñador o por el tipo de vía a ser diseñada. Si el nivel de jerarquía es alto, los datos a ser requeridos también tendrán que ser de mayor jerarquía. Esta nueva técnica es aplicada a los datos asociados con el tráfico y los materiales como se describe a continuación:

Nivel de entrada 1: Este nivel representa el mayor grado de conocimiento para brindar un mayor nivel de confianza al diseño pero tiene el más alto nivel de costos de recopilación de información y pruebas para determinar el valor de entrada. Este nivel debería ser usado en vías principales con altos niveles de tráfico o para diseños de pavimentos donde se presenten características inusuales, o bien para materiales o condiciones de tráfico que estén fuera del espacio de interferencia.

Nivel de entrada 2: Este parámetro es calculado a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión, los datos de entrada son particularmente tomados de estudios realizados en el medio o parámetros que son más económicos. Considerado como un nivel estándar para diseños rutinarios.

Nivel de entrada 3: El parámetro de entrada está basado en valores “estimados” o por defecto. Están basados en valores globales o regionales por defecto. El valor de la media estadística de un grupo de datos con características similares. Este nivel tiene el menor grado de conocimiento sobre el parámetro de entrada para el proyecto específico pero tiene los costos más bajos de ensayos y recopilación de datos.

3.4 Factores que intervienen en los datos de entrada

3.4.1 Transito

De acuerdo a la caracterización jerárquica se puede resumir de la siguiente manera:

Para el nivel 1.- Requiere el uso de información específica del tráfico del sitio, incluyendo clasificaciones vehiculares por clase, por dirección y carril. Conteos horarios, diarios, semanales y mensuales, en sitios de Pesaje, peajes, gasolineras, etc.

Para el nivel 2.- Similar al nivel 1, pero acepta distribuciones locales o regionales del espectro de carga para cada clase de vehículo.

Para el nivel 3.- No requiere información específica del tránsito del sitio, se puede resumir mediante información general de organismos viales de la zona.

Considerando la información brindada por la Unidad de Titulación y una vez que hemos definido los niveles jerárquicos, se decide realizar el análisis para el nivel de entrada 2.

En el caso de aplicación para el presente análisis, el TPDA ha sido determinado por un conteo de 7 días, 12 horas.

Evaluar el efecto del tránsito en los pavimentos ha sido complejo debido a la diversidad de cargas, velocidades de circulación y a su peso, la correcta caracterización de los vehículos que circulan es fundamental para predecir con mayor confiabilidad el deterioro del pavimento y garantizar un buen desempeño en la vida útil del mismo. En este nuevo método no se toma en cuenta el concepto de ejes equivalentes y más bien se deberá definir al tráfico y este como tal representarlo como un “*Espectro de Carga*” que es la relación del número de ejes de un mismo valor de carga entre el número total del mismo tipo de eje, expresado en porcentaje; calculados para cada tipo de eje simple, eje simple rueda doble, eje tándem y eje

tridem) y para lograr esta caracterización se usara el concepto de la matriz de ejes de carga.

Los vehículos clasificados de acuerdo al MTOP y que tienen las siguientes características de ejes y cargas se muestran en el Anexo B - Tabla de Pesos y dimensiones.

Tabla 28. Matriz de ejes de carga

Tipo de Vehículo	TPDA veh/día	%	Total veh/día	Número de repeticiones de carga por eje			
				Eje simple – Rueda simple (7t.)	Tándem (20t.)	Eje Simple – Rueda doble (11t.)	Tridem (24t.)
2DB	300	25%	75	331579		331579	
3A		25%	75	331579	331579		
T3 – S3		25%	75	331579	331579		331579
Sumatoria				994737	663158	331579	331579

FUENTE: Propia

El espectro de carga es la representación de la carga real por tipo y sobre todo de cada eje y como estas llevan a la reducción de la vida útil del pavimento flexible.

Para la determinación del número de repeticiones de carga por eje se utilizó la ecuación 12 como se muestra el siguiente ejemplo para un vehículo 2DB eje simple rueda simple:

$$N = 75 * 365 * 0.5 * 1.0 * \frac{(1 + 0.0197)^{20} - 1}{0.0197}$$

$$N = 331579 \text{ Número de repeticiones del eje simple de 7 toneladas}$$

Esto quiere decir que el espectro de carga para un vehículo 2DB para el eje simple tiene 33% de probabilidad de producir daño al pavimento con respecto al paso total del mismo tipo.

Aunque en la realidad la falta de censos de carga por eje, se deberá hacer un análisis de la composición vehicular, incluyendo la configuración de las cargas pesadas.

3.4.1.1 Características generales para el tránsito.

La mayor parte de información sobre los valores de entrada se define con la configuración de carga detallada anteriormente y que permitirá determinar las respuestas del pavimento mediante los espectros de carga tomados de cada tipo de vehículo con su respectiva descripción general, número de ruedas y su peso máximo por eje.

3.4.1.2 Configuración del Eje

Una serie de elementos son necesarios para describir la configuración del neumático y la carga de eje que se aplicaran al pavimento porque las respuestas calculadas son generalmente sensibles a la localización de ruedas y la interacción entre las distintas ruedas del eje.

Estos datos pueden ser obtenidos directamente de las bases de datos del fabricante o medidos directamente en campo. Los valores son proporcionados para cada uno de los siguientes elementos:

3.4.1.3 Ancho promedio del eje

Es la distancia medida frontal desde los bordes externos de un eje, para un vehículo estándar se recomienda usar el valor de 8.5 ft; aproximadamente 2.59 m.

Valor recomendado por la MEPDG para el ancho del eje

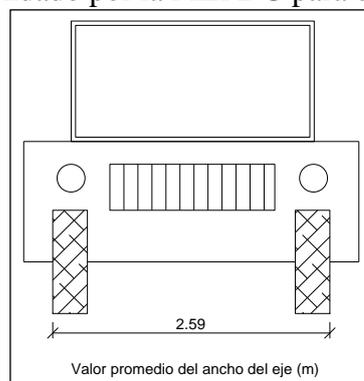


Figura 21. Valor promedio del ancho del eje

FUENTE: Propia

3.4.1.4 Espaciado para un eje doble rueda

Es la distancia medida frontal de eje a eje de un doble neumático, para un eje doble rueda se recomienda usar el valor de 12in; aproximadamente 30.48 cm.

Valor recomendado por la MEPDG para la separación para un eje doble rueda

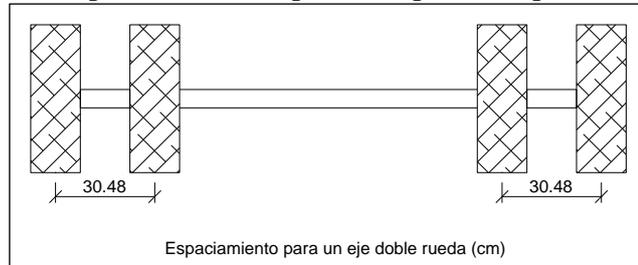


Figura 22. Espaciado para un eje doble rueda
FUENTE: Propia

3.4.1.5 Separación de ejes

Es la distancia medida entre los dos ejes consecutivos del Tandem y Tridem, la separación media para un eje Tandem es de 51.6 pulgadas y 49.2 pulgadas para un eje Tridem aproximadamente 131.06 cm y 124.97 cm respectivamente.

Valores recomendados por la MEPDG para separación entre ejes Tandem y Tridem

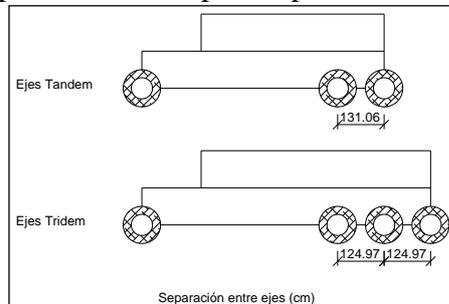


Figura 23. Separación de ejes
FUENTE: Propia

3.4.1.6 Distancia entre eje delantero y eje trasero

Es la distancia medida lateral del vehículo de eje a eje y estos valores son obtenidos directamente del fabricante o pueden ser medidos en campo. La guía recomienda para el cálculo de respuestas del pavimento el uso de los siguientes valores de acuerdo a los siguientes tipos de ejes:

- Ejes pequeños: 12 ft; aproximadamente 3.66m.
- Ejes medianos: 15ft; aproximadamente 4.57m.

- Ejes grandes: 18 ft; aproximadamente 5.49m.

Valores recomendados por la MEPDG para cálculo de respuestas del pavimento

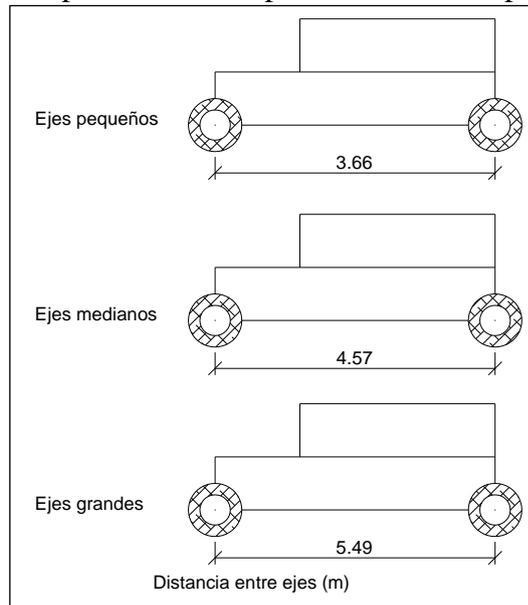


Figura 24. Distancia entre ejes

FUENTE: Propia

3.4.1.7 Deriva del tránsito

Este concepto indica que no todas las ruedas de un vehículo pasan por la misma sección del pavimento, en lo cual esto ayuda a determinar tensiones y deformaciones, dado que por un punto en estudio pasa un porcentaje del total de las cargas.

La guía MEPDG recomienda tomar el valor de 10 in; aproximadamente 25 cm para un nivel de entrada 2.

3.4.1.8 Dimensiones del neumático y presión de inflado

Estos elementos son importantes en los modelos de predicción del rendimiento sobre el pavimento. Las dimensiones y presión de inflado del neumático varían de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes y el uso que se le brinde al vehículo. Las opciones varían cuando el vehículo se encuentra descargado o cuando se encuentra cargado. Valor recomendado por defecto: 120 psi, equivalente a 840 Kpa. 8.4 Kg/cm².

3.4.1.9 Localización de puntos de análisis para el cálculo de deterioros

Para el modelo de respuesta del pavimento se debe buscar la localización que produzca el mayor deterioro para cada respuesta del pavimento, de acuerdo con la configuración del eje, debido a que la presión ejercida por el peso del vehículo en cada eje es variable de acuerdo a sus puntos críticos. A continuación se muestran los puntos a hacer analizados por cada tipo de eje:

Localización de puntos críticos

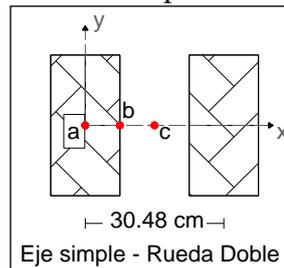


Figura 25. Localización de puntos de análisis para un Eje Simple – Rueda doble
FUENTE: Propia

Localización de puntos críticos

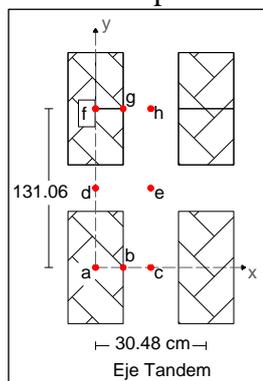


Figura 26. Localización de puntos de análisis para un Eje Tandem
FUENTE: Propia

Localización de puntos críticos

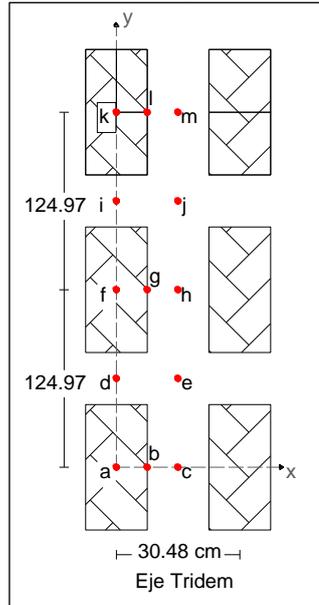


Figura 27. Localización de puntos de análisis para un Eje Tridem
FUENTE: Propia

Tabla 29. Resumen de localización de puntos críticos para análisis

	Punto critico	X (cm)	Y (cm)
Eje simple – Rueda doble	a	0	0
	b	7.62	0
	c	15.24	0
Eje Tandem	a	0	0
	b	7.62	0
	c	15.24	0
	d	0	65.53
	e	15.24	65.53
	f	0	131.06
	g	7.62	131.06
	h	15.24	131.06
Eje Tridem	a	0	0
	b	7.62	0
	c	15.24	0
	d	0	62.48
	e	15.24	62.48
	f	0	124.97
	g	7.62	124.97
	h	15.24	124.97
	i	0	187.45
	j	15.24	187.45
	k	0	249.94
	l	7.62	249.94
	m	15.24	249.94

FUENTE: Propia

3.4.2 Materiales

Como fue explicado en el capítulo anterior, las capas utilizadas para la construcción de la estructura del pavimento flexible deben diseñarse para soportar los cambios climáticos y sobre todo las cargas del tránsito.

Para fines de este capítulo los materiales han sido divididos en las siguientes categorías:

- Mezclas Asfálticas Calientes (Hot Mix Asphalt – HMA)
- Mezclas Asfálticas Frías (Cool Mix Asphalt – CMA)
- Materiales Estabilizados con Cemento (CTB, CSB, CTPB)
- Materiales Granulares para Bases, Subbases No Estabilizados (AB, GAB, CA)

Lo cual enfocaremos en el diseño de pavimentos nuevos y sobre todo en mezclas asfálticas calientes – HMA.

De la misma manera que se describe al tráfico, los datos de los materiales también tienen una jerarquía, mediante niveles del Módulo de Elasticidad del material o mejor conocido como Módulo Dinámico, y sobre todo al Módulo Resiliente para materiales no ligados tal como se presenta a continuación:

Tabla 30. Caracterización del Módulo de Elasticidad de Materiales

Material	Niveles Jerárquicos		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Mezclas Asfálticas	Módulo Dinámico Medido	Módulo Dinámico Estimado	Módulo Dinámico por defecto
Materiales Estabilizados	Modulo Medido	Modulo Estimado	Modulo por defecto
Materiales Granulares No estabilizados	Módulo Resiliente Medido	Módulo Resiliente Estimado	Módulo Resiliente por defecto

FUENTE: AASHTO Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, 2008 Part 2, p 2.4.29

Considerando la información brindada por la Unidad de Titulación, se realiza el análisis para el nivel de entrada 2.

3.4.2.1 Módulo Dinámico

Para el caso de las carpetas asfálticas se refiere a la información necesaria para establecer las curvas que indican la variación del módulo dinámico con la frecuencia de ensayo y temperatura de la mezcla. La calidad de la información dependerá del nivel jerárquico de datos obtenidos.

Para el nivel 1 se determina el módulo dinámico mediante pruebas de laboratorio con la norma AASHTO TP62 a 5 temperaturas y a 4 frecuencias diferentes, construyendo la curva maestra usando el principio de superposición tiempo-temperatura. A continuación se presenta la fórmula general:

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad \text{ec. 57}$$

Dónde:

E^* : Módulo dinámico

t_r : Tiempo de carga a la temperatura de referencia

α, δ : Parámetros de ajuste para un determinado grupo de datos, δ representa el valor mínimo de E^* y $\delta + \alpha$ representa el valor máximo de E^* .

β, γ : Parámetros que describen la forma de la función sinusoidal.

Para el nivel 2 se puede aplicar la ecuación predictiva de Witczak (tal como se explicó en el capítulo anterior con la ecuación 46), a partir de parámetros volumétricos y de características específicas de los agregados y del ligante asfáltico en un rango de temperaturas (-17.7 a 54.4 °C), y frecuencias de carga (0.1 a 25 Hz).

Y para el nivel 3 ya no se requiere pruebas de laboratorio, el módulo dinámico se lo puede obtener mediante valores recomendados por la guía o valores regionales por defecto.

3.4.2.2 Ligante Asfáltico

Se deberá verificar el grado del ligante mediante la norma AASHTO R29 y AASHTO M320. Para la utilización del ligante asfáltico el método brinda 2 opciones de acuerdo al nivel jerárquico de datos, a partir de las cuales se puede establecer viscosidades a diferentes temperaturas y edades.

