



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO
DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES
IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA
EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

DOMÉNICA VANESSA LAINEZ ORRALA

TUTOR:

ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE. Mg.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2022

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

“ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

DOMÉNICA VANESSA LAINEZ ORRALA

TUTOR:

ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE. Mg.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2022

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jonny Villao Borbor. MSc.
DIRECTOR DE CARRERA



Ing. Daniel Campoverde C. Mg.
DOCENTE TUTOR



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar. Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar. Mg.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

“Los actores de tu vida, inspiran valentía, y son el apoyo que te llevan al éxito”

Con esto me refiero a todos aquellos que en ningún momento dudaron de mí, y me llenaron de valor en momentos de desesperación, compartieron conmigo alegrías y experiencias únicas, y, me brindaron apoyo para cumplir mis metas.

Por eso y mucho más, dedico el presente trabajo de titulación a mis padres, **Pedro Laínez Apolinario** y **Aurora Orrala Orrala** por ser ejemplo de perseverancia, amor y humildad, por ser los pilares de mi profesionalismo, con su apoyo, comprensión, sabiduría y consejos. *“Son los mejores, los amo”*.

A mi hermana, **Paola**, y a mi sobrina **Daniela**, porque son luz y alegría en mi vida, por existir y ser parte de mí, por brindarme apoyo moral en todo momento.

A mi familia, que sin condición me brindaron sustento en mi formación, con su apoyo ético, humanístico y familiar.

Y en memoria de los que ya no están, un abrazo al cielo, ¡Lo logré!

Doménica Vanessa Laínez Orrala

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema **“ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93”** elaborado por el estudiante **DOMÉNICA VANESSA LAÍNEZ ORRALA**, egresado de la carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 9% de la valoración permitida.

Original

Document Information

Analyzed document	TRABAJO DE TITULACIÓN FINAL.docx (D342571189)
Submitted	2022-08-05 06:31:00
Submitted by	Daniel
Submitter email	dcampoverde@upse.edu.ec
Similarity	9%
Analysis address	dcampoverde.upse@analysis.urkund.com

Ing. Daniel Campoverde Campoverde Mg.
C.I. 0913176541

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **DOMÉNICA VANESSA LAÍNEZ ORRALA**, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



DOMÉNICA VANESSA LAINEZ ORRALA

Autor de Tesis

C.I. 2450634163

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Daniel Campoverde Campoverde. Mg.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93**”, previo a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL** elaborado por el Srta. **DOMÉNICA VANESSA LAÍNEZ ORRALA**, egresado de la **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



Ing. Daniel Campoverde Campoverde MSc.
C.I. 0913176541
DOCENTE TUTOR

Lic. ALEXI JAVIER HERRERA REYES

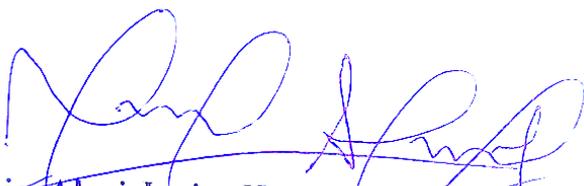
*Magíster En Diseño Y Evaluación
De Modelos Educativos*

La Libertad, agosto 05 de 2022.

Certifica:

Que después de revisar el contenido del trabajo de titulación en opción al título de Ingeniero Civil de **LAINEZ ORRALA DOMÉNICA VANESSA** cuyo tema es: “**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93**” me permito declarar que el trabajo investigativo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado respectivo para la defensa del tema en mención.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.



Lic. Alexi Javier Herrera Reyes, MSc.

Docente de Español A: Literatura

Cel: 0962989420

e-mail: alexiherrerareyes@hotmail.com

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, a Dios, por guiarme, y caminar a mi lado, todos los días de mi vida, porque me dio la vida, y me llevó hasta donde estoy ahora, porque con su grandioso amor que me brinda, me llenó de fortaleza, regocijo, y bienaventuranzas.

Gratitud infinita a mis padres, pilares de mi vida, y semblantes de mi corazón, porque me brindaron la vida, educación, amor, y sobre todo, una grandiosa familia.

A mi hermana Paola, mi sobrina Danielita, y a mi abuelita Olinda, quienes con su cariño siempre estuvieron a mi lado.

A mis tíos, tías, y familia, porque con sus sabios consejos, me formaron de forma moral y ética, y supieron brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

A mis amigos, Helen, Carolina, Lisbeth, Ronaldo, Dave, Erick con quienes compartí experiencias únicas e inolvidables, que quedaran en mí siempre, por el apoyo mutuo que teníamos con ganas de superación para lograr esta meta. A mi amigo César quien acompañó y me brindó apoyo moral e inspirativo para realizar el trabajo de titulación. A mi amiga Nancy, con quien compartí desde pequeña, y ha estado conmigo en este proceso. A mi mejor amiga Priscila, quién conocí en mi adolescencia, y me ayudó en todo lo que esté a su alcance, con amistad, lealtad, y presencia en todos mis momentos.

Aún hay muchos a quién nombrar que aportaron en este camino de superación, compañeros de clases, y demás que me ofrecieron apoyo en algún momento. ¡Gracias de corazón!

A mi tutor de tesis Ing. Daniel Campoverde MSc, que fue mi guía en este trabajo, excelente persona, que me brindó de su tiempo y dedicación.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil, que me brindaron sus conocimientos y me formaron como profesional.

Doménica Vanessa Laínez Orrala

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	iv
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	v
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	vi
CERTIFICADO DE GRAMATÓLOGO	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 HIPÓTESIS.....	8
1.3.1 Hipótesis general.....	8
1.3.2 Hipótesis específicas.....	8
1.4 OBJETIVOS.....	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos	8
1.5 ALCANCE.....	9

1.6	VARIABLES.....	9
1.6.1	Variables Dependientes.	9
1.6.2	Variables Independientes	9
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....		10
2.1	GENERALIDADES DE PAVIMENTOS.....	10
2.1.1	Características de los Pavimentos.....	10
2.2	ENFOQUE DE DISEÑO MEPDG (THE MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE).	12
2.3	MÉTODO DE DISEÑO AASTHO 93.....	14
2.3.1	Variables de diseño de Pavimento flexible.....	15
2.4	DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO IMT-PAVE.....	24
2.4.1	Consideraciones de diseño.....	24
2.5	DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO WINDEPAVE 2.6.....	28
2.5.1	Consideraciones de diseño.....	29
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		31
3.1	TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
3.1.1	Tipo.....	31
3.1.2	Nivel.....	31
3.2	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.	31
3.2.1	Método.....	31
3.2.2	Enfoque.....	32
3.2.3	Diseño	32
3.3	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	32
3.3.1	Población	32
3.3.2	Muestra	32

3.3.3	Muestreo	33
3.4	METODOLOGIA DE O.E1: MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93.....	33
3.4.1	Diseño de estructuras de pavimentos flexibles para tráfico bajo, medio y alto.	33
3.5	METODOLOGÍA DE O.E2: EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL MÉTODO EMPÍRICO MECANICISTA.	36
3.5.1	Alternativa de Diseño Imt-Pave.....	36
3.5.2	Alternativa De Diseño WinDEPAV	39
3.6	METODOLOGÍA DE O.E3: ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO DE LOS ESPESORES DE PAVIMENTOS RESULTANTES PARA LOS TRES NIVELES DE TRÁFICO CONSIDERADOS.....	41
CAPITULO IV: DESARROLLO, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		43
4.1	RESULTADOS DE O.E1: DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES POR EL MÉTODO AASHTO 93.....	43
4.1.1	Descripción general de niveles de tráfico	43
4.1.2	Diseño de estructura de pavimento para tráfico bajo.....	43
4.1.3	Diseño de estructura de pavimento para tráfico medio.....	51
4.1.4	Diseño de estructura de pavimento para tráfico alto.....	57
4.2	RESULTADOS DE O.E2: EVALUACIÓN DE DISEÑOS POR ALTERNATIVA IMT-PAVE Y WINDEPAVE 2.6.....	63
4.2.1	Evaluación del Diseño 1 por IMT PAVE	63
4.2.2	Propuesta de diseño por IMT-PAVE para tráfico bajo.....	64
4.2.3	Evaluación del Diseño 2 por IMT-PAVE.....	65
4.2.4	Propuesta de diseño IMT-PAVE para tráfico medio	65
4.2.5	Evaluación del Diseño 3 por IMT-PAVE.....	67