Para los niveles 1 y 2 Se recomienda el uso de la prueba (RTFO) o el ensayo AASHTO T240 sobre ligantes envejecidos a corto plazo y a partir de los resultados, se determina la viscosidad del ligante en cada caso, aplicando la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\text{sen} \delta} \right)^{4.8628} \quad \text{ec. 58}$$

Dónde:

η : Viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

G^*, δ : Parámetros de ensayo usando el reómetro de corte dinámico (DSR)

Una vez obtenido la viscosidad se establece una relación viscosidad – temperatura usando la siguiente ecuación:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad \text{ec. 59}$$

Dónde:

T_R : Temperatura en grados Rankine (R) y es la escala de temperatura que se mide en grados Fahrenheit sobre el cero absoluto, por lo que carece de valores negativos.

A, VTS: Parámetros de regresión de la relación viscosidad – temperatura.

Para el nivel 3 se requiere la identificación del asfalto por alguno de los siguientes ensayos:

- Grados de comportamiento (PG), AASHTO M320
- Grado de penetración, AASHTO M20

3.4.2.3 Envejecimiento del ligante asfáltico

Este servicio está incorporado en la guía para la determinación del módulo dinámico, mediante el GES (Sistema de Envejecimiento Global), proporcionando modelos que describen el cambio de viscosidad del ligante durante las operaciones de mezcla y compactación y después en el periodo de servicio vial.

Una vez que se determine la viscosidad del ligante en cualquier instante el sistema determina el módulo dinámico de la mezcla para cualquier tiempo de aplicación de carga, tanto para el nivel 1 con la curva maestra, como para el nivel 2 y 3 usando la ecuación de Witczak. Se recomienda el uso de la ecuación obtenida en el GES.

$$\log(t_r) = \log(t) - c(\log(\eta) - \log \eta_{T_r}) \quad \text{ec. 60}$$

Dónde:

t_r : Tiempo reducido (se debe introducir en la ecuación de la curva maestra)

t : Tiempo de aplicación de carga de interés.

c : Valor obtenido experimentalmente al desarrollar la curva maestra para el nivel 1 o usar el valor 1.25588 para los niveles 2 y 3.

η : Viscosidad a la edad y temperatura de interés, Poise

η_{T_r} : Viscosidad sobre muestra envejecida a una temperatura de referencia, Poise

3.4.2.4 Relación de Poisson

Para uso de mezclas densas en caliente y al igual que las variables anteriores se deberá caracterizar mediante los niveles jerárquicos establecidos en la guía.

Para el nivel 1 se deberá desarrollar mediante ensayos de laboratorio

Para el nivel 2 y 3 usar los valores típicos desarrollados mostrados a continuación:

Tabla 31. Valores típicos para Relación de Poisson

Temperatura °F	Temperatura °C	Nivel 3 μ_{tipico}
< 0	<0	0.15
0 – 40	0 – 4.44	0.20
40 – 70	4.44 – 21.11	0.25
70 – 100	21.11 – 37.77	0.35
100 – 130	37.77 – 54.44	0.45
> 130	> 54.44	0.48

FUENTE: AASHTO Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, 2008 p116

Aun conociendo que el coeficiente tiene diferentes valores de acuerdo a criterios investigativos, a continuación se muestran valores recomendados para diferentes los diferentes materiales de la estructura del pavimento:

Tabla 32. Valores recomendados para Relación de Poisson

Material	Rango
Material granular	0.30 – 0.40
Material granular tratado con cemento	0.10 – 0.20
Suelos finos tratados con cemento	0.15 – 0.35
Materiales estabilizados con cal	0.10 – 0.25
Arena densa	0.20 – 0.45
Suelos finos	0.30 – 0.50
Arcillas saturadas	0.40 – 0.50

FUENTE: AASHTO Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, 2008 p123

3.4.2.5 Módulo Resiliente de capas granulares

La calidad de información dependerá del nivel jerárquico de datos obtenidos.

Para el nivel 1 se considera la elaboración de ensayos de laboratorio (Ensayo Triaxial cíclico) sobre muestras representativas o tomando en cuenta el modelo generalizado de la siguiente expresión:

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{K_3} \quad \text{ec. 61}$$

Dónde:

M_R : Módulo resiliente, psi

θ : Estado total de esfuerzos (igual $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

P_a : Presión atmosférica

k_1, k_2, k_3 : son parámetros de regresión

τ_{oct} : Esfuerzo octaédrico de corte

Los valores de esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre los planos octaédricos están dados en términos de los esfuerzos principales:

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \text{ec. 62}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{[(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]} \quad \text{ec. 63}$$

$$\tau_{oct} = \frac{2}{3} \sqrt{[(\tau_{12})^2 + (\tau_{13})^2 + (\tau_{23})^2]} \quad \text{ec. 64}$$

Para el nivel 2 se recomienda el uso de correlaciones entre módulos e índices del suelo como se indicó en el capítulo anterior en las ecuaciones 21 y 22 respectivamente.

Para el nivel 3 se pueden usar valores recomendados por defecto, a partir de la clasificación del suelo

Tabla 33. Valores recomendados de Módulos Resilientes para clasificación de suelo

Clasificación del material (AASHTO)	M_R (Psi) para material base/Subbase	M_R (Psi) para subrasante o Terraplén
A-1-a	40000	29500
A-1-b	38000	26500
A-2-4	32000	24500
A-2-5	28000	21500
A-2-6	26000	21000
A-2-7	24000	20500
A-3	29000	16500
A-4	24000	16500
A-5	20000	15500
A-6	17000	14500
A-7-5	12000	13000
A-7-6	8000	11500

FUENTE: AASHTO Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, 2008 p126

Respecto a la variación de los valores de módulos debido al efecto del clima estacional durante el año la MEPDG recomienda dos alternativas.

La primera alternativa es el uso de un valor representativo del módulo en todo el año y realizar el cálculo mecanicista respectivo. O la segunda alternativa es la realización

de los cálculos para cada uno de los 12 meses con sus respectivos valores de modulo y analizar cuáles son los valores críticos para el diseño.

3.5 Modelo Estructural del Pavimento

Para el diseño de la estructura del pavimento se analizan las alternativas que se indican a continuación:

3.5.1 Modelos de respuesta de Pavimentos Flexibles

Para la determinación de los modelos de respuesta, hay que explicar un poco más a detalle los esfuerzos y deformaciones que están sometidas las capas de la estructura del pavimento.

La hipótesis para conocer el comportamiento de la estructura de un pavimento flexible bajo cargas de una rueda es necesario considerarlo como un medio homogéneo, elástico y semi-infinito.

La teoría original nace de Bussinesq en 1885 y se basa en la aplicación de una carga puntual en un medio elástico. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones debido a una carga distribuida en una superficie circular. Antes del desarrollo de la teoría multicapa por Burmister en 1943, se prestó mucha atención a las solicitaciones de Bussinesq porque eran los únicos disponibles. Se podrá usar para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el pavimento y la subrasante.

La siguiente figura muestra un medio homogéneo sujeto a una carga de radio “a” y una presión uniforme “q”. El medio tiene un módulo elástico “E” y una relación de Poisson “ ν ”. Un pequeño elemento cilíndrico con centro a una distancia “z” debajo de la superficie y la “r” desde el eje de simetría. Debido a la axisimetría. Hay solo tres esfuerzos normales $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$ y un esfuerzo de corte τ_{rz} , que es igual τ_{zr} . Estos esfuerzos son funciones de “q”, “r/a”, y “z/a”.

Esfuerzo normal y de corte en la estructura del pavimento

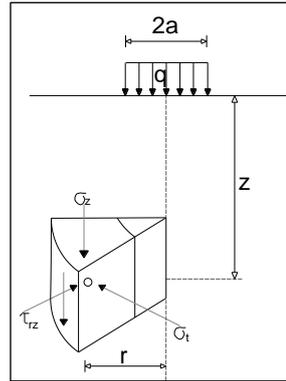


Figura 28. Medio homogéneo sujeto a una carga circular de radio “a” y presión uniforme “q”
FUENTE: Propia

De acuerdo al modelo estructural, las características y la configuración del eje de referencia que actuara sobre el pavimento y las características de cada una de las capas de la estructura del pavimento, se deberá calcular los valores de esfuerzos, deformaciones actuantes o de servicio que se presentan en los diferentes puntos críticos de la estructura del pavimento.

Modelo estructural con sus respectivas características mecánicas

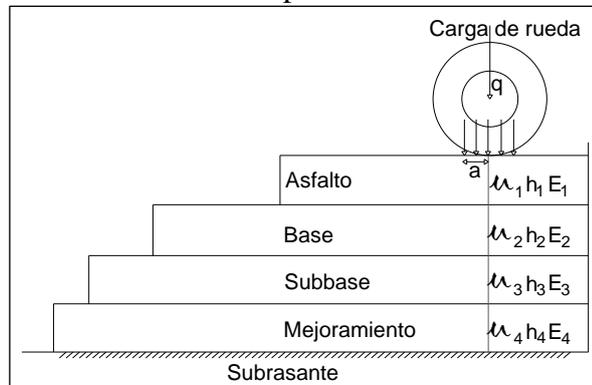


Figura 29. Características mecánicas de cada una de la capa estructural
FUENTE: Propia

3.5.2 Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles

A continuación se indicara ecuaciones en base a estudios y criterios del Instituto del Asfalto, Shell, Dormon y Kerhoven y de la CRR de Bélgica.

3.5.2.1 Deformación unitaria tensional admisible en la base de la carpeta asfáltica

Al aplicar una carga, la carpeta asfáltica presenta en la parte inferior tracción de las fibras, mientras que en la parte superior de la capa presenta compresión de las fibras. Una vez conocido los espesores de las capas (h) y la caracterización de las diferentes capas del modelo estructural (E_i y μ_i) así como las características del sistema de carga (carga aplicada, área de contacto, presión de contacto, separación entre ejes de carga) y la determinación de su magnitud; se determina usando formulas, o programas de cómputo.

De acuerdo con el criterio del Instituto del Asfalto, la ley de comportamiento de la deformación unitaria tensional admisible en la base de las carpetas asfálticas es la siguiente:

$$N_f = 18.4C(4.325 \times 10^{-3} \epsilon_{r adm}^{-3.291} E^{-0.854}) \quad \text{ec. 65}$$

Dónde:

$\epsilon_{r adm}$: Deformación de tracción admisible en la base de la carpeta asfáltica.

E: Modulo dinámico de la carpeta asfáltica (MPa).

N_f : Tránsito expresado en repeticiones admisibles durante el periodo de diseño.

C: Función que depende del porcentaje del volumen de vacíos y del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica compactada, calculado de la siguiente manera:

$$C = 10^M \quad \text{ec. 66}$$

Y la variable M se determina de la siguiente manera:

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right) \quad \text{ec. 67}$$

Dónde:

V_b : Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica.

V_a : Porcentaje del volumen de vacíos en la mezcla asfáltica.

A continuación se presenta una síntesis de estudios realizados con valores de deformaciones radiales tensionales en la base de la carpeta asfáltica.

Tabla 34. Análisis de la deformación unitaria tensional admisible en la base de la carpeta asfáltica en función del tránsito, $\epsilon_{r adm} 10^{-4}$

CRITERIO	Tránsito de diseño (10^6)											
	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	15.0	20.0
Shell (E=1.961 MPa)	5.78	4.81	4.19	3.65	3.36	3.17	3.04	2.84	2.70	2.64	2.44	2.30
Shell (E=2.941 Mpa)	4.99	4.16	3.62	3.15	2.91	2.74	2.62	2.45	2.33	2.28	2.11	1.99
Instituto del Asfalto (E=1.961 MPa)	4.74	3.59	2.91	2.36	2.08	1.91	1.78	1.61	1.49	1.44	1.28	1.17
Instituto del Asfalto (E=2.941 MPa)	4.27	3.23	2.61	2.12	1.87	1.72	1.60	1.45	1.34	1.30	1.15	1.05
Nottingham	2.89	2.39	2.08	1.80	1.66	1.57	1.50	1.40	1.33	1.30	1.20	1.13
CRR Bélgica	1.23	1.02	0.88	0.76	0.70	0.66	0.63	0.58	0.55	0.54	0.50	0.47
Illinois	2.94	2.16	1.72	1.36	1.19	1.08	1.01	0.90	0.83	0.80	0.70	0.63
TRRL	3.25	2.63	2.24	1.91	1.74	1.63	1.55	1.43	1.35	1.32	1.20	1.12
CEDEX	2.32	1.81	1.49	1.24	1.11	1.02	0.96	0.88	0.82	0.80	0.71	0.66

FUENTE: Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras vol 2, Carlos Higuera, 2011 pág. 173

Para el presente diseño del proyecto se toma a consideración la recomendación de los criterios del Instituto del asfalto por tener mayor aceptación de la guía MEPDG.

3.5.2.2 Deformación vertical de compresión admisible

A continuación se indica la ecuación en base a estudios y criterios de compresión sobre la subrasante mediante estudios del Instituto del Asfalto:

$$\epsilon_{z adm}^{-4.477} = \frac{N}{1.365 \times 10^{-9}} \quad \text{ec. 68}$$

Dónde:

$\epsilon_{z adm}$: Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante.

N: Tránsito expresado en repeticiones admisibles durante el periodo de diseño.

A continuación se presenta una síntesis de estudios realizados con valores de deformaciones verticales admisibles

Tabla 35. Análisis de la deformación vertical de compresión admisible sobre la subrasante en función del tránsito, $\epsilon_{z adm} 10^{-4}$

CRITERIO	Tránsito de diseño (10^6)											
	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	15.0	20.0
Nottingham	7.08	5.48	4.51	3.72	3.32	3.06	2.88	2.62	2.44	2.37	2.11	1.95
Shell (NC=50%)	13.24	10.53	8.85	7.45	6.73	6.26	5.92	5.44	5.11	4.98	4.50	4.19
Shell (NC=85%)	9.93	7.90	6.64	5.58	5.05	4.70	4.44	4.08	3.83	3.73	3.37	3.14
Shell (NC=95%)	8.51	6.77	5.69	4.79	4.33	4.02	3.81	3.50	3.29	3.20	2.89	2.69
CRR de Bélgica	6.64	5.38	4.59	3.91	3.56	3.33	3.17	2.93	2.77	2.70	2.46	2.30
Chevron	6.90	5.63	4.82	4.13	3.77	3.54	3.37	3.12	2.95	2.89	2.64	2.47
Dormon y Metcalf	8.94	7.37	6.37	5.51	5.06	4.76	4.55	4.24	4.02	3.93	3.61	3.40
Instituto del Asfalto	6.88	5.61	4.80	4.11	3.76	3.52	3.35	3.11	2.94	2.87	2.62	2.46
TRRL (NC=85%)	6.82	5.41	4.54	3.81	3.44	3.20	3.02	2.77	2.60	2.53	2.29	2.13
LCPC Francia	11.22	9.00	7.62	6.46	5.86	5.47	5.18	4.78	4.50	4.39	3.98	3.72

FUENTE: Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras vol 2, Carlos Higuera, 2011 pág. 183

Para el presente diseño del proyecto se toma a consideración la recomendación de los criterios del Instituto del asfalto por tener mayor aceptación de la guía MEPDG.

3.5.2.3 Deflexión vertical admisible en la superficie

La deflexión de un pavimento se podría definir como el desplazamiento vertical de las capas de la estructura del pavimento ante la aplicación de la carga del tránsito vehicular, bajo el punto de aplicación de la carga produciendo una deflexión máxima.

A continuación se indica la ecuación en base a estudios para calcular la deflexión admisible de la estructura de referencia es

$$\Delta_{z adm} = 25.64N^{-0.2383} \quad \text{ec. 69}$$

Dónde:

$\Delta_{z adm}$: Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante
(mm)

N: Tránsito en repeticiones admisibles durante el periodo de diseño.

A continuación se presenta una síntesis de estudios realizados con valores de deflexiones verticales admisibles en la superficie

Tabla 36. Análisis de la deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible en función del tránsito, $\Delta_{z adm}(mm)$

CRITERIO	Tránsito de diseño (10^6)											
	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	15.0	20.0
Instituto del Asfalto	1.399	1.124	0.953	0.808	0.734	0.685	0.650	0.599	0.565	0.511	0.499	0.467
Checoslovaco	1.140	0.984	0.881	0.789	0.739	0.647	0.681	0.645	0.620	0.610	0.571	0.546
Yang H. Huang	1.343	1.074	0.907	0.766	0.694	0.647	0.613	0.564	0.531	0.517	0.469	0.437
RTAC de Canada	1.649	1.252	1.016	0.825	0.730	0.669	0.626	0.566	0.524	0.508	0.450	0.412
Ivanov	1.213	1.087	1.000	0.902	0.877	0.847	0.824	0.792	0.768	0.759	0.722	0.698
Ruiz	1.139	0.904	0.759	0.637	0.575	0.535	0.505	0.464	0.436	0.424	0.383	0.356
AASHO	1.490	1.124	0.908	0.734	0.648	0.593	0.553	0.499	0.462	0.447	0.395	0.361
CGRA de Canada	2.897	2.332	1.978	1.679	1.525	1.424	1.351	1.247	1.175	1.146	1.041	0.973
Belga	4.105	3.022	2.398	1.902	1.661	1.509	1.401	1.252	1.151	1.111	0.971	0.882

FUENTE: Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras vol 2, Carlos Higuera, 2011 pág. 193

Para el presente diseño del proyecto se toma a consideración la recomendación de los criterios del Instituto del asfalto por tener mayor aceptación de la guía MEPDG.