4.2.6	Propuesta de diseño IMT-PAVE para tráfico alto	67
4.2.7	Evaluación del Diseño 1 por WinDEPAV 2.6.....	69
4.2.8	Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico bajo	70
4.2.9	Evaluación del Diseño 2 por WinDEPAV 2.6.....	71
4.2.10	Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico medio 72	
4.2.11	Evaluación del Diseño 3 por WinDEPAV 2.6.....	73
4.2.12	Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico alto. 74	
4.3	RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA O. E3: ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	75
4.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		81
5.1	CONCLUSIONES.....	81
5.2	RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
ANEXOS		88

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Comportamiento del pavimento flexible y rígido	11
Figura 2 Desempeño de los pavimentos a través del tiempo.	13
Figura 3 Esquema de las 3 Etapas de la MEPDG.	14
Figura 4 Tipos de ejes equivalentes	16
Figura 5 Coeficiente estructural a1	22
Figura 6 Variación de coeficiente de la capa de base granular (a2)	22
Figura 7 Variación de coeficiente de capa de subbase granular (a3).....	23
Figura 8 Semieje de carga.....	30
Figura 9 Clasificación vehicular según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO).	34
Figura 10 Fas1. Pantalla principal de datos de entrada IMT-PAVE.....	37
Figura 11 Fase 2. Niveles de espectros de cargas para diferentes tipos de ejes..	38
Figura 12 Pantalla principal del programa WinDEPAV 2.6.....	40
Figura 13 Cálculo de SN para un W18 de tráfico bajo en la Ecuación AASHTO	93
.....	49
Figura 14 Detalle de estructura de pavimento para tráfico bajo.	50
Figura 15 Cálculo de SN para un W18 de tráfico medio en Ecuación AASHTO 93.	93.
.....	54
Figura 16 Determinación de espesores - Estructura 2.....	55
Figura 17 Detalle de estructura de pavimentos para tráfico medio.....	56
Figura 18 Cálculo de SN para un W18 de tráfico alto en Ecuación AASHTO 93.	93.
.....	60

Figura 19	Determinación de espesores - Estructura 3.....	61
Figura 20	Detalle de estructura de pavimentos para tráfico alto.....	62
Figura 21	Fase 3 de Análisis Espectral del diseño 1 -Tráfico bajo.....	63
Figura 22	Reporte de análisis de IMT-PAVE de la propuesta de diseño 1.	64
Figura 23	Reporte de análisis de IMT-PAVE del diseño 2 para tráfico medio. ..	65
Figura 24	Reporte de análisis de IMT-PAVE de propuesta de diseño 2.	66
Figura 25	Reporte de análisis de IMT-PAVE del diseño 3 para tráfico alto.	67
Figura 26	Reporte de análisis de IMT-PAVE de la propuesta diseño 3	68
Figura 27	Datos ingresados de la estructura 1 en WinDEPAV.	69
Figura 28	Resultados del análisis del Diseño 1.....	70
Figura 29	Resultados del análisis de la propuesta de diseño para tráfico bajo	71
Figura 30	Datos ingresados de la estructura 2 en WinDEPAV.	71
Figura 31	Resultados del análisis del Diseño 2.....	72
Figura 32	Resultados del análisis de la Propuesta de diseño para tráfico medio. 73	
Figura 33	Datos ingresados de la estructura 3 en WinDEPAV.	73
Figura 34	Resultados del análisis del Diseño 3.....	74
Figura 35	Resultados del análisis de la propuesta de diseño para tráfico alto.	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Estimación de periodo de diseño.....	16
Tabla 2 Factor de Distribución Carril (F_c).....	17
Tabla 3 Factor de distribución por dirección (F_d).....	17
Tabla 4 Niveles recomendado de Confiabilidad, R	18
Tabla 5 Desviación estándar (Z_R).....	19
Tabla 6 Desviación estándar recomendada.	19
Tabla 7 Características de drenaje (Base y Subbase).....	20
Tabla 8 Coeficientes recomendado de drenaje.....	20
Tabla 9 Espesores mínimos sugeridos	23
Tabla 10 Valores característicos de módulos dinámicos	26
Tabla 11 Valores característicos de M_r , para Clasificación S.U.C.S.....	27
Tabla 12 Valores característicos de M_r , para Clasificación S.U.C.S.....	30
Tabla 13 Valor espectral según la clasificación vehicular	38
Tabla 14 Niveles de tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18 Kips).....	43
Tabla 15 Cálculo de LEF de Carga para cada tipo de eje.	45
Tabla 16 Cálculo de ESAL de diseño para Tráfico Bajo	46
Tabla 17 Consideraciones de diseño para tráfico bajo.....	47
Tabla 18 Propiedades de las capas de pavimentos flexibles.	49
Tabla 19 Determinación de espesores - Estructura 1	50
Tabla 20 Cálculo de ESAL's de diseño para tráfico medio	52

Tabla 21 Consideraciones de diseño para Tráfico medio.	53
Tabla 22 Determinación de espesores – Estructura 2	56
Tabla 23 Cálculo de ESAL´s de diseño para tráfico alto	58
Tabla 24 Consideraciones de diseño para Tráfico alto.	59
Tabla 25 Determinación de espesores – Estructura 3	62
Tabla 26 Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico bajo	76
Tabla 27 Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico medio.	77
Tabla 28 Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico alto (pesado)	78

“ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LOS SOFTWARES IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 DEL MÉTODO MECANICISTA EMPÍRICO, CON EL MÉTODO AASHTO 93”

Autor: Laínez Orrala Doménica Vanessa.

Tutor: Ing. Campoverde Campoverde Daniel, Mg.

RESUMEN

En el presente trabajo se ejecutó el análisis estructural y comparativo de diseños de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE y WinDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93. Inicialmente se establecieron 3 niveles de tránsito en ESAL's correspondientes a tráfico bajo, medio y alto, para realizar los diseños de pavimentos con el método tradicional, de carácter empírico, y evaluarlos en las alternativas del método mecanicista-empírico, que combina conceptos de respuesta estructural con la evolución del deterioro y comportamiento funcional del pavimento a través del tiempo, en consecuencia, se realizaron propuestas de diseños que cumplan con los modelos de deterioro que cada alternativa conlleva. Con el IMT-PAVE los diseños AASHTO presentaron incumplimiento en la vida útil por fatiga y ahuellamiento, producto de deformación en la carpeta y en las capas inferiores de la estructura, durante el periodo de diseño. Con WinDEPAV los diseños AASHTO mostraron factores de daño menores 1, en ambos modelos de deterioro, manifestando que es necesario un aumento estructural. En comparación con los resultados de las propuestas de diseño se concluye que los diseños de pavimentos realizados en base a conceptos mecanicistas-empíricos, se muestran funcionales y con buen desempeño en su vida útil.

PALABRAS CLAVE: *Cargas equivalentes (ESAL's), Programa IMT-PAVE, Programa WinDEPAV, ahuellamiento, fatiga.*

**“STRUCTURAL AND COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE
DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENTS USING THE IMT-
PAVE AND WINDEPAV 2.6 SOFTWARE OF THE
EMPIRICAL MECHANISTIC METHOD, WITH THE
AASHTO 93 METHOD”**

Author: Laínez Orrala Doménica Vanessa.

Tutor: Ing. Campoverde Campoverde Daniel, Mg.

ABSTRACT

In the present work, the structural and comparative analysis of flexible pavement designs was carried out using the IMT-PAVE and WinDEPAV 2.6 software of the empirical mechanistic method, with the AASHTO 93 method. Initially, 3 traffic levels were established in ESALs corresponding to traffic low, medium and high, to carry out pavement designs with the traditional method, of an empirical nature, and evaluate them in the alternatives of the mechanistic-empirical method, which combines concepts of structural response with the evolution of deterioration and functional behavior of the pavement through of time, consequently, design proposals were made that com

ply with the deterioration models that each alternative entails. With the IMT-PAVE, the AASHTO designs presented non-compliance in the useful life due to fatigue and rutting, product of deformation in the layer and in the lower layers of the structure, during the design period. With WinDEPAV, the AASHTO designs showed damage factors less than 1, in both deterioration models, showing that a structural increase is necessary. In comparison with the results of the design proposals, it is concluded that the pavement designs made based on mechanistic-empirical concepts are functional and perform well in their useful life.