Una vez que se encuentra establecido los valores de la magnitud de las cargas del tránsito se indicara mediante un programa computacional los valores reales que producen los principales deterioros a través de las respectivas ruedas.

Distribución de esfuerzos

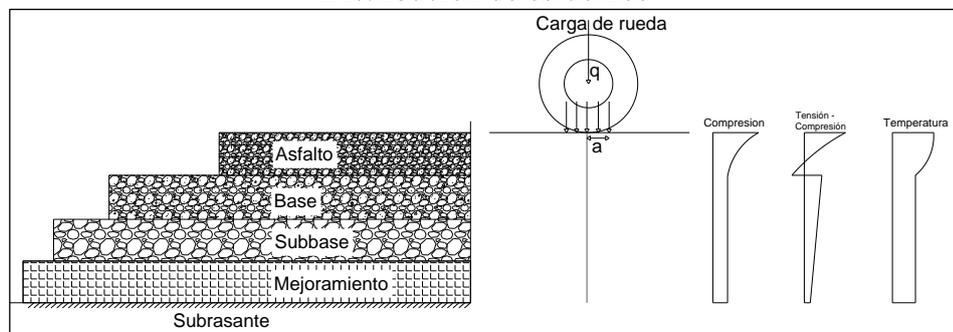


Figura 30. Esfuerzo de compresión y tensión sometida a una carga de rueda vehicular. Modelo de Bussinesq

FUENTE: Propia

Comportamiento de la estructura del pavimento

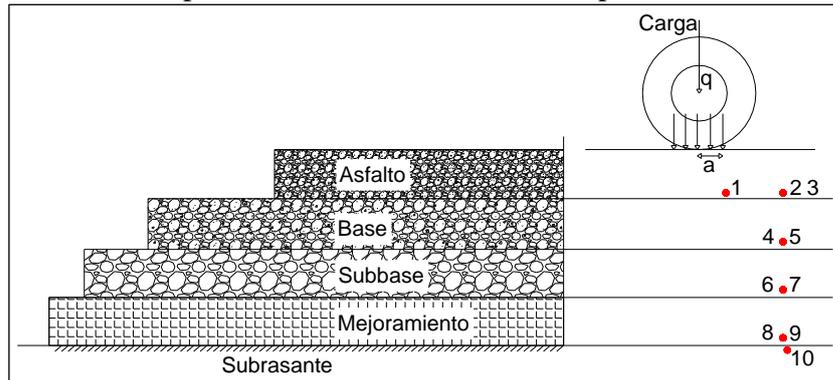


Figura 31. Mecanismo de funcionamiento de la estructura del pavimento

FUENTE: Propia

La figura mostrada describe a una breve síntesis del comportamiento de la estructura sometida a cargas vehiculares:

- En el punto 1 sufre una deformación unitaria tensional lo que conlleva a que se produzca agrietamiento longitudinal en la carpeta asfáltica.
- En el punto 2,3 sufre una deformación vertical a compresión y un esfuerzo vertical a compresión respectivamente lo que conlleva a que se produzca agrietamiento por fatiga (longitudinal o Piel de cocodrilo) en la carpeta asfáltica.
- En el punto 4, 5 sufre una deformación vertical por compresión y un esfuerzo vertical a compresión respectivamente lo que conlleva a que se produzca ahuellamiento o una deformación permanente en la Base.
- En el punto 6, 7 sufre una deformación vertical por compresión y un esfuerzo vertical a compresión respectivamente lo que conlleva a que se produzca ahuellamiento o una deformación permanente en la Subbase.
- En el punto 8, 9 sufre una deformación vertical por compresión y un esfuerzo vertical a compresión respectivamente lo que conlleva a que se produzca ahuellamiento o una deformación permanente en el mejoramiento.

- En el punto 10 sufre una deformación vertical por compresión y conlleva a que se produzca ahuellamiento o deformación permanente en la subrasante.

3.5.3 Teoría de capas

Dado que los pavimentos en su estructura se componen de varias capas granulares es natural considerarlos dentro de la teoría de los sistemas multicapa. Se han realizado esfuerzos importantes en el análisis de esfuerzos y deformaciones en sistemas multicapas como muestra la siguiente figura y la mayor parte de estos análisis incluyen las siguientes hipótesis:

- Cada capa se compone de materiales que son isotrópicos.
- No existen fuerzas cortantes en la superficie.
- Se aplica una presión uniforme a través de un área circular.
- La mayor parte de las soluciones asumen que los materiales son linealmente elásticos y están caracterizados por su módulo elástico (E) y su relación de Poisson (ν).
- El peso del material es despreciable

3.5.3.1 La solución por capas

3.5.3.1.1 Dos Capas

Calculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamiento en función de z/a y r/a mediante Bumister en 1943

3.5.3.1.2 Tres Capas

Expresiones analíticas para cálculo de esfuerzos y desplazamientos mediante Bumister en 1945.

También con la utilización de tablas para determinar esfuerzos normales y radiales en la intersección del eje de carga con las interfaces mediante Acum y Fox en 1951.

3.5.3.1.3 Multi Capas

Fue desarrollado por Yang H. Huang en 1967, pero en la actualidad y para la solución por Multi capas fue el desarrollo de programas de cómputo para facilitar los cálculos y brindar mayores posibilidades en relación con las características de los materiales y la configuración de las cargas. Para este caso en especial se trabajara con el Software “WESLEA”.

3.5.3.1.4 Radio de carga

La siguiente ecuación fue establecida a partir del Modelo de Bussinesq:

$$P = \frac{L_x}{\pi a^2} \quad \text{ec. 70}$$

Despejando el radio de carga:

$$a = \sqrt{\frac{L_x}{P\pi}} \quad \text{ec. 71}$$

Dónde:

a: es el radio de carga (cm).

Lx: Carga de presión uniformemente distribuida (kg).

P: Presión de contacto para una carga Lx por llanta (kg/cm²)

3.6 Clima

El clima es una de las variables fundamentales que incide en el desempeño de los pavimentos, los módulos de las carpetas asfálticas cambian con la temperatura, la rigidez de los materiales no ligados varían con la humedad. Ahora con la Guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista, que incorpora al clima como una de sus entradas principales, requiriendo información horaria de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, exposición solar y sobre todo de precipitación.

3.6.1 Temperatura

La temperatura del aire como la temperatura leída en un termómetro que está expuesto al aire y protegido de la radiación solar. Es un elemento que constituye

parte importante del clima y tiene que ver con el grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinado, así como la evolución temporal y espacial en las distintas zonas climáticas.

Debido a que la temperatura sufre fluctuaciones diarias y permanentemente, y a pesar de que sus valores de variación no sean significativos, es de suma importancia, conocer sus valores, máximos y sus promedios respectivos. En relación a las temperaturas promedio de una historia de 35 años, se puede apreciar en la siguiente figura, que los promedios de las temperaturas máximas absolutas fluctúan entre 29°C (julio) y 31°C (abril). Las temperaturas medias en esta localidad, tienen una ligera variación que es de 2°C, siendo las más altas desde diciembre (23.3°C) hasta los primeros 5 meses del año, el más alto es (marzo y abril con 24.8°C), se presenta una variación de 1.5°C; en los restantes meses y hasta noviembre, la variación es de tan solo 0.1°C y la temperatura promedio más baja, ocurre en los meses de (agosto y octubre con 22.7°C). En cuanto tiene que ver con los promedios de las temperaturas mínimas absolutas, estas se presentan en los meses de julio (18.6°C) a diciembre (17.9°C) teniendo que el mes más frío en este periodo es agosto con (17.6°C); en tanto que, los promedios de las mínimas más altas se presentan en los 5 primeros meses, correspondiéndoles a los meses de marzo y abril los valores más altos (19.4°C) como se demuestra a continuación:

Teniendo muy en cuenta que la temperatura tiene una influencia directa en la viscosidad del asfalto y por lo tanto en su módulo dinámico de la carpeta asfáltica, siendo de esta manera inversamente proporcional (a mayor temperatura menor el valor del módulo dinámico)

Existen Monogramas de la SHELL para determinar la temperatura de la mezcla en función de la temperatura media anual del aire.

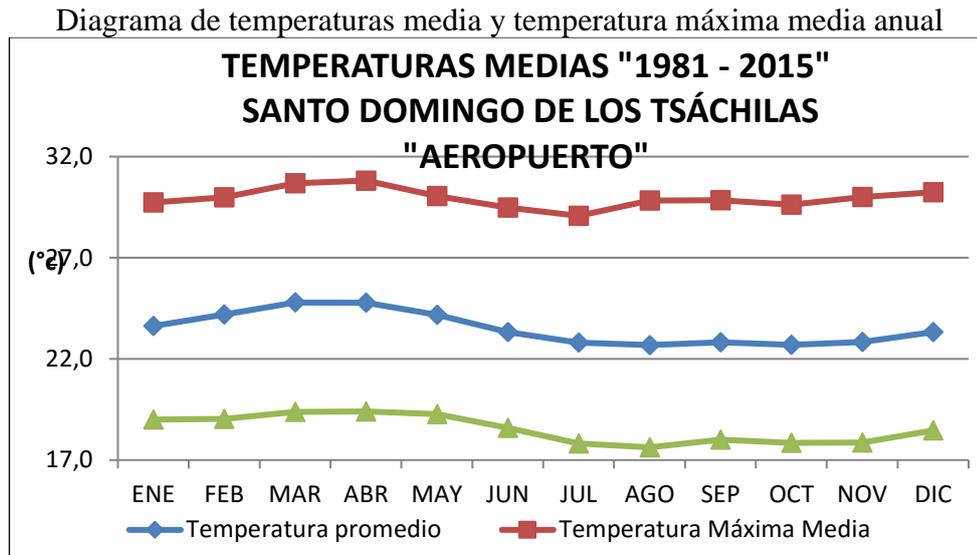


Figura 32. Diagrama del registro histórico de temperaturas medias de Santo Domingo de los Tsáchilas

FUENTE: Información proporcionado por el Departamento de Aviación Civil del Ecuador

Registrado las temperaturas medias anuales

- Temperatura máxima media: 29.9°C
- Temperatura media: 23.5°C
- Temperatura mínima media: 18.5°C

3.6.2 Humedad

La humedad del aire o humedad atmosférica es el contenido de vapor de agua en el aire, condición de estado del aire (húmedo) y se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmosfera; este vapor procede de la evaporación del agua de los mares y océanos, de los ríos, lagos, plantas y otros seres vivos. La cantidad de vapor de agua que puede absorber el aire depende de su temperatura. El aire caliente admite más vapor de agua que el aire frío.

Los datos históricos de la humedad atmosférica promedio, en la localidad de Santo Domingo de los Tsáchilas, oscila entre el 84 y 88%, estos altos valores de concentración de humedad atmosférica, nos permite determinar que esta zona es altamente húmeda o simplemente muy húmeda, ya que así lo demuestran los registros de máxima humedad, mismo que no son inferiores al 90% y que los valores

mínimos de humedad no son inferiores al 73% que se registra en enero; el promedio anual de humedad es del 86% como se demuestra en el siguiente gráfico:

Diagrama de Humedad media, máxima y mínima media

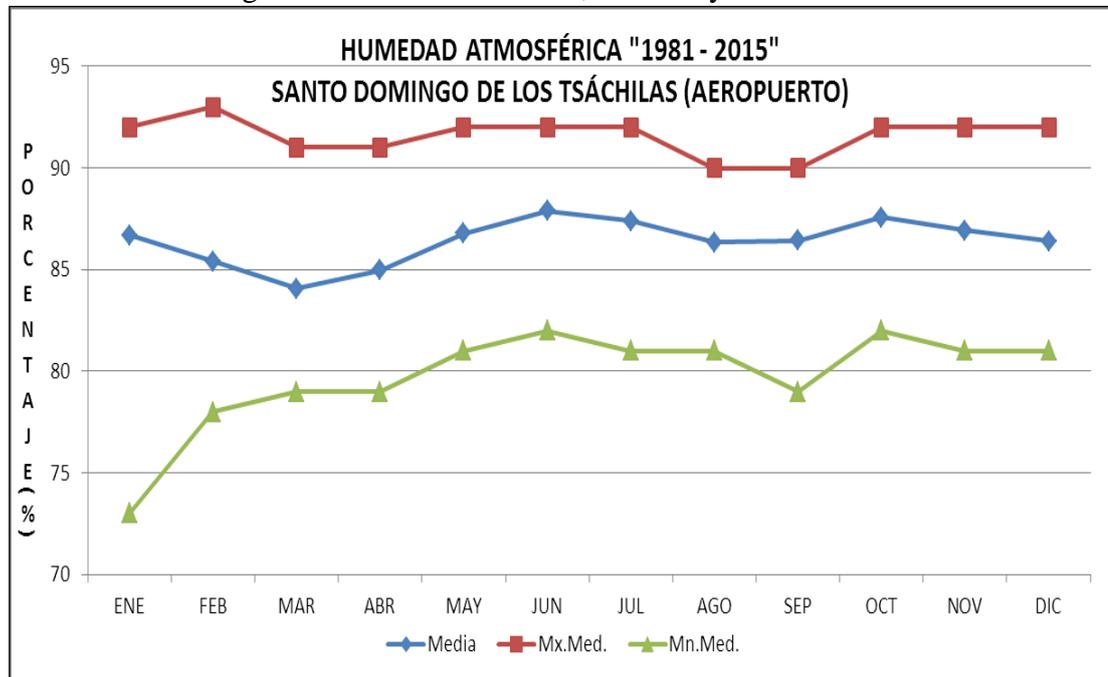


Figura 33. Diagrama del registro histórico de Humedades media de Santo Domingo de los Tsáchilas

FUENTE: Información proporcionado por el Departamento de Aviación Civil del Ecuador

3.6.3 Velocidad del viento

La velocidad del viento y se debe entender por viento “dirección variable” aquel cuya dirección oscila frecuentemente en más de 90°, aunque no hay que confundir con un viento que gire de una dirección a otra durante el periodo considerado.

Adjetivación y cuantificación

La adjetivación se refiere solo a la velocidad (1 kn (nudo)= 0.514 m/s; 1.852 km/h) con los siguientes intervalos:

- Calma, velocidad media menor o igual a 5 km/h.
- Flojos, velocidad media entre 6 y 20 km/h.
- Moderados, velocidad media entre 21 y 40 km/h
- Fuertes, velocidad media entre 41 y 70 km/h.
- Muy fuertes, velocidad media entre 71 y 120 km/h.

- Huracanados, velocidad media mayor a 120 km/h.

Las velocidades de los vientos son promedios de lo observado (registrado en 10 minutos). Evidentemente, las rachas de un viento encuadrado en cualquiera de los intervalos anteriores, pertenecerán al intervalo siguiente, en la mayoría de los casos. Y lo que se trata aquí es adjetivar la velocidad media.

Las rachas de viento solos se citaran explícitamente cuando superen los 80 km/h.

La distribución porcentual de la dirección del viento en rumbos, es notorio e importante señalar que los mayores porcentajes están en el cuadrante (S-W), es así que, en la dirección proveniente del (S) es del 4.6%, del (SSW) 8.7%, del (SW) 9.2%, del (WSW) 11.7%, del (W) 12.8; sobre las demás direcciones, los porcentajes de ocurrencia son inferiores al 3.1% de (WNW); pero se debe destacar que los vientos calma son los que presentan un mayor porcentaje de ocurrencia 43.1%.