KEYWORDS: Equivalent loads (ESAL´s), IMT-PAVE Program, WinDEPAV Program, *rutting, fatigue.*

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Coronado y Ruiz (2010, p. 1) narran los indicios de una carretera en conceptos opuestos de propiedades complementaria de entre campo y ciudad, haciendo referencia a la necesidad de comunicación, transporte y alimentación que existió para supervivencia entre dos familias, comunidades y ciudades. Como expresan Kraemer et al. (2003, p. 5) las carreteras de una región o un país forman una red viaria, y las acciones que se efectúen en una de ellas repercuten en todas las demás vías de la red. Por ello, la construcción de una carretera requiere un conjunto de operaciones que transformen una franja de terreno en una vía, con la finalidad de acceder a la circulación de vehículos de forma continua y funcional.

Montejo (1998) considera que la parte más importante de una carretera, es su pavimento, es decir, estructuras estratificadas que se apoyan sobre la subrasante de una vía y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos provenientes de las cargas de tránsito, en vista de que una máxima influyente en el argot de la ingeniería de pavimentos es que "el deterioro de una carretera comienza en el instante en que el primer vehículo inicia su circulación en ella". Es por eso que al iniciar el diseño del pavimento debemos tomar en cuenta variables del entorno de construcción.

De acuerdo con López (2015, p. 5), el objetivo de las metodologías de diseño de pavimentos es realizar una simulación analítica del desempeño de la estructura durante el, sujeta a contextos y esfuerzos para obtener su período de vida. Cedeño (2014, p. 2) comenta que uno de los métodos de diseño de pavimentos el AASHTO 93 de carácter empírico, que impone un nivel de serviciabilidad final e incorpora parámetros de diseño para su estructuración, no obstante, la aplicación de esta metodología, no permite el establecimiento de las condiciones propuestas a las diferentes condiciones climáticas con otras latitudes. Por tal motivo, debemos ser partícipes del nuevo modelo tecnológico tercermundista empírico-mecanicista, a fin de que obtengamos como resultado un diseño óptimo de pavimento, con espesores que satisfagan el proyecto constructivo y cumplan con las características de pavimentos.

Brown et al. (2006, p. 5) destaca el enfoque de diseño de pavimentos M.E a la superposición de una estructura de pavimentos través del tiempo para conocer su desempeño a dos tipos de deterioros, por fatiga y deformación permanente, de acuerdo a parámetros variables como el clima, materiales constitutivos y tráfico.

En el presente estudio nombrado “Análisis estructural y comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las opciones IMT-PAVE Y WinDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93” se realizará un análisis comparativo entre estas dos metodologías, considerando un diseño para cada nivel de tráfico, liviano, medio y pesado, incorporando las variantes que cada análisis en específico requiera para su diseño, posteriormente para ser evaluados con la metodología empírico-mecanicista y en efecto obtener una respuesta estructural que se relacione empíricamente con la evolución del deterioro estructural y funcional del pavimento a lo largo de su vida útil.

El desarrollo del tema de titulación tiene como propósito adicional conocer, dominar y aplicar nuevas técnicas, procedimientos, herramientas matemáticas y computacionales para el dimensionamiento estructural de los pavimentos flexibles, a fin de realizar una evaluación más detallada del desempeño de pavimentos.

En el estudio, se presenta en el Capítulo I la problemática de la investigación, antecedentes, alcance, objetivos e hipótesis. El Capítulo II describe los conceptos fundamentales del marco teórico, con enfoque en el método de diseño empírico mecanística (MEPDG). Posteriormente, el Capítulo III refiere a la metodología que se aplica en el presente trabajo de titulación. El desarrollo, análisis estructural y comparativo de resultados aplicando los métodos de diseño de pavimento flexible se ejecuta en el Capítulo IV. Finalmente se establecen conclusiones y recomendaciones del tema de investigación.

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

La nueva tendencia mundial en ingeniería de pavimentos es hacia lo mecanicista-empírico debido a que permite al diseñador cumplir con niveles de servicio verificando el desempeño estructural y funcional de pavimentos. Leiva (2006, p. 2)

manifiesta que en la totalidad de los países de Latinoamérica existe la clara necesidad de aplicación de una metodología de diseño de pavimentos con la introducción de estos conceptos, ante el desafío de acumulación de daño que presentan las carreteras.