En relación a las velocidades promedio en cada una de las direcciones, no superan los 4 nudos (Kn); sin embargo, existen registros de las máximas velocidades y oscilan entre 25.9 km/h (W) en el mes de diciembre y de 44.5 km/h (W), considerado fuerte y es el único caso que se registró en julio de 1986; de acuerdo a las velocidades registradas y en cualquier dirección, están en el rango de flojos a moderados. Es importante anotar que pueden registrarse rachas de vientos, bajo la presencia de una nube cumulonimbos tal como se muestra en la siguiente figura:

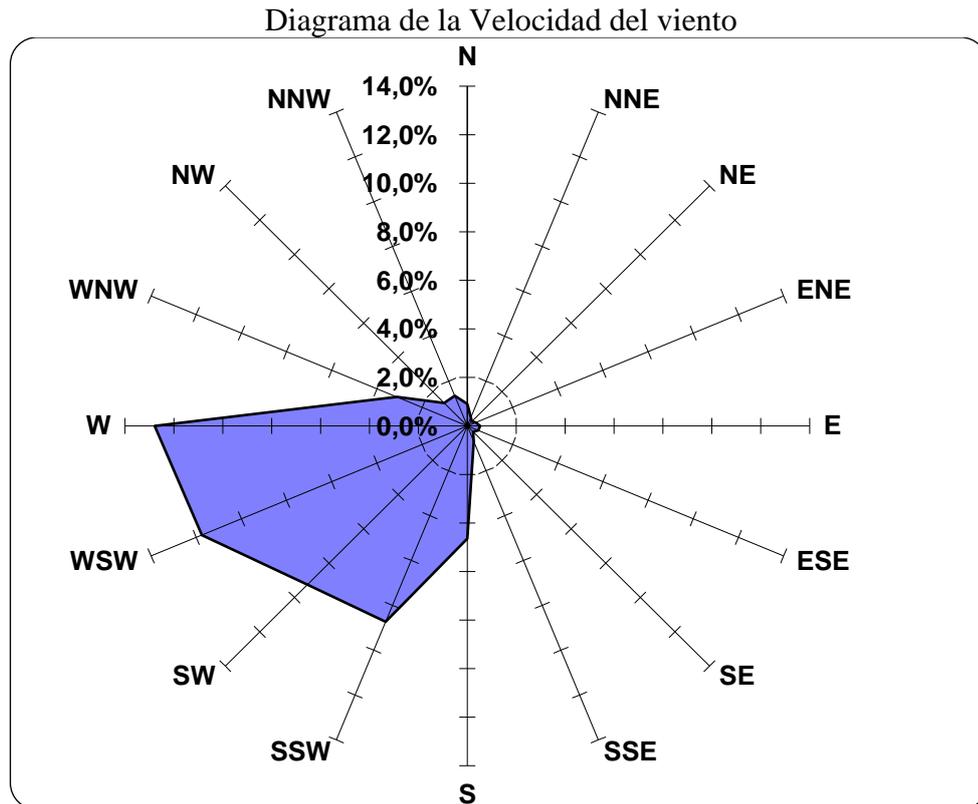


Figura 34. Diagrama del registro histórico de la velocidad del viento de Santo Domingo de los Tsáchilas

FUENTE: Información proporcionado por el Departamento de Aviación Civil del Ecuador

El comportamiento de todas las capas en la estructura del pavimento es afectado por los factores climáticos. Las propiedades del asfalto dependen de la temperatura, ya que, a bajas temperaturas la carpeta asfáltica es dura y frágil, mientras que a grandes temperaturas se vuelve blando y dúctil, a estas grandes temperaturas la carpeta asfáltica es susceptible al ahuellamiento y a bajas temperaturas al agrietamiento.

Con respecto a la descripción de la precipitación esta se encuentra en el capítulo anterior.

Para poder unir las variables climáticas antes mencionadas la MEPDG recomienda el uso del Modelo Climático Integrado Mejorador - EICM y que estima el flujo de calor y humedad en la estructura del pavimento y simula los cambios en el comportamiento y características de las capas ligadas y subrasante.

La temperatura del aire es requerida en la ecuación del balance de calor que utiliza el EICM, se utiliza en los cálculos de radiación de onda larga emitida por el aire y para el cálculo de transferencia de calor por convección entre la superficie del pavimento y el aire. La precipitación es necesaria para calcular la infiltración en la rehabilitación de pavimentos y en el proceso de envejecimiento. La velocidad del viento es requerida en el cálculo del coeficiente de convección entre el aire y la superficie del pavimento. La cantidad (porcentaje) de exposición al sol es utilizada directamente en el balance de energía en el pavimento y corrige la cantidad de radiación que efectivamente alcanza la superficie del pavimento.

En el periodo de curado, la humedad relativa del aire tiene un gran impacto en las retracciones superficiales por secado que sufren las losas de hormigón⁴.

3.7 Modelos de desempeño en la estructura del pavimento por la MEPDG

Ahora para poder establecer la relación entre las respuestas mecanicistas que se producen en la estructura del pavimento y el desempeño establecido para un nivel definido, están las funciones de transferencia como un diseño empírico – mecanicista de pavimentos flexibles.

La función de transferencia actúa como conector entre los fenómenos que ocurren durante la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final. Esta función tiene carácter empírico ya que se obtiene en parte de observaciones del comportamiento del pavimento en campo.

Por lo tanto la función de transferencia es la manera de como refleja la respuesta de la estructura, predicha por el modelo estructural, y el comportamiento o nivel de servicio esperado que interesa al ingeniero diseñador.

⁴ (Luis Osorio L., Rodrigo Delgadillo S. Carlos Whar D., 2015, Caracterización y análisis de la estadística Chilena para el diseño de pavimentos empírico – mecanicista)

3.7.1 Agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica

Entre este agrietamiento se puede clasificar en agrietamiento longitudinal y agrietamiento Piel de Cocodrilo. Este fenómeno se controla en términos de la deformación unitaria tensional (ε_t) en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. A continuación se presenta de la siguiente manera:

$$Nf = f_1 \times 0.004325 \times (\varepsilon_t)^{-f_2} \times (E_{AC})^{-f_3} \quad \text{ec. 72}$$

Dónde:

Nf : Numero de repeticiones admisibles para prevenir el agrietamiento por fatiga.

ε_t : Deformación unitaria por tensión en la fibra inferior de la capa más profunda ligada con asfalto en (mm/mm)

E_{CA} : Modulo dinámico de la carpeta asfáltica (Psi).

f_1, f_2, f_3 : Coeficientes determinados en laboratorio mediante ensayos de fatiga

A continuación se presenta algunos coeficientes determinados en laboratorios y que se usan en programas computacionales en el medio investigativo:

Tabla 37. Coeficientes para determinar agrietamiento E_{AC} en kPa.

CRITERIO	f_1	f_2	f_3
CRR (Bélgica)	4.856×10^{-14}	4.76190	0.00000
Nottingham	8.888×10^{-13}	4.90200	0.00000
Hudson	5.348×10^{-18}	6.17280	0.00000
Shell	$3.981 \times 10^{-6} \times (0.856V_b + 1.8)^5$	5.00000	1.80000
Instituto del Asfalto	$18.4 \times 10^{4.84 \left[\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0.6875 \right]}$	3.29100	0.85400
Das & Pandey	2657.8721	3.56500	1.47470

FUENTE: Introducción al método Empírico – Mecanicista, Ricardo Vásquez, 2002, pág. 24

Para el presente diseño del proyecto se toma a consideración la recomendación de los coeficientes del Instituto del asfalto por tener mejor representatividad de la guía MEPDG, al tener menor dispersión en los resultados de un análisis realizado por la AASHTO.

3.7.2 Ahuellamiento

El ahuellamiento o deformación permanente que no solamente se presenta en la superficie del pavimento sino también en las capas granulares que conforman la estructura y en la subrasante. Y que en realidad es la suma de la consolidación y el desplazamiento de las partículas de todas las capas de la estructura. Se controla en términos de la deformación unitaria por compresión (ϵ_z) en la parte superior de la subrasante, aunque se han formulado funciones de transferencia con el esfuerzo vertical. A continuación se presenta de la siguiente manera:

$$N_d = f_4 x (\epsilon_z)^{-f_5} \quad \text{ec. 73}$$

Dónde:

N_d : Repeticiones admisibles para prevenir el ahuellamiento en la superficie del pavimento

ϵ_z : Deformación unitaria por compresión en la parte superior de la subrasante (mm/mm)

f_4, f_5 : Coeficientes determinados de observaciones en ensayos viales (AASHO y a partir de un valor máximo admisible de profundidad de la huella).

A continuación se presenta algunos coeficientes determinados en laboratorios y que se usan en programas computacionales en el medio investigativo:

Tabla 38. Coeficientes para determinar ahuellamiento

CRITERIO	f_4	f_5
Domon y Metcalf	6.069×10^{-10}	4.76190
CRR (Bélgica)	3.0505×10^{-19}	4.34780
Nottingham	1.1263×10^{-6}	3.57140
AASHO – SHELL		
50% nivel de confianza	6.1466×10^{-7}	4.00000
85% nivel de confianza	1.9448×10^{-7}	4.00000
95% nivel de confianza	1.0498×10^{-7}	4.00000
LCPC	1.0214×10^{-7}	4.16670
CHEVRON	1.6076×10^{-9}	4.44444
Instituto del Asfalto	1.365×10^{-9}	4.47700
Das & Pandey	4.760×10^{-8}	4.53370

FUENTE: Introducción al método Empírico – Mecanicista, Ricardo Vásquez, 2002, pág.

Para el presente diseño del proyecto se toma a consideración la recomendación de los coeficientes del Instituto del asfalto por tener mejor representatividad de la guía MEPDG, al tener menor dispersión en los resultados de un análisis realizado por la AASHTO.

3.7.3 Daño acumulado del Pavimento

Para el análisis del daño se toma de referencia la sumatoria de la relación entre el número de repeticiones de carga aplicadas sobre el número de repeticiones de cargas admisibles. Cuando la relación es igual a 1 se entiende que se encuentra en un diseño óptimo, cuando la relación es <1 se entiende que tiene un sobre diseño y se debería disminuir los espesores y cuando la relación es >1 se entiende que tiene un sub diseño y se debería aumentar los espesores.

$$D = \sum \frac{n}{N} \quad \text{ec. 74}$$

Dónde:

D: Daño acumulado

n: Número de repeticiones de aplicaciones de carga, correspondiente al tránsito de diseño

N: Número de repeticiones de cargas admisibles.

Cabe recalcar que para el presente diseño del proyecto se realizara una evaluación estructural de la carpeta asfáltica para fatiga (agrietamiento) y una evaluación estructural de la subrasante para ahuellamiento, mediante el porcentaje de consumo (Daño acumulado).

3.8 APLICABILIDAD ENTRE EL METODO AASHTO 93 Y MEPDG 2008

Una vez que se ha analizado los factores influyentes en cada método, se podrá resumir de la manera más práctica el procedimiento de cómo llevar a cabo el diseño más óptimo que logre satisfacer los límites admisibles de servicio considerando así una alternativa técnicamente viable y sobre todo se identifica la manera de cómo aplicar cada método evaluando sus diferencias tal como se muestra a continuación.

Tabla 39. Aplicabilidad entre el método AASHTO 93 y MEPDG 2008

AASHTO 93			MEPDG 2008		
Transito	Factor equivalente de carga		Sección Transversal	Obtenido del diseño de un modelo previo	
	Proyección del tránsito al tiempo de diseño		Niveles Jerárquicos de entrada	Primer Nivel Segundo Nivel Tercer Nivel	
Factores Estadísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Confiabilidad (R) • Error normal combinado (So) • Índice de Serviciabilidad (PSI) 		Transito	Espectro de carga Proyección del tránsito al tiempo de diseño por eje	
Materiales	C.A.	Módulo dinámico	Clima	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación • Temperatura • Humedad • Velocidad del viento 	
			Materiales	C.A.	<ul style="list-style-type: none"> • Ligante Asfáltico • Envejecimiento del ligante asfáltico • Coeficiente de Poisson • Módulo dinámico
	M.G.	CBR – Modulo de Resiliencia		M.G.	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de Poisson • Modulo dinámico
Desempeño del pavimento	Clima	Drenaje (m_i)	Desempeño del pavimento	Fatiga (Deformación unitaria tensional)	
	Coeficiente estructural de capa (a_i)			Ahuellamiento (Deformación vertical de compresión)	
				Daño acumulado	
Diseño del número estructural			Respuestas mecánicas		
Diseño de los espesores calculados y espesores mínimos prácticos			Evaluación del desempeño de la estructura propuesta, hasta lograr una sección óptima		

FUENTE: Propia

3.9 Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida

Como se había indicado, este método inicia con la evaluación del desempeño de un diseño previo, y tal como se lo realizó en el capítulo anterior con el método AASHTO 93; ya con los valores de espesores que fueron calculados teóricamente se analizará la parte estructural y funcional para evaluar si cumple con los niveles de porcentaje de consumo tanto para la fatiga como para el ahuellamiento establecidos a lo largo de su vida útil.

Se evaluará un segundo desempeño con valores de espesores mínimos prácticos para la carpeta asfáltica tal como lo recomienda la Guía AASHTO 93 en la tabla 26 en función de los ejes equivalentes de 18 kips.

Se evaluará un tercer desempeño con valores de espesores mínimos prácticos tanto para la carpeta asfáltica como para la base granular con el fin de obtener un valor igual al número estructural requerido para así comparar sus niveles de porcentaje de consumo.

Se evaluará un cuarto desempeño con valores propuestos con el fin de mejorar los niveles de porcentaje de consumo de fatiga.

Se evaluará un quinto desempeño con valores propuestos con el fin de mejorar los niveles de porcentaje de consumo para ahuellamiento.

Se evaluarán dos últimos desempeños modificando el TPDA, pero conservando la misma composición de tránsito y características de materiales de la estructura.

Antes de encontrar las respuestas mecánicas producidas en la estructura del pavimento mediante un análisis elástico; se realiza una breve síntesis del manejo del programa en el cual se va a trabajar.

Hay que tener en cuenta que el programa se encuentra con una licencia libre de uso estudiantil y profesional, y se lo puede encontrar en la red de internet. A continuación la página de inicio del programa se encuentra de la siguiente manera:

Página de inicio del software



Figura 35. Página de inicio del software “Weslea”
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Se puede observar que es un programa realizado en el año de 1999 bajo la plataforma de Windows versión 3.0; Se inicia indicando con que unidades se desea trabajar.

Selección de unidades



Figura 36. Selecccion de unidades
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

En la segunda pestaña se encuentra INPUT, que significa que se puede ingresar la información necesaria para los cálculos de las respuestas mecánicas.

Selección de información estructural

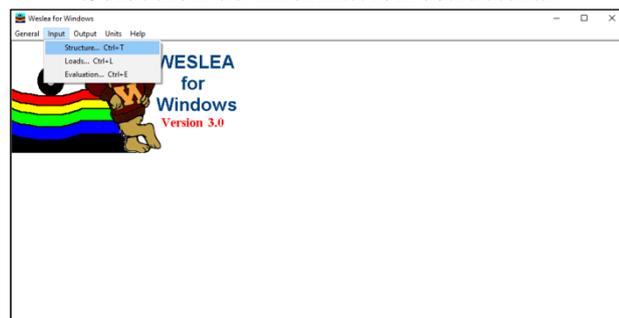


Figura 37. Ingreso de información estructural
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Al seleccionar “Structure” podemos ingresar la información estructural, que va desde el número de capas de la estructura del pavimento (solo se puede elegir hasta 5 capas para el análisis), el tipo de material que corresponde cada capa con sus respectivos valores de módulos, Coeficientes de Poisson y valores de espesores.

Hay que tomar en cuenta que se puede seleccionar con 1 o con 0 si entre capas estarán ligadas una con otra.

Relleno de información estructural

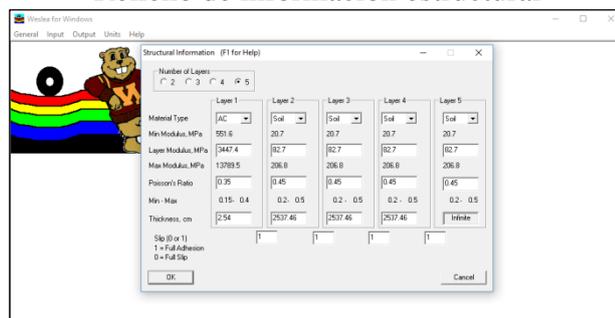


Figura 38. Relleno de información estructural
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

En la misma pestaña de INPUT - LOAD se puede ingresar la información de la carga por cada eje de acuerdo al espectro de carga que se va a analizar.

Ingreso de información de carga por eje



Figura 39. Ingreso de información de carga por eje

Se selecciona el eje que se desea analizar, el número de repeticiones de carga obtenidas por cada eje. La característica de este programa es que podemos indicar la Configuración del número de cargas que deseamos analizar, y para que se active la casilla hay que seleccionar en Configuración de carga “Other – Limit 20” esto permite ingresar los valores de “X” y “Y” del cuadro de coordenadas.