Según Tapia (2016, p. 84) la red vial del Ecuador se ha deteriorado a un ritmo creciente acelerado en las dos últimas décadas, a causa de las graves deficiencias de mantenimiento y debido a que su enfoque de diseño combinado de recursos primarios y secundarios, de análisis de daño y el marco legal, sujeta a limitaciones del método tradicional generan resultados de subdimensionamiento y sobredimensionamiento de la estructura.

Schliessler (1992, p. 8) comenta acerca de la catástrofe que se avecina en representación a una alegoría futura y apunta claramente a la situación de vías pavimentadas dividiéndola en cuatro grupos, el grupo 1 pertenece a vías "destruidas", el grupo 2 a vías en "punto crítico", el grupo 3 a vías "en desgaste acelerado" y el último correspondiente al grupo 4 a vías "aseguradas". En este aspecto, se denota que el modelo de diseño de pavimentos utilizado en nuestro país es efecto de la poca inversión de investigación científica de esta área. Considerando que, en la actualidad, los países desarrollados utilizan otros enfoques de diseño de pavimentos que cumplen con las condiciones del medio en que quiera aplicar y obtienen una respuesta estructural del diseño que lo hace más viable.

Uno de los fenómenos eventuales que se han contemplado empleando las diferentes metodologías de diseño de pavimentos es la falla estructural, que sucede cuando los materiales que conforman la estructura, al estar expuestas a cargas diversas debido al tránsito, provocan un agrietamiento estructural concurrente con la deformación o tensión por tracción en la base de cada capa (De Ceita, 2009, p. 21). De igual forma Werkmeister et al. (2005, p. 34) sostienen que un pavimento es susceptible de mostrar acumulación progresiva de deformaciones permanente, es decir una concavidad longitudinal de la superficie en correspondencia con la zona transitada por las ruedas. Los fenómenos indicados se incrementan día a día, por lo que debemos involucrarnos en buscar soluciones más factibles que ayuden a la competencia estructural y funcional de la estructura vial, partiendo del estudio de

nuevas metodologías y técnicas que se adapten a los parámetros requeridos de un país.

Como lo hacen notar Bueno et al. (2022) la aplicación de la metodología mecanicista-empírica permiten determinar correctamente la magnitud de las cargas transmitidas al pavimento y la frecuencia que dichas cargas son aplicadas durante un periodo tiempo en el que se miden los espectros de carga y permiten representar la distribución de peso por eje en histogramas que se ajustan a un nivel de carga, logrando así obtener como resultado pavimentos de alto desempeño que cumplan con las exigencias requeridas, a diferencia de los procedimientos empíricos.

Por lo escrito, se genera la siguiente interrogante: ¿Cuál es la diferencia del desempeño estructural de pavimento si aplicamos las alternativas del concepto empírico mecanicista y el método tradicional AASHTO 93?

1.2 ANTECEDENTES.

En el marco de desarrollo de la Guía de diseño AASHTO en 1986, se reconoció la necesidad de dejar de diseñar pavimentos bajo conceptos empíricos y fundamentarse en concepciones mecanicistas (Bonilla, 2004), por tal motivo el Nacional Cooperative Highway Research Programs (NCHRP) inició el Proyecto 1-26, con enfoque mecanicista, cuya finalidad era proporcionar el cerco básico para el desarrollo de un método de diseño pavimento empírico-mecanicista. Una vez completado el proyecto mencionado, apareció la AASHTO – MEPDG (American Association of State Highway and Transportation Official Mechanistical Pavement Desing Guide) en el 2002, como una nueva metodología de diseño de pavimento.

Li et al. (2011, p. 3) comentan que la Guía de diseño de pavimento mecanicista-empírico (MEPDG) presenta un nuevo paradigma para el diseño de pavimentos, proporcionando una caracterización más realista de los pavimentos en servicio y proporciona pautas uniformes de diseño, incluye el concepto de espectro de carga y realiza el análisis de la estructura a lo largo del tiempo, presentando el resultado de fatiga de la carpeta y deformaciones por ahuellamiento de las carpetas granulares de la estructura.

Es importante mencionar estudios internacionales de diseños de pavimentos flexibles basados en los conceptos empíricos-mecanicistas, dado que el análisis de resultados generados en los mismos, son respuestas de un proceso metodológico global e independiente del lugar de estudio, que en consecuencia se usaran para efectuar el análisis estructural y comparación con los resultados obtenidos en este tema de investigación.