Selección de las características del tipo de eje

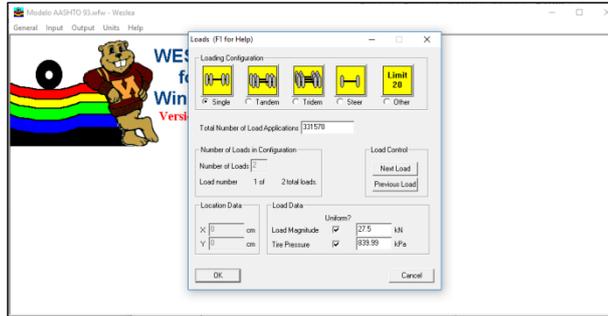


Figura 40. Selección de las características del tipo de eje
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Una vez llena toda la información se procede a seleccionar de la pestaña de INPUT la evaluación que se desea realizar.

Ingreso de información de los puntos críticos para el análisis



Figura 41. Ingreso de información de los puntos para análisis
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Aquí se indicara desde la sección transversal del pavimento los puntos críticos que sean necesarios para su análisis. Las posiciones de acuerdo a la profundidad de las capas que conforman la sección transversal.

Antes de seguir con el análisis de resultados, hay que grabar el archivo en la primera pestaña “General” y “SAVE” que significa guardar.

Posición de puntos críticos de acuerdo a la profundidad de análisis

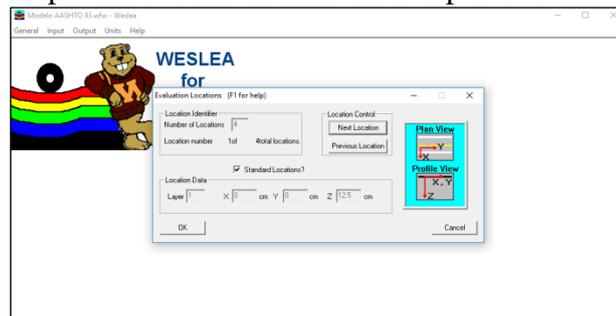


Figura 42. Posición de puntos críticos de acuerdo a la profundidad de análisis
FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Y para terminar en la tercera pestaña se encuentra “OUTPUT” que significa salida de valores aquí el programa realiza los cálculos de esfuerzos y deformaciones para el modelo estructural de pavimento propuesto. Indicando en “Next Location” o “Previous Location” se puede observar el número de localización del punto crítico y sus resultados obtenidos para tensión y compresión.

Obtención de resultados



Figura 43. Obtención de resultados

FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Para la obtención de resultados en fatiga y ahuellamiento, se requiere apreciar los valores críticos en “Normal MicroStrain” que es la unidad 10^{-6} . En “X”, “Y” para Fatiga o tensión y “Z” para compresión o ahuellamiento.

Análisis de resultados

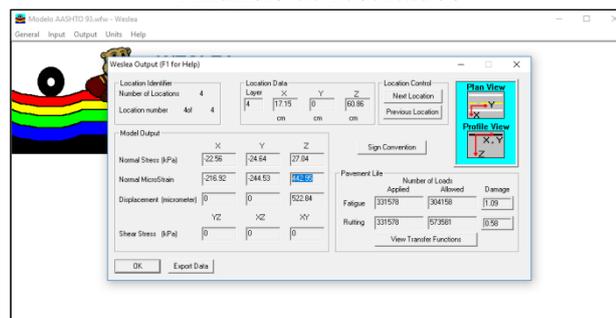


Figura 44. Análisis de resultados

FUENTE: Dave Timm, Bjorn Birgisson and Dave Newcomb, 1999

Características de la mezcla asfáltica

% agregados: 85.5%

% de asfalto: 11%

% de vacíos: 3.5%

Índice de penetración: -0.8

Velocidad de circulación: 60 Km/h

Frecuencia de carga: 1.184 Hertz

Viscosidad del ligante: 3.33 Poises

Retenido en Tamiz 3/4": 1%

Retenido en Tamiz 3/8": 10%

Retenido en Tamiz 4: 22%

Pasa Tamiz 200: 4%

Utilizando la ecuación 46 para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica:

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a -$$

$$0.802208 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}$$

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932 * 4 - 0.001767(4)^2 - 0.002841 * 22 - 0.058097 * 3.5 -$$

$$0.802208 \left(\frac{11}{11 + 3.5} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 * 22 + 0.003958 * 10 - 0.000017(10)^2 + 0.005470 * 1}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(1.184) - 0.393532 \log(3.33))}}$$

$$\log E^* = 2.964682414 + \frac{3.869127}{1.43523378}$$

$$\log E^* = 5.660474482$$

$$E = 10^{5.660474482}$$

$$E = 457587 \text{ PSI}$$

$$E = 32179.2 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 3155 \text{ Mpa}$$

Resumen de las características de materiales granulares

Tabla 40. Características de los materiales granulares

Tipo de Capa	Modulo (Mpa)	<i>u</i>
Carpeta Asfáltica	3155	0.35
Base granular	206	0.40
Subbase granular	103	0.45
Mejoramiento	90	0.45
Subrasante	19	0.50

FUENTE: Propia

3.9.1 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores calculados en el método AASHTO 93.

Fecha: Enero/2017

Periodo de análisis: 20 años

Tasa de crecimiento vehicular: 1.97%

DATOS DE TRANSITO

TPDA: 300 veh/día

Factor de distribución por carril: 0.50

Factor de distribución por sentido: 1.0

Clasificación vehicular:

Livianos: 75

3A: 75

2DB: 75

T3-S3: 75

Volumen de tránsito para el periodo de análisis:

Tabla 41. Volumen de tránsito para el periodo de análisis.

Tipo de eje	Carga (t.)	# de repeticiones	%
Simple	7	994735.7	42.86
Simple – Rueda doble (Dual)	11	331578.58	14.29
Tandem	20	663157.16	28.56
Tridem	24	331578.58	14.29

FUENTE: Propia

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 42. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – primera evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	<i>u</i>
1	Carpeta Asfáltica	12.50	3155	0.35
2	Base granular	10.18	255	0.40
3	Subbase granular	6.81	140	0.45
4	Mejoramiento	31.40	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 43. Respuestas críticas de deformaciones – primera evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
292.94				348.69			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	12.49	1	0	0	12.49

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
313.16				442.95			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	12.49	4	15.24	0	60.86

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
284.65				404.32			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	12.49	4	15.24	0	60.86

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
241.71				325.2			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	12.49	4	15.24	124.97	60.86

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 44. Respuestas de consumo de la primera evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE		
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de Consumo Fatiga	Deformación Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de consumo - abultamiento
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	994735	2.93E-04	1.09E+06	90.97	3.49E-04	4.12E+06	24.16
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	331578	3.13E-04	8.78E+05	37.77	4.43E-04	1.41E+06	23.51
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	663157	2.85E-04	1.20E+06	55.24	4.04E-04	2.12E+06	31.25
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	331578	2.42E-04	2.06E+06	16.13	3.25E-04	5.63E+06	5.89
CONSUMOS TOTALES									200.11			84.80

FUENTE: Propia

3.9.2 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores mínimos para la carpeta asfáltica recomendados en la guía AASHTO 93.

La Guía de Diseño AASHTO 93 en la tabla 26 en función de los ejes equivalentes de 18 kips. Recomienda el uso de espesores mínimos para carpeta asfáltica tomando en cuenta el factor económico junto con las limitaciones de construcción y mantenimiento, para lo cual se obtiene un espesor igual a 3.5 pulgadas, equivalente a 8.90 cm.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 45. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – segunda evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	u
1	Carpeta Asfáltica	8.90	3155	0.35
2	Base granular	10.18	255	0.40
3	Subbase granular	6.81	140	0.45
4	Mejoramiento	31.40	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 46. Respuestas criticas de deformaciones – segunda evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
394.11				479.9			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	1	0	0	8.89

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
407.24				553.99			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	4	15.24	0	57.25

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
381.85				501.21			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	4	15.24	0	57.25

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
335.4				339.75			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	4	15.24	124.97	57.25

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 47. Respuestas de consumo de la segunda evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE			
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de Consumo Fatiga	Deformacion Compresion Ez	Repetices Admisibles	% de consumo - abultamiento	
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	994735	3.94E-04	4.12E+05	241.49	4.80E-04	9.85E+05	100.95	
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	331578	4.07E-04	3.70E+05	89.66	5.54E-04	5.18E+05	63.99	
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	663157	3.82E-04	4.57E+05	145.26	5.01E-04	8.11E+05	81.75	
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	331578	3.35E-04	7.00E+05	47.39	3.40E-04	4.63E+06	7.17	
CONSUMOS TOTALES									523.81				253.85

FUENTE: Propia

3.9.3 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores de espesores mínimos igualando al número estructural.

Una vez conocidos los espesores mínimos prácticos, bajo un buen criterio se puede generar una serie de valores para las capas de la estructura del pavimento, con el fin de igualar el número estructural obtenido con el método AASHTO 93.

Tabla 48. Espesores mínimos prácticos para cumplir con el SN requerido

	Asfalto	Base	Sub-base	Mejoramiento
Di (plg)	3.50	6.00	6.00	13.50
ai	0.451	0.11	0.097	0.089
mi	-	1.20	1.00	0.80

SN =	$a1 * D1 + a2 * D2 * m2 + a3 * D3 * m3 + a4 * D4 * m4$						
SN =	1.58	+	0.79	+	0.58	+	0.96
SN =	3.91						

SN requerido =	3.89
----------------	------

FUENTE: Propia

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 49. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – tercera evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	u
1	Carpeta Asfáltica	8.90	3155	0.35
2	Base granular	15.24	255	0.40
3	Subbase granular	15.24	140	0.45
4	Mejoramiento	34.30	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 50. Respuestas críticas de deformaciones – tercera evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
370.41				458.24			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	1	0	0	8.89

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
378.26				404.77			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	4	15.24	0	8.89

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
356.65				384.51			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	1	0	0	8.89

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
315.36				342.48			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	8.89	1	0	0	8.89

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 51. Respuestas de consumo de la tercera evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE		
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de Consumo Fatiga	Deformación Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de consumo - ablandamiento
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	994735	3.70E-04	5.05E+05	196.91	4.58E-04	1.21E+06	82.09
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	331578	3.78E-04	4.71E+05	70.32	4.05E-04	2.11E+06	15.70
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	663157	3.57E-04	5.72E+05	116.03	3.85E-04	2.66E+06	24.95
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	331578	3.15E-04	8.57E+05	38.70	3.42E-04	4.46E+06	7.43
CONSUMOS TOTALES									421.96			130.17

FUENTE: Propia

3.9.4 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga.

Una vez analizado los resultados anteriores, se podrá proponer una mejor alternativa y llevar a un nivel de consumo de fatiga aceptable.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 52. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – cuarta evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	<i>u</i>
1	Carpeta Asfáltica	15.24	3155	0.35
2	Base granular	10.18	255	0.40
3	Subbase granular	6.81	140	0.45
4	Mejoramiento	31.40	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 53. Respuestas críticas de deformaciones – cuarta evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
234.32				277.03			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.23	1	0	0	15.23

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
257.55				404.77			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.23	4	15.24	0	63.6

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
228.67				346.98			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.24	4	15.24	0	63.6

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
190.62				282.37			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.24	4	15.24	124.97	63.6

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 54. Respuestas de consumo de la cuarta evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE		
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de Consumo Fatiga	Deformación Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de consumo - ahuellamiento
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	994735	2.34E-04	2.28E+06	43.63	2.77E-04	1.15E+07	8.63
Simple Rueda doble (dud)	11	2750	27.5	8.4	10.2	331578	2.58E-04	1.67E+06	19.85	4.05E-04	2.11E+06	15.70
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	663157	2.29E-04	2.47E+06	26.87	3.47E-04	4.21E+06	15.76
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	331578	1.91E-04	4.49E+06	7.38	2.82E-04	1.06E+07	3.13
CONSUMOS TOTALES												
									97.73			43.21

FUENTE: Propia

3.9.5 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de ahuellamiento.

Una vez analizado los resultados anteriores, se podrá proponer una mejor alternativa y llevar a un nivel de consumo óptimo de la deformación permanente o también conocido como ahuellamiento.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 55. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – quinta evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	u
1	Carpeta Asfáltica	10.00	3155	0.35
2	Base granular	15.00	255	0.40
3	Subbase granular	15.00	140	0.45
4	Mejoramamiento	30.00	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 56. Respuestas críticas de deformaciones – quinta evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
340.15				417.04			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	9.99	1	0	0	9.99

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
351.39				393.38			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	9.99	4	15.24	0	69.98

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
328.14				364.85			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	9.99	4	15.24	0	69.98

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
286.41				307.03			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	9.99	1	0	0	9.99

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 57. Respuestas de consumo de la quinta evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE			
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de Consumo Fatiga	Deformacion Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de consumo - abultamiento	
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	994735	3.40E-04	6.69E+05	148.75	4.17E-04	1.85E+06	53.84	
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	331578	3.51E-04	6.01E+05	55.18	3.93E-04	2.40E+06	13.82	
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	663157	3.28E-04	7.52E+05	88.20	3.65E-04	3.36E+06	19.73	
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	331578	2.86E-04	1.18E+06	28.19	3.07E-04	7.28E+06	4.56	
CONSUMOS TOTALES												320.32	91.94

FUENTE: Propia

3.9.6 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 1000 veh/día)

Se realiza un breve procedimiento de diseño con el primer método para encontrar espesores con el objetivo de definir la sección transversal del diseño de prueba y así poder evaluar el desempeño de la estructura del pavimento. (Anexo C).

Tabla 58. Volumen de tránsito para el periodo de análisis, TPDA = 1000 veh/día

Tipo de eje	Carga (t.)	# de repeticiones	%
Simple	7	3'315579	42.86
Simple – Rueda doble (Dual)	11	1'105193	14.29
Tandem	20	2'210386	28.56
Tridem	24	1'105193	14.29

FUENTE: Propia

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 59. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – sexta evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	<i>u</i>
1	Carpeta Asfáltica	15.10	3155	0.35
2	Base granular	12.10	255	0.40
3	Subbase granular	7.60	140	0.45
4	Mejoramiento	36.00	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 60. Respuestas críticas de deformaciones – sexta evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
231.98				275.87			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.09	1	0	0	15.09

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
253.31				331.48			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.09	4	15.24	0	70.74

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
225.99				310.98			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.09	4	15.24	0	70.74

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
188.83				256.74			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	15.09	4	15.24	124.97	70.74

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 61. Respuestas de consumo de la sexta evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE			
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de consumo - Fatiga	Deformacion Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de Consumo - abultamiento	
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	3315579	2.32E-04	2.36E+06	140.69	2.76E-04	1.18E+07	28.21	
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	1105193	2.53E-04	1.76E+06	62.64	3.31E-04	5.16E+06	21.40	
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	2210386	2.26E-04	2.57E+06	86.16	3.11E-04	6.87E+06	32.16	
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	1105193	1.89E-04	4.63E+06	23.85	2.57E-04	1.62E+07	6.82	
CONSUMOS TOTALES									313.34				88.59

FUENTE: Propia

3.9.7 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga (TPDA = 1000 veh/día).

Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – séptima evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	<i>u</i>
1	Carpeta Asfáltica	20.00	3155	0.35
2	Base granular	12.10	255	0.40
3	Subbase granular	7.60	140	0.45
4	Mejoramiento	36.00	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 62. Respuestas críticas de deformaciones – séptima evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
161.16				189.5			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	19.99	1	0	0	19.99

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
183.77				256.61			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	19.99	4	15.24	0	75.64

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
157.89				249.18			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	19.99	4	15.24	0	75.64

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
128.51				212.21			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	19.99	4	15.24	124.97	75.64

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 63. Respuestas de consumo de la séptima evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE				
							Deformación Tensional et	Repeticiones Admisibles	% de consumo - Fatiga	Deformación Compresion ez	Repeticiones Admisibles	% de Consumo - abultamiento		
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	3315579	1.61E-04	7.81E+06	42.43	1.90E-04	6.31E+07	5.25		
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	1105193	1.84E-04	5.07E+06	21.79	2.57E-04	1.62E+07	6.80		
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	2210386	1.58E-04	8.35E+06	26.47	2.49E-04	1.85E+07	11.93		
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	1105193	1.29E-04	1.64E+07	6.72	2.12E-04	3.80E+07	2.91		
CONSUMOS TOTALES														
													97.41	26.89

FUENTE: Propia

3.9.8 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 3000 veh/día)

Se realiza un breve procedimiento de diseño con el primer método para encontrar espesores con el objetivo de definir la sección transversal del diseño de prueba y así poder evaluar el desempeño de la estructura del pavimento. (Anexo D).