En el contexto internacional, se puede aludir al análisis comparativo de García et al. (2014), entre dos métodos de diseño, el tradicional empírico y el mecanicista, con el uso de dos alternativas de diseño, IMT-PAVE y CR-ME para la evaluación del comportamiento de la estructura. Esta investigación se desarrolló en El Salvador, mediante la generación de espectros de cargas del estado para la obtención del factor camión correspondiente para la obtención de la clasificación vehicular y análisis de las estructuras de pavimentos flexible incorporando las variantes particulares que exige cada diseño, se obtuvo cómo resultados que, en cuanto a espesores requeridos en la estructura bajo conceptos mecanicistas, presentan diseños más precisos y funcionales. En este estudio los investigadores concluyeron que al usar la MEPDG, los resultados muestran una menor incertidumbre, ya que se trata de una cuantificación más exhaustiva de los parámetros de diseño, con IMT-PAVE, permite realizar una mejor una determinación real de tránsito, ya que su análisis está basado en espectros de cargas.

Cruz y Escobar (2019) en la investigación que realizaron en Colombia de un análisis multicapa elástico para diseño de pavimentos flexibles, mediante diversos softwares mecanicistas (WinDEPAV), que permitían la evaluación de la estructura con la finalidad de obtener el desempeño mecánico de la misma, concluyeron que las diferencias en los comportamientos en los diferentes modelos, son menores si hay aumentos de profundidad, y la capa de rodadura es la que presenta una verdadera diferencia entre el uso del método tradicional y los demás programas para el diseño de pavimentos.

Desde el 2003 nuestro país vive un proceso de transición en dónde tenemos las Normas de Diseño Geométrico (MOP 001) y se han realizado las Nevi-12 y se basan brevemente en la normativa AASHTO, con la necesidad de guiarse para el

diseño en esta última mencionada ya que las presentes en el país sólo se reiteran los parámetros geométrico básicos para el diseño.

En el ámbito nacional citando a Morán et al. (2018), en su estudio de la caracterización de tránsito de un tramo de la vía Guayaquil entre dos metodologías de diseño; el método empírico mecanicista WIM y el método AASTHO, que consistió en realizar una evaluación de las magnitudes de las cargas en diversos tipos de ejes pertenecientes a la vía, usando tecnología actual del método automatizado WIN., que mide las cargas cuándo el vehículo está en movimiento con el fin de lograr resultados confiables de tránsito para elaborar el espectro de carga correspondiente, consecuente al tema de estudio se analizó el comportamiento de la estructura del pavimento a 20 años de vida útil mediante la metodología mecanicista-empírica. Los resultados que obtuvieron indican que posiblemente la estructura de pavimento de la vía, bajo la acción de las cargas determinadas por los espectros de carga del tránsito pesado no cumplirá su periodo de vida prevista por ahuellamiento, lo que significa que probablemente las capas de la estructura sufrían de subdimensionamiento y en consecuencia generó estos efectos.

Kure y Campoverde (2019), realizaron un estudio enfocado en un análisis entre el método empírico de diseño de pavimento flexible AASHTO 93 y el método mecanicista IMT-PAVE 3.0, que realiza el análisis con el número de repeticiones generadas por cada tipo de vehículo representado en espectros de carga. Este se ejecutó en la vía Jipijapa – La Cadena perteneciente a la provincia de Manabí, dónde los autores diseñaron una estructura de pavimento para un periodo de 10 años que cubra la carga expuesta por incremento vehicular del lugar, con el método tradicional y se optimizaron los espesores con el programa del método mecanicista-empírico. Como resultados señalan que entre ambas metodologías se aprecia una diferencia de espesores de pavimentos y concluyen que el programa IMT-PAVE 3.0 presenta mejores resultados en optimización de los espesores con relación a la metodología AASHTO 93, lo cual generará un ahorro en el proyecto. También destacan que el software IMT-PAVE 3.0 tiene como condiciones de diseño la vida útil de la estructura de pavimento por fatiga y deformación, parámetros que la

metodología AASHTO 93 no considera, por lo que método empírico mecanicista integra un campo más amplio de respuesta estructural.