Tabla 64. Volumen de tránsito para el periodo de análisis, TPDA = 3000 veh/día

Tipo de eje	Carga (t.)	# de repeticiones	%
Simple	7	9'946734	42.86
Simple – Rueda doble (Dual)	11	3'315578	14.29
Tandem	20	6'631156	28.56
Tridem	24	3'315578	14.29

FUENTE: Propia

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Tabla 65. Resumen del modelo estructural AASHTO 93 – octava evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	u
1	Carpeta Asfáltica	17.85	3155	0.35
2	Base granular	13.85	255	0.40
3	Subbase granular	8.65	140	0.45
4	Mejoramiento	39.00	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 66. Respuestas críticas de deformaciones – octava evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
185.25				219.67			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	17.84	1	0	0	17.84

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
206.47				260.38			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	17.84	4	15.24	0	79.27

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
180.74				252.52			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	17.84	4	15.24	0	79.27

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
148.87				214.82			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	17.84	4	15.24	124.97	79.27

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 67. Respuestas de consumo de la octava evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE		
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de consumo - Fatiga	Deformación Compresion Ez	Repeticiones Admisibles	% de Consumo - ablandamiento
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	9946734	1.85E-04	4.94E+06	201.32	2.20E-04	3.26E+07	30.52
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	3315578	2.06E-04	3.46E+06	95.89	2.60E-04	1.52E+07	21.78
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	6631156	1.81E-04	5.35E+06	123.90	2.53E-04	1.75E+07	37.98
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	3315578	1.49E-04	1.01E+07	32.72	2.15E-04	3.60E+07	9.21
CONSUMOS TOTALES									453.83			99.49

FUENTE: Propia

3.9.9 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento con los valores propuestos con el fin de mejorar el nivel de consumo de fatiga (TPDA = 3000 veh/día).

Tabla 68. Resumen del modelo estructural MEPDG 08 – novena evaluación

No. Capa	Tipo de Capa	Espesor (cm)	Modulo (Mpa)	u
1	Carpeta Asfáltica	25.50	3155	0.35
2	Base granular	13.85	255	0.40
3	Subbase granular	8.65	140	0.45
4	Mejoramiento	39.00	109	0.45
5	Subrasante	Semi-infinita	51.7	0.50

FUENTE: Propia

ANALISIS DE RESPUESTAS MECANICAS

Tabla 69. Respuestas criticas de deformaciones – novena evaluación

EJE SIMPLE (7 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
110.69				129.57			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	0	25.49	1	0	0	25.49

EJE DUAL (11 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
136.91				182.96			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	15.24	0	25.49	4	15.24	0	86.97

EJE TANDEM (20 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
114.08				188.98			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	15.24	0	25.49	4	15.24	0	86.97

EJE TRIDEM (24 t)							
Deformación tensional Et (uStrain)				Deformación por compresión Ez (uStrain)			
90.04				169.39			
Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capa	x (cm)	y (cm)	z (cm)
4	15.24	124.97	86.97	4	15.24	124.97	86.97

FUENTE: Propia

Evaluaciones del desempeño de la estructura del pavimento:

Tabla 70. Respuestas de consumo de la novena evaluación estructural

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA X EJE Ton	MAGNITUD CARGA X RUEDA Kg	MAGNITUD CARGA X RUEDA KN	PRESION DE INFLADO Kg/cm2	RADIO DE CARGA cm	TRANSITO CALCULADO Repeticiones Esperadas	EVALUACION ESTRUCTURAL CARPETA ASFALTICA			EVALUACION ESTRUCTURAL SUBRASANTE		
							Deformación Tensional Et	Repeticiones Admisibles	% de consumo - Fatiga	Deformacion Compresion Ez	Repetices Admisibles	% de Consumo - abuelamiento
Simple	7	3500	35	5.6	14.1	9946734	1.11E-04	2.69E+07	36.97	1.30E-04	3.46E+08	2.87
Simple Rueda doble (dual)	11	2750	27.5	8.4	10.2	3315578	1.37E-04	1.34E+07	24.81	1.83E-04	7.39E+07	4.49
Tandem	20	2500	25	8.4	9.7	6631156	1.14E-04	2.43E+07	27.25	1.89E-04	6.39E+07	10.37
Tridem	24	2000	20	8.4	8.7	3315578	9.00E-05	5.30E+07	6.25	1.69E-04	1.04E+08	3.18
CONSUMOS TOTALES									95.28			20.91

FUENTE: Propia

Resumen de cálculos y respuestas obtenidas con la variación de espesores para mejorar el consumo estructural.

Tabla 71. Resumen de cálculos y respuestas

No. Eval.	Periodo	TPDA	Tipo de eje	N diseño	Método	Espesores de Estructura (cm)					Módulos Dinámicos (Mpa)					Def. Calculadas (uStrain)		Ejes admisibles		Consumo Estructural					
						CA	BG	SBG	MG	SBR	CA	BG	SBG	MG	SBR	Fatiga	Ahuellamiento	Fatiga	Ahuellamiento	Fatiga	Σ	Estado	Ahuellamiento	Σ	Estado
																ε t	ε z	N adm	N adm	ε t			ε z		
1ra	20 años	300	Simple (7 t)	994735	AASHTO 93	12.50	10.18	6.81	31.40	3155	255	140	109	51.7	292.94	348.69	1.07E+06	4.12E+06	93.03%	202.17%	Subdiseño	24.16%	84.81%	Optimo	
			Dual (11 t)	331578											313.16	442.95	8.78E+05	1.41E+06	37.77%			23.51%			
			Tandem (20 t)	663157											284.65	404.32	1.20E+06	2.12E+06	55.24%			31.25%			
			Tridem (24 t)	331578											241.71	325.20	2.06E+06	5.63E+06	16.13%			5.89%			
2da	20 años	300	Simple (7 t)	994735	AASHTO 93	8.90	10.18	6.81	31.40	3155	255	140	109	51.7	394.11	479.90	4.12E+05	9.85+05	241.49%	523.80%	Subdiseño	100.95%	253.86%	Subdiseño	
			Dual (11 t)	331578											407.24	553.99	3.70E+05	5.18E+05	89.66%			63.99%			
			Tandem (20 t)	663157											381.85	501.21	4.57E+05	8.11E+05	145.26%			81.75%			
			Tridem (24 t)	331578											335.40	339.75	7.00E+05	4.63E+06	47.39%			7.17%			
3ra	20 años	300	Simple (7 t)	994735	AASHTO 93	8.90	15.24	15.24	34.30	3155	255	140	109	51.7	370.41	458.24	5.05E+05	1.21E+06	196.91%	421.96%	Subdiseño	82.09%	130.17%	Subdiseño	
			Dual (11 t)	331578											378.26	404.77	4.71E+05	2.11E+06	70.32%			15.70%			
			Tandem (20 t)	663157											356.65	348.51	5.72E+05	2.66E+06	116.03%			24.95%			
			Tridem (24 t)	331578											315.36	342.48	8.57E+05	4.46E+06	38.70%			7.43%			
4ta	20 años	300	Simple (7 t)	994735	AASHTO 08	15.24	10.18	6.81	31.40	3155	255	140	109	51.7	234.32	277.03	2.28E+06	1.15E+07	43.63%	97.73%	Optimo	8.63%	43.22%	Sobrediseño	
			Dual (11 t)	331578											257.55	404.77	1.67E+06	2.11E+06	19.85%			15.70%			
			Tandem (20 t)	663157											228.67	346.98	2.47E+06	4.21E+06	26.87%			15.76%			
			Tridem (24 t)	331578											190.62	282.37	4.49E+06	1.06+07	7.38%			3.13%			
5ta	20 años	300	Simple (7 t)	994735	AASHTO 08	10.00	15.00	15.00	30.00	3155	255	140	109	51.7	340.15	417.04	6.69E+05	1.85E+06	148.75%	320.32%	Subdiseño	53.84%	91.95%	Optimo	
			Dual (11 t)	331578											351.39	393.38	6.01E+05	2.40E+06	55.18%			13.82%			
			Tandem (20 t)	663157											328.14	364.85	7.52E+05	3.36E+06	88.20%			19.73%			
			Tridem (24 t)	331578											286.41	307.03	1.18E+06	7.28E+06	28.19%			4.56%			
6ta	20 años	1000	Simple (7 t)	3315578	AASHTO 93	15.10	12.10	7.60	36.00	3155	255	140	109	51.7	231.98	275.87	2.36E+06	1.18E+07	140.69%	313.34%	Subdiseño	28.21%	88.59%	Subdiseño	
			Dual (11 t)	1105193											253.31	331.48	1.76E+06	5.16E+06	62.64%			21.40%			
			Tandem (20 t)	2210386											255.99	310.98	2.57E+06	6.87E+06	86.16%			32.16%			
			Tridem (24 t)	1105193											188.83	256.74	4.63E+06	1.62E+06	23.85%			6.82%			
7ma	20 años	1000	Simple (7 t)	3315578	AASHTO 08	20.00	12.10	7.60	36.00	3155	255	140	109	51.7	161.16	189.50	7.81E+06	6.31E+07	42.43%	97.41%	Optimo	5.25%	26.89%	Sobrediseño	
			Dual (11 t)	1105193											183.77	256.61	5.07E+06	1.62E+07	21.79%			6.80%			
			Tandem (20 t)	2210386											157.89	249.18	8.35E+06	1.85E+07	26.47%			11.93%			
			Tridem (24 t)	1105193											128.51	212.21	1.64E+07	3.80E+07	6.72%			2.91%			
8va	20 años	3000	Simple (7 t)	9946734	AASHTO 93	17.85	13.85	8.65	39.00	3155	255	140	109	51.7	185.25	219.67	4.94E+06	3.26E+07	201.32%	453.83%	Subdiseño	30.52%	99.49%	Optimo	
			Dual (11 t)	3315578											206.47	260.38	3.46E+06	1.52E+07	95.89%			21.78%			
			Tandem (20 t)	6631156											180.74	252.52	5.35E+06	1.75E+07	123.90%			37.98%			
			Tridem (24 t)	3315578											148.87	214.82	1.01E+07	3.60E+07	32.72%			9.21%			
9na	20 años	3000	Simple (7 t)	9946734	AASHTO 08	25.50	13.85	8.65	39.00	3155	255	140	109	51.7	110.69	129.57	2.69E+07	3.46E+08	36.97%	95.28%	Optimo	2.87%	20.91%	Sobrediseño	
			Dual (11 t)	3315578											136.91	182.96	1.34E+07	7.39E+07	24.81%			4.49%			
			Tandem (20 t)	6631156											114.08	188.98	2.43E+07	6.39E+07	27.25%			10.37%			
			Tridem (24 t)	3315578											90.04	169.39	5.30E+07	1.04E+08	6.25%			3.18%			

FUENTE: Propia

Del cuadro de resumen de respuestas obtenidas de la variación de los espesores para mejorar el porcentaje de consumo de fatiga se puede analizar con la relación entre las deformaciones calculadas y la variación de espesores, como se indica en la siguiente figura:

Relación entre espesores de carpeta asfáltica y deformaciones calculadas para Fatiga

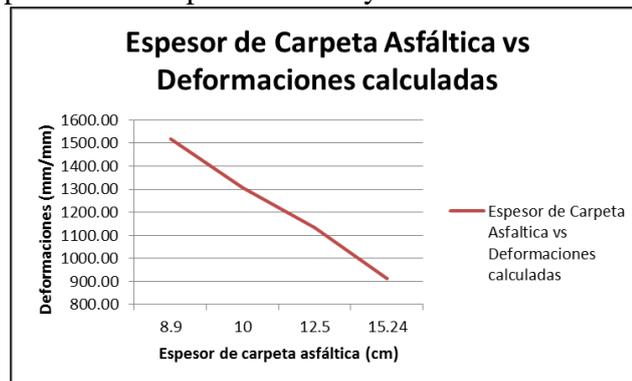


Figura 45. Relación entre espesores de carpeta asfáltica y deformaciones calculadas
FUENTE: Propia

De la misma manera como se presenta las deformaciones se demuestra que el porcentaje de consumo de fatiga varía de acuerdo a los espesores y se lo demuestra en la siguiente figura:

Relación entre espesores de carpeta asfáltica y porcentajes de consumo para Fatiga

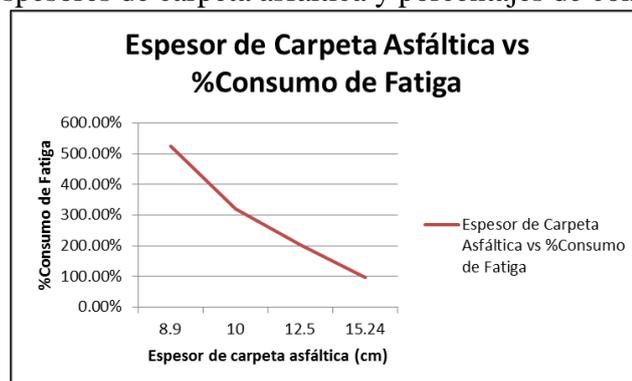


Figura 46. Relación entre espesores de carpeta asfáltica y porcentaje de consumo para fatiga
FUENTE: Propia

CAPITULO 4

4. CUADRO DE CANTIDADES DE OBRA

La importancia de conocer las cantidades necesarias constructivas, nace en la parte del diseño vial, pero a diferencia es que se realiza una comparación económica entre ambos métodos de diseño.

Se elaboran diferentes cuadros de cantidades que indican los presupuestos referenciales necesarios para la construcción de la estructura del pavimento flexible, debido a que existen diferentes espesores calculados por los métodos antes presentados y sobre todo por los diferentes TPDA.

Para la obtención de los valores de cantidades de obra se realizaron las operaciones de los espesores de la sección transversal por el ancho y por la longitud total de vía.

Tabla 72. Cantidades de obra con TPDA de 300 veh/día

TPDA 300 veh/día	METODO	ESPEORES SECCION TRANSVERSAL (m)				ANCHO DE VIA (m)	LONG. DE VIA (m)	Volumen Total (m3)
		CA	BG	SG	MG			
	AASHTO 93	0.1250	0.1018	0.0681	0.3140	10.20	2500.00	15526.95
	MEPDG 08	0.1524	0.1018	0.0681	0.3140	10.20	2500.00	16225.65

FUENTE: Propia

Tabla 73. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 300 veh/día

METODO AASHTO 93					
No.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE					
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	3,187.50	11.29	35,976.59
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	2,595.90	18.26	47,404.87
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	1,736.55	16.46	28,586.11
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	8,007.00	15.26	122,186.82
			15,526.95	TOTAL:	234,154.39

FUENTE: Propia

Tabla 74. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 300 veh/día

METODO MEPDG 08					
No.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE					
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	3,886.20	11.29	43,862.66
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	2,595.90	18.26	47,404.87
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	1,736.55	16.46	28,586.11
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	8,007.00	15.26	122,186.82
			16,225.65	TOTAL:	242,040.46

FUENTE: Propia

A continuación se presentan las tablas con los espesores calculados para TPDA = 1000 veh/día

Tabla 75. Cantidades de obra con TPDA de 1000 veh/día

TPDA 1000 veh/día	METODO	ESPEORES SECCION TRANSVERSAL (m)				ANCHO DE VIA (m)	LONG. DE VIA (m)	Volumen Total (m3)
		CA	BG	SG	MG			
	AASHTO 93	0.1510	0.1210	0.0760	0.3600	10.20	2500.00	18054.00
	MEPDG 08	0.2000	0.1210	0.0760	0.3600	10.20	2500.00	19303.50

FUENTE: Propia

Tabla 76. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 1000 veh/día

METODO AASHTO 93

No.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE					
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	3,850.50	11.29	43,459.72
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	3,085.50	18.26	56,345.67
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	1,938.00	16.46	31,902.27
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	9,180.00	15.26	140,086.80
			18,054.00	TOTAL:	271,794.46

FUENTE: Propia

Tabla 77. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 1000 veh/día

METODO MEPDG 08

No.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE					
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	5,100.00	11.29	57,562.55
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	3,085.50	18.26	56,345.67
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	1,938.00	16.46	31,902.27
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	9,180.00	15.26	140,086.80
			19,303.50	TOTAL:	285,897.28

FUENTE: Propia

A continuación se presentan las tablas con los espesores calculados para TPDA = 3000 veh/día

Tabla 78. Cantidades de obra con TPDA de 3000 veh/día

TPDA 3000 veh/día	METODO	ESPEORES SECCION TRANSVERSAL (m)				ANCHO DE VIA (m)	LONG. DE VIA (m)	Volumen Total (m3)
		CA	BG	SG	MG			
	AASHTO 93	0.1785	0.1385	0.0865	0.3900	10.20	2500.00	20234.25
	MEPDG 08	0.2550	0.1385	0.0865	0.3900	10.20	2500.00	22185.00

FUENTE: Propia

Tabla 79. Presupuesto referencial para el método AASHTO 93 – TPDA 3000 veh/día

METODO AASHTO 93

No.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE					
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	4,551.75	11.29	51,374.57
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	3,531.75	18.26	64,494.83
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	2,205.75	16.46	36,309.82
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	9,945.00	15.26	151,760.70
			20,234.25	TOTAL:	303,939.92

FUENTE: Propia

Tabla 80. Presupuesto referencial para el método MEPDG 08 – TPDA 3000 veh/día

METODO MEPDG 08					
	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	T. UNITARIO
No.	CAPAS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE				
1	Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte	m3	6,502.50	11.29	73,392.25
2	base clase 2 - Incl. Transporte	m3	3,531.75	18.26	64,494.83
3	Sub-base clase 3 - Incl. Transporte	m3	2,205.75	16.46	36,309.82
4	Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte	m3	9,945.00	15.26	151,760.70
			22,185.00	TOTAL:	325,957.60

FUENTE: Propia

El detalle de cada rubro se presenta con el Análisis de Precios Unitarios y se encuentra en el Anexo E; pero se debe que aclarar que no se tomó en cuenta los “Costos Indirectos” debido a que es un valor porcentual que varía de acuerdo al tipo de gasto que cada entidad requiere.

A continuación se presenta el gráfico comparativo de inversión de acuerdo al tipo de TPDA y sus respectivos costos.

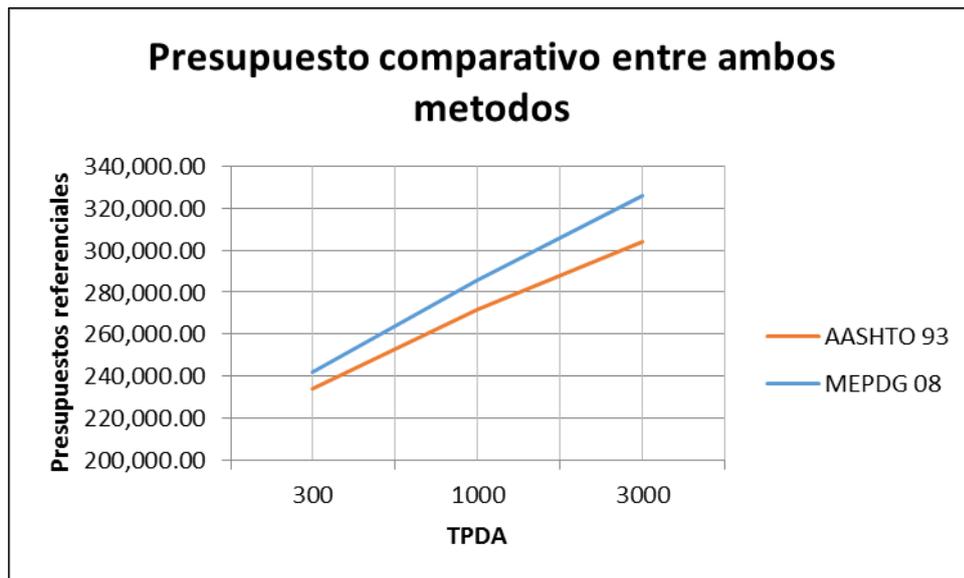


Figura 47. Análisis comparativo de costos

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES

- El método de diseño AASHTO 93 sigue siendo el método empírico más utilizado para el cálculo de espesores de la estructura de pavimento flexible, pero su principal debilidad está en que considera espesores mínimos que no evitan la evolución del deterioro estructural y funcional de la carpeta asfáltica a lo largo de la vida útil
- En la evaluación del desempeño estructural en la deformación unitaria tensional aumenta al igual que la deformación vertical de compresión cuando se considera usar espesores mínimos de carpeta asfáltica.
- Cuando solo se aumenta valores en la carpeta asfáltica, la deformación unitaria tensional disminuye a tal punto de obtener un diseño óptimo en el consumo de fatiga.
- Cuando solo se aumentan valores en los espesores de las capas granulares, la deformación vertical por compresión aumenta de tal manera que disminuye el consumo de ahuellamiento.
- La influencia del número de ejes admisibles para fatiga depende mucho de la formula o criterio que se use; Las ecuaciones más usadas en el medio investigativo son del Instituto del Asfalto y sus respectivos coeficientes.
- Al diseñar espesores por el método MEPDG 08 obtenemos mayores espesores y mejora el desempeño del pavimento reduciendo el deterioro estructural y funcional.
- Cuando se tiene tráfico pequeños la diferencia del presupuesto referencial entre ambos métodos no es tan considerable, a medida que el tráfico va aumentando la diferencia de los presupuestos van creciendo

considerablemente, de tal manera que no se puede definir como una curva proporcional al tráfico. Por ende cuando se tiene tráficos grandes con espesores de carpeta asfáltica mínimos conlleva al deterioro en nuestras vías.

- El diseño de espesores por el método AASHTO 93 es 3.3% más económico que el diseño de espesores por el método MEPDG 08. Pero en cambio en el tiempo de vida del pavimento esta diferencia económica puede llegar a reducir efectos del deterioro y más aún en los costos de rehabilitación a tal punto que puede ser más económico en el tiempo de vida útil.
- Al mejorar el consumo por fatiga, se mejora los modelos de desempeño como el fisuramiento longitudinal, piel de cocodrilo, transversal
- Al mejorar el consumo por ahuellamiento, se considera que no se producirá una deformación permanente a muy temprana edad en la vida útil.

CAPITULO 6

6. RECOMENDACIONES

- En análisis a las conclusiones anteriores me permito recomendar utilizar para diseños futuros el método de diseño MEPDG 08 aunque inicialmente tenga un porcentaje mayor en el presupuesto referencial de la sección transversal con respecto al método de diseño AASHTO 93 pero a largo plazo esta diferencia puede ser favorable cuando se presente las rehabilitaciones
- Se recomienda el uso de las formulas o criterios del Instituto del Asfalto por tener mejor representatividad en los resultados realizados en la MEPDG 08.
- Para instituciones consultoras, ingenieros diseñadores y especialistas apegados al diseño de estructuras viales se recomienda la adquisición de las normas MEPDG 08 ya que incluye un software para el diseño estructural y mejora la calidad diseño y sobre todo en los resultados.
- El ingeniero consultor debe llevar un control en la parte de diseño y en la de construcción, y hacer cumplir con todos los factores que se tomó en cuenta en el momento de diseño.
- Cuando se trate del diseño por el método MEPDG llevar un control en los modelos de desempeño medidos en campo; una vez construida la vía.
- Para conocer de mejor manera el comportamiento de la mezcla, se recomienda realizar el ensayo para obtener la curva maestra; pero aun así siempre va hacer variable debido a la variabilidad en la producción de la materia prima que existe en nuestro medio.
- Para el método MEPDG aún queda mucho por investigar por ser un campo virgen en nuestro entorno y que se incurra lo más pronto posible para evitar gastos innecesarios en rehabilitaciones y reconstrucciones de las vías del país.

7. LISTA DE REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Official. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Official. (2008). Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, A manual of practice. Washington, D.C.

Cevallos C., Antonio J. (2014). Propuesta de metodología complementaria a los diseños de pavimentos según AASHTO 93 (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Ecuador.

Corredor G. (2014). Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO. Módulo III. Diseño de Pavimento I, Sección para Delegados de La Cámara de la Construcción. Venezuela.

Kawa I., Zhang Z., Hudson W. (1998). Evaluation of the AASHTO 18-Kip load equivalency concept. Center for Transportation Research, Texas

Mena B. (2013). Implementación del modelo climático de la MEPDG “AASHTO 2008” en Colombia para tres condiciones climáticas. (Tesis de Maestría). Universidad EAFIT. Colombia

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2012). TABLA NACIONAL DE PESOS Y DIMENSIONES. Subsecretario de Transporte Terrestre y Ferroviario.

MINVU. (2016). Diseño estructural de pavimentos flexibles. Sección 16. Ministerio de Vivienda y Urbanismo., pp. 8-23.

Osorio L., Delgadillo R., Whar C. (2015). Caracterización y análisis de la estadística Chilena para el diseño de pavimentos empírico-mecanicista. RIOCI. Chile

Ricardo T. (2011). Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la avenida Boyacá (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Colombia.

Segovia A. (2014). Predicción de las deformaciones plásticas permanentes de mezclas asfálticas en caliente, correlacionando determinaciones de rigidez del ligante y ensayos dinámicos de carga (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.

Vásquez L. (2004). Pavimentos, método empírico – mecanicista., pp. 23-42.

8. ANEXOS

ANEXO A. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE DE LA AASHTO PARA PAVIMENTO FLEXIBLE

Existen ejes con diferentes magnitudes y configuraciones de carga para lo cual la AASHTO desarrollo Factores de Equivalencia de Carga por eje (Equivalent Axle Load Factors – EALF) para relacionar el daño causado por dichos ejes.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 2.0

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
17.8	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
26.7	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
35.6	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
44.5	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
53.4	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
62.3	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
68.67	0.501	0.512	0.528	0.526	0.515	0.508
71.2	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
89.0	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
97.9	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
106.8	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
115.7	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
124.6	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
133.4	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
142.3	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
151.2	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
160.1	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
169.0	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
177.9	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
186.8	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
195.7	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
204.6	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
213.5	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
222.4	113	108	97.0	86	81	82

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 2.0

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17.8	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
26.7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
35.6	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
44.5	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
53.4	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
62.3	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
71.2	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
80.1	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
89.0	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
97.9	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
106.8	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
107.9	0.237	0.254	0.271	0.262	0.249	0.242
115.7	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
124.6	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
133.4	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
142.3	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
151.2	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
169.0	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
177.9	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
186.8	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
195.7	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
196.2	3.45	3.38	3.25	3.20	3.26	3.34
204.6	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
213.5	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
222.4	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
231.3	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
240.2	8.37	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
249.1	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
258.0	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
266.9	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
275.8	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
284.7	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
293.6	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
302.5	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
311.4	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
320.3	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
329.2	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
338.1	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
347.0	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
355.9	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
364.8	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
373.7	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
382.5	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
391.4	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
400.3	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tridem y Pt = 2.0

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17.8	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
26.7	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
35.6	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
44.5	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
53.4	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
62.3	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
71.2	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
80.1	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
89.0	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
97.9	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
106.8	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
115.7	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
124.6	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
133.4	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
142.3	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
151.2	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
160.1	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
169.0	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
177.9	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
186.8	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
195.7	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
204.6	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
213.5	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
222.4	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
231.3	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
235.4	1.509	1.513	1.519	1.520	1.516	1.513
240.2	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
249.1	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
258.0	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
266.9	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
275.8	3.1	3.06	2.98	2.95	2.99	3.04
284.7	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
293.6	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
302.5	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
311.4	5.4	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
320.3	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
329.2	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
338.1	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
347.0	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
355.9	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
364.8	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
373.7	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
382.5	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
391.4	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
400.3	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 2.5

CARGA EJE (KN)	NUMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
17.8	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
26.7	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
35.6	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
44.5	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
53.4	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
62.3	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
71.2	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
89.0	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
97.9	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
106.8	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
115.7	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
124.6	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
133.4	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
142.3	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
151.2	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
160.1	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
169.0	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
177.9	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
186.8	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
195.7	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
204.6	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
213.5	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
222.4	112	102	79	60	53	55

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apendice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 2.5

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
17.8	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
26.7	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
35.6	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
44.5	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
53.4	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
62.3	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
71.2	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.043
80.1	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
89.0	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
97.9	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
106.8	0.23	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
115.7	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
124.6	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
133.4	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
142.3	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
151.2	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
169.0	1.75	1.73	1.69	1.69	1.70	1.73
177.9	2.21	2.16	2.06	2.06	2.08	2.14
186.8	2.76	2.67	2.49	2.49	2.51	2.61
195.7	3.41	3.27	2.99	2.99	3.00	3.16
204.6	4.18	3.98	3.58	3.58	3.55	3.79
213.5	5.08	4.80	4.25	4.25	4.17	4.49
222.4	6.12	5.76	5.03	5.03	4.86	5.28
231.3	7.33	6.87	5.93	5.93	5.63	6.17
240.2	8.72	8.14	6.95	6.95	6.47	7.15
249.1	10.3	9.6	8.1	8.1	7.4	8.2
258.0	12.1	11.3	9.4	9.4	8.4	9.4
266.9	14.2	13.1	10.9	10.9	9.6	10.7
275.8	16.5	15.3	12.6	12.6	10.8	12.1
284.7	19.1	17.6	14.5	14.5	12.2	13.7
293.6	22.1	20.3	16.6	16.6	13.7	15.4
302.5	25.3	23.3	18.9	18.9	15.4	17.2
311.4	29.0	26.6	21.5	21.5	17.2	19.2
320.3	33.0	30.3	24.4	24.4	19.2	21.3
329.2	37.5	34.4	27.6	27.6	21.3	23.6
338.1	42.5	38.9	31.1	31.1	23.7	26.1
347.0	48.0	43.9	35.0	35.0	26.2	28.8
355.9	54.0	49.4	39.2	39.2	29.0	31.7
364.8	60.6	55.4	43.9	43.9	32.0	34.8
373.7	67.8	61.9	49.0	49.0	35.3	38.1
382.5	75.7	69.1	54.5	54.5	38.8	41.7
391.4	84.3	76.9	60.6	60.6	42.6	45.6
400.3	93.7	85.4	67.1	67.1	46.8	49.7

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tridem y Pt = 2.5

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17.8	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
26.7	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
35.6	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
44.5	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
53.4	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
62.3	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
71.2	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
80.1	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
89.0	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
97.9	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
106.8	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
115.7	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
124.6	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
133.4	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
142.3	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
151.2	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
160.1	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
169.0	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
177.9	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
186.8	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
195.7	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692
204.6	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
213.5	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
222.4	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
231.3	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
240.2	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
249.1	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
258.0	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
266.9	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
275.8	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
284.7	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
293.6	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
302.5	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
311.4	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
320.3	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
329.2	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
338.1	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
347.0	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
355.9	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
364.8	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
373.7	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
382.5	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
391.4	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9
400.3	17.1	15.8	13.2	11.3	11.6	12.9

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes simples y Pt = 3.0

CARGA EJE (KN)	NUMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
17.8	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
26.7	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
35.6	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
44.5	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
53.4	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
62.3	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
71.2	0.594	0.633	0.695	0.693	0.651	0.622
80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
89.0	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
97.9	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
106.8	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
115.7	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
124.6	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
133.4	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
142.3	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
151.2	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
160.1	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
169.0	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
177.9	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
186.8	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
195.7	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
204.6	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
213.5	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
222.4	110	94	61	37	30	32

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apendice D.

Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tándem y Pt = 3.0

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
17.8	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
26.7	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
35.6	0.006	0.011	0.009	0.005	0.003	0.003
44.5	0.011	0.024	0.020	0.012	0.008	0.007
53.4	0.019	0.042	0.039	0.024	0.017	0.014
62.3	0.031	0.066	0.068	0.045	0.032	0.026
71.2	0.049	0.096	0.109	0.076	0.055	0.046
80.1	0.075	0.134	0.164	0.121	0.090	0.076
89.0	0.113	0.181	0.232	0.182	0.139	0.119
97.9	0.166	0.241	0.313	0.260	0.205	0.178
106.8	0.238	0.317	0.407	0.358	0.292	0.257
115.7	0.333	0.413	0.517	0.476	0.402	0.360
124.6	0.457	0.534	0.643	0.614	0.538	0.492
133.4	0.616	0.684	0.788	0.773	0.702	0.656
142.3	0.817	0.870	0.956	0.953	0.896	0.855
151.2	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
169.0	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
177.9	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
186.8	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
195.7	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
204.6	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
213.5	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
222.4	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
231.3	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
240.2	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
249.1	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
258.0	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
266.9	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	8.6
275.8	16.3	14.2	10.2	7.7	7.8	9.5
284.7	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
293.6	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
302.5	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
311.4	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
320.3	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
329.2	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
338.1	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
347.0	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
355.9	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
364.8	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
373.7	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
382.5	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
391.4	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
400.3	92.7	78.8	51.7	32.7	27.4	30.5

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

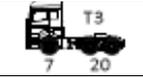
Factores de equivalencia para pavimentos flexibles, ejes tridem y Pt = 3.0

CARGA EJE (KN)	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)					
	1	2	3	4	5	6
8.9	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
17.8	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
26.7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
35.6	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
44.5	0.005	0.008	0.005	0.003	0.002	0.002
53.4	0.007	0.014	0.010	0.006	0.004	0.003
62.3	0.011	0.023	0.018	0.011	0.007	0.006
71.2	0.016	0.035	0.030	0.018	0.013	0.010
80.1	0.022	0.050	0.047	0.029	0.020	0.017
89.0	0.031	0.069	0.069	0.044	0.031	0.026
97.9	0.043	0.090	0.097	0.065	0.046	0.039
106.8	0.059	0.116	0.132	0.092	0.066	0.056
115.7	0.079	0.145	0.174	0.126	0.092	0.078
124.6	0.104	0.179	0.223	0.168	0.126	0.107
133.4	0.136	0.218	0.279	0.219	0.167	0.143
142.3	0.176	0.265	0.342	0.279	0.218	0.188
151.2	0.226	0.319	0.413	0.350	0.279	0.243
160.1	0.286	0.382	0.491	0.432	0.352	0.310
169.0	0.359	0.456	0.577	0.524	0.437	0.389
177.9	0.447	0.543	0.671	0.626	0.536	0.483
186.8	0.550	0.643	0.775	0.740	0.649	0.593
195.7	0.673	0.760	0.889	0.865	0.777	0.720
204.6	0.817	0.894	1.014	1.001	0.920	0.865
213.5	0.984	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
222.4	1.18	1.23	1.30	1.31	1.26	1.22
231.3	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
240.2	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
249.1	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
258.0	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
266.9	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
275.8	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
284.7	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
293.6	4.09	3.79	3.25	3.04	3.27	3.58
302.5	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
311.4	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
320.3	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
329.2	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
338.1	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
347.0	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
355.9	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
364.8	11.0	9.8	7.4	6.0	6.4	7.7
373.7	12.3	10.9	8.1	6.5	6.9	8.3
382.5	13.7	12.1	8.9	7.0	7.4	9.0
391.4	15.3	13.4	9.8	7.6	8.0	9.6
400.3	16.9	14.8	10.7	8.2	8.5	10.4

FUENTE: AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993. Apéndice D.

ANEXO B – Tabla Nacional de Pesos Dimensiones MTOP - 2012

Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones

Tipo	Distribución máxima de carga por eje	Descripción	Peso máx. Permitido (t.)	Longitudes máximas permitidas (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2DB			18	12.20	2.60	4.10
3A			27	12.20	2.60	4.10
T3			27	8.50	2.60	4.10
S3			24	13.00	2.60	4.10

FUENTE: Tabla Nacional de Pesos y dimensiones MTOP – 2012

Anexos C - Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 1000 veh/día)

Determinación de ESAL's – Método AASHTO simplificado

Tipo de Veh.	Veh/día	TIPO DE EJE			Factor Daño	ESAL's Veh/día*Factor daño
		Simple - Simple	Tandem	Tridem		
3A	250	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$		4.425	1106.25
2DB	250	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{11}{15}\right)^4$		1.554	388.50
T3-S3	250	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$	$\left(\frac{24}{23}\right)^4$	5.611	1415.25
Σ ESAL's						2910

FUENTE: Propia

El número de repeticiones por el método AASHTO será:

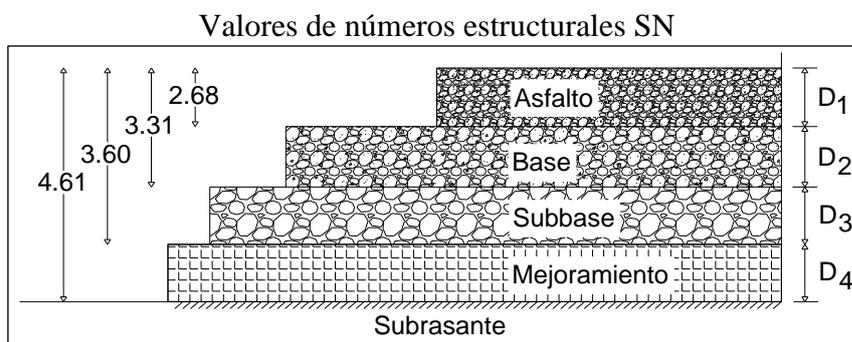
$$N = 2910 * 365 * 0.5 * 1.0 * \frac{(1 + 0.0197)^{20} - 1}{0.0197}$$

$$N = 12\,864.442$$

12'864.442 repeticiones de ejes equivalentes que pasaran por el tiempo de diseño del pavimento.

DISEÑO ESTRUCTURAL - MÉTODO AASHTO 93

Resumen de valores SN



Modelo de números estructurales según la capa analizada

FUENTE: Propia

Espesores calculados teóricamente

Espesores teóricos para cumplir con el SN requerido

	Asfalto	Base	Sub-base	Mejoramiento
Di (plg)	5.94	4.77	2.99	14.18
ai	0.451	0.11	0.097	0.089
mi	-	1.20	1.00	0.80

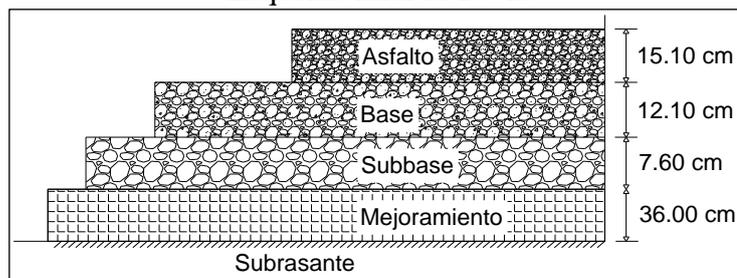
SN =	$a1*D1 + a2*D2*m2 + a3*D3*m3 + a4*D4*m4$			
SN =	2.68	+ 0.63	+ 0.29	+ 1.01
SN =	4.61			

SN requerido	4.61
=	

FUENTE: Propia

Sección transversal de la estructura del pavimento flexible

Esquema final de la vía



Resultado de espesores teóricos para el diseño estructural de la vía

FUENTE: Propia

DISEÑO ESTRUCTURAL - MEPDG 2008

Repeticiones de carga por eje del espectro de carga

Matriz de ejes de carga

Tipo de Vehículo	TPDA	Veh/día	Total	Número de repeticiones de carga por eje			
				Eje simple – Rueda simple (7t.)	Tándem (20t.)	Eje Simple – Rueda doble (11t.)	Tridem (24t.)
2DB	1000	25%	250	1105193		1105193	
3A		25%	250	1105193	1105193		
T3 – S3		25%	250	1105193	1105193		1105193
Sumatoria				3315579	2210386	1105193	1105193

FUENTE: Propia

ANEXO D - Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento (TPDA = 3000 veh/día)

Determinación de ESAL's – Método AASHTO simplificado

Tipo de Veh.	Veh/día	TIPO DE EJE			Factor Daño	ESAL's Veh/día*Factor daño
		Simple - Simple	Tandem	Tridem		
3A	750	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$		4.425	3318.75
2DB	750	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{11}{15}\right)^4$		1.554	1165.50
T3-S3	750	$\left(\frac{7}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{20}{15}\right)^4$	$\left(\frac{24}{23}\right)^4$	5.611	4245.75
					ΣESAL's	8730

FUENTE: Propia

El número de repeticiones por el método AASHTO será:

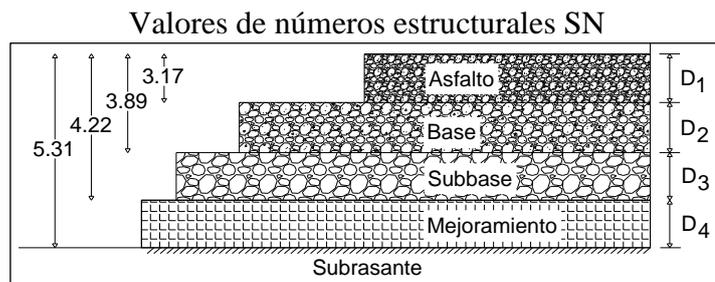
$$N = 8730 * 365 * 0.5 * 1.0 * \frac{(1 + 0.0197)^{20} - 1}{0.0197}$$

$$N = 38\,593\,326$$

38'593.326 repeticiones de ejes equivalentes que pasaran por el tiempo de diseño del pavimento.

DISEÑO ESTRUCTURAL - MÉTODO AASHTO 93

Resumen de valores SN



Modelo de números estructurales según la capa analizada

FUENTE: Propia

Espesores calculados teóricamente

Espesores teóricos para cumplir con el SN requerido

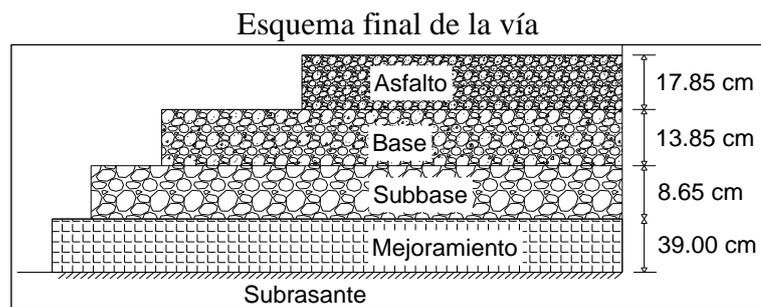
	Asfalto	Base	Sub-base	Mejoramiento
Di (plg)	7.03	5.45	3.40	15.31
ai	0.451	0.11	0.097	0.089
mi	-	1.20	1.00	0.80

SN =	$a1*D1 + a2*D2*m2 + a3*D3*m3 + a4*D4*m4$			
SN =	3.17	+ 0.72	+ 0.33	+ 1.09
SN =	5.31			

SN requerido	
=	5.31

FUENTE: Propia

Sección transversal de la estructura del pavimento flexible



Resultado de espesores teóricos para el diseño estructural de la vía

FUENTE: Propia

DISEÑO ESTRUCTURAL - MEPDG 2008

Repeticiones de carga por eje del espectro de carga

Matriz de ejes de carga

Tipo de Vehículo	TPDA	Veh/día	Total	Número de repeticiones de carga por eje			
				Eje simple – Rueda simple (7t.)	Tándem (20t.)	Eje Simple – Rueda doble (11t.)	Tridem (24t.)
2DB	1000	25%	750	3315578		3315578	
3A		25%	750	3315578	3315578		
T3 – S3		25%	750	3315578	3315578		3315578
Sumatoria				9946734	6631156	3315578	3315578

FUENTE: Propia

ANEXO E – Análisis de Precios Unitarios

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Carpeta asfáltica en caliente Incl. Transporte
 UNIDAD: m3
 ITEM: Pagina 1 de 4

ESPECIFICACIONES:

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Terminadora de Asfalto	1.00	45.00	45.00	0.0023	0.10
Rodillo Vibratorio Liso 130 HP	1.00	35.00	35.00	0.0023	0.08
Rodillo Neumatico 100 HP	1.00	35.00	35.00	0.0023	0.08
Cargadora Frontal	1.00	40.00	40.00	0.0023	0.09
Volqueta de 12 m3	1.00	25.00	25.00	0.0023	0.06
Herramienta Menor	1.00	0.40	0.40	0.0023	0.00
SUBTOTAL M					0.41
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Operador Acabadora Pavimento Asfáltico - Estruct.Ocup.C2	1.00	3.64	3.64	0.0023	0.01
Operador de Rodillo Autopropulsado - Estruct.Ocup.C2	2.00	3.64	7.28	0.0023	0.02
Operador de Cargadora Frontal-Estruct.Ocup. C1	1.00	3.82	3.82	0.0023	0.01
Chofer para Camiones Pesados - Estruct.Ocup.C1	1.00	5.00	5.00	0.0023	0.01
Peón - Estruct.Ocup. E2	4.00	3.41	13.64	0.0023	0.03
SUBTOTAL N					0.08
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Mezcla Asfáltica	m3	0.15	70.00	10.50	
Diesel	gl	0.20	1.50	0.30	
SUBTOTAL O					10.80
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
			A	B	C = A x B
SUBTOTAL P					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					11.29
INDIRECTOS Y UTILIDADES (%)					
OTROS INDIRECTOS (%)					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					11.29
VALOR OFERTADO:					11.29

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Base clase 2 - Incl. Transporte
 UNIDAD: m3
 ITEM: Pagina 2 de 4

ESPECIFICACIONES:

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Camión cisterna, 6 m3, 200 hp	1.00	32.34	32.34	0.0102	0.33
Motoniveladora 90 HP	1.00	45.00	45.00	0.0102	0.46
Rodillo pata de cabra; 1,80 m vibr.; 107 hp	1.00	37.74	37.74	0.0102	0.38
Rodillo Neumatico 100 HP	1.00	35.00	35.00	0.0102	0.36
Herramienta Menor	1.00	0.40	0.40	0.0102	0.00
SUBTOTAL M					1.53
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Chofer para Camiones Pesados - Estruct.Ocup.C1	1.00	5.00	5.00	0.0102	0.05
Operador de Motoniveladora - Estruct. Ocup. C1	1.00	3.82	3.82	0.0102	0.04
Operador de Rodillo Autopropulsado - Estruct.Ocup.C2	1.00	3.64	3.64	0.0102	0.04
Peón - Estruct.Ocup. E2	2.00	3.41	6.82	0.0102	0.07
Ayudante de Maquinaria-Estruct.Ocup.C3	1.00	3.41	3.41	0.0102	0.03
SUBTOTAL N					0.23
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Agua	m3.	0.30	1.00	0.30	
BASE	M3	1.20	13.50	16.20	
SUBTOTAL O					16.50
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
			A	B	C = A x B
SUBTOTAL P					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					18.26
INDIRECTOS Y UTILIDADES (%)					
OTROS INDIRECTOS (%)					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					18.26
VALOR OFERTADO:					18.26

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Sub-base clasee 3 - Incl. Transporte
 UNIDAD: m3
 ITEM: Pagina 9 de 15

ESPECIFICACIONES:

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Camión cisterna, 6 m3, 200 hp	1.00	32.34	32.34	0.0102	0.33
Motoniveladora 90 HP	1.00	45.00	45.00	0.0102	0.46
Rodillo pata de cabra; 1,80 m vibr.; 107 hp	1.00	37.74	37.74	0.0102	0.38
Rodillo Neumatico 100 HP	1.00	35.00	35.00	0.0102	0.36
Herramienta Menor	1.00	0.40	0.40	0.0102	0.00
SUBTOTAL M					1.53
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Chofer para Camiones Pesados - Estruct.Ocup.C1	1.00	5.00	5.00	0.0102	0.05
Operador de Motoniveladora - Estruct. Ocup. C1	1.00	3.82	3.82	0.0102	0.04
Operador de Rodillo Autopropulsado - Estruct.Ocup.C2	1.00	3.64	3.64	0.0102	0.04
Peón - Estruct.Ocup. E2	2.00	3.41	6.82	0.0102	0.07
Ayudante de Maquinaria-Estruct.Ocup.C3	1.00	3.41	3.41	0.0102	0.03
SUBTOTAL N					0.23
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Agua	m3.	0.30	1.00	0.30	
SUB BASE	M3	1.20	12.00	14.40	
SUBTOTAL O					14.70
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
			A	B	C = A x B
SUBTOTAL P					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					16.46
INDIRECTOS Y UTILIDADES (%)					
OTROS INDIRECTOS (%)					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					16.46
VALOR OFERTADO:					16.46

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Mejoramiento clase 3 - Incl. Transporte
 UNIDAD: m3
 ITEM: Pagina 4 de 4

ESPECIFICACIONES:

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Camión cisterna, 6 m3, 200 hp	1.00	32.34	32.34	0.0102	0.33
Motoniveladora 90 HP	1.00	45.00	45.00	0.0102	0.46
Rodillo pata de cabra; 1,80 m vibr.; 107 hp	1.00	37.74	37.74	0.0102	0.38
Rodillo Neumatico 100 HP	1.00	35.00	35.00	0.0102	0.36
Herramienta Menor	1.00	0.40	0.40	0.0102	0.00
SUBTOTAL M					1.53
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Chofer para Camiones Pesados - Estruct.Ocup.C1	1.00	5.00	5.00	0.0102	0.05
Operador de Motoniveladora - Estruct. Ocup. C1	1.00	3.82	3.82	0.0102	0.04
Operador de Rodillo Autopropulsado - Estruct.Ocup.C2	1.00	3.64	3.64	0.0102	0.04
Peón - Estruct.Ocup. E2	2.00	3.41	6.82	0.0102	0.07
Ayudante de Maquinaria-Estruct.Ocup.C3	1.00	3.41	3.41	0.0102	0.03
SUBTOTAL N					0.23
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Agua	m3.	0.30	1.00	0.30	
MEJORAMIENTO	M3	1.20	11.00	13.20	
SUBTOTAL O					13.50
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
			A	B	C = A x B
SUBTOTAL P					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					15.26
INDIRECTOS Y UTILIDADES (%)					
OTROS INDIRECTOS (%)					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					15.26
VALOR OFERTADO:					15.26