Citando a Palacios (2017), con su tema de investigación de "Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida aplicando el método empírico – mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93", ubicado en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, al centro noreste del Ecuador, en el cuál tomó en cuenta las características de las variables de cada método que influye en el tráfico en el factor equivalente de carga y espectro de carga, clima, temperatura, humedad, propiedades de materiales, para realizar el diseño de pavimento flexible por cada método y ejecutar la comparación de espesores para evaluar y analizar las respuestas del comportamiento bajo criterios en normas vigentes. Manifiestan que a medida que se aumenta el espesor de la carpeta asfáltica, existen menores deformaciones por fatiga, que en consecuencia se incrementó a tal punto de obtener un diseño óptimo en el consumo de fatiga, así mismo sucede cuando hay un aumento de valores de espesores de las capas granulares, dónde la deformación vertical aumenta por compresión, a tal forma que el ahuellamiento disminuye. Concluyen que el método AASHTO 93 sigue siendo el método empírico más utilizado para el cálculo estructural de pavimento, y su principal debilidad es que considera espesores mínimos que no evitan la evolución del deterioro estructural y funcional de la carpeta a lo largo de su vida útil, y en consecuencia al diseñar espesores por el método MEPDG obtienen mayores espesores y mejora en el desempeño del pavimento, reduciendo el deterioro estructural y funcional.

A nivel local no existen investigaciones enfocadas en el análisis estructural y comparativo con dos metodologías de diseño de pavimentos flexibles diferentes, el MEPDG y el tradicional, no obstante, el estudio de Rodríguez (2019), realiza una evaluación de pavimentos flexibles por el método Paver en la avenida Leopoldo Carrera Calvo del cantón La Libertad, con el fin de conocer el estado de la vía de estudio, entre estas está conocer el estado de fatiga y las deformaciones por ahuellamiento que se han efectuado en la estructura de pavimento. Así se aplican nuevos mecanismos de evaluación de pavimentos flexibles, que permitirán al profesional de ingeniería civil y generales, ser parte de nuevos mecanismos de investigación.

1.3 HIPÓTESIS.

1.3.1 Hipótesis general

El comportamiento de las estructuras de pavimento flexible evaluado mediante el método mecanicista-empírico permite realizar diseños óptimos y funcionales que los evaluados por el método AASHTO-93.

1.3.2 Hipótesis específicas

H.E.1: Mediante la metodología AASHTO 93 se diseñarán 3 estructuras de pavimentos flexibles.

H.E.2: Las estructuras de pavimentos diseñadas serán evaluadas mediante los parámetros y criterios de cada una de las alternativas y métodos de diseño.

H.E.3: Mediante las alternativas de diseño del método empírico-mecanicista se efectuarán propuestas de diseños de pavimentos flexibles para los tres niveles de tráfico especificadas.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 Objetivo General

Realizar el análisis estructural y comparativo en el diseño de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE Y WinDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método empírico AASHTO 93, para evaluar el desempeño de diferentes estructuras de pavimentos para tres niveles de tráfico.

1.4.2 Objetivos Específicos

O.E.1: Diseñar estructuras de pavimentos basado en tres niveles de tráfico diferentes mediante la metodología AASHTO 93.

O.E.2: Evaluar las estructuras de pavimentos flexibles obtenidas con Metodología empírica AASHTO 93, aplicando criterios empíricos – mecanicistas.

O.E.3: Efectuar el análisis estructural y comparativo de los espesores de pavimentos resultantes para los tres niveles de tráfico considerados.

1.5 ALCANCE.

El presente tema de estudio tiene como alcance elaborar un análisis estructural y comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE Y WinDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93, con el propósito de generar bases teóricas y prácticas, que permita al ingeniero civil la facultad de elegir por un método o alternativa de diseño específico.

Las dos metodologías determinan la carga actuante y proyectada que produce el tráfico pesado, sin embargo, con la metodología AASTHO se determina la estructura del pavimento a lo largo de un periodo de diseño, y las alternativas IMT-PAVE y WinDEPAVE se extiende a utilizar una herramienta mecanicista que nos permitirá realizar un diseño de pavimentos en base a la carga definida por espectros de carga y efectuar el análisis de su comportamiento a través evolución en el tiempo.

Durante el análisis comparativo que se realizará a un diseño de pavimento flexible, me limitaré a realizar esta comparación con pavimentos flexible, se efectuará la comparación de los resultados que cada una de las alternativas conlleva; de lo cual se concluirá y se darán recomendaciones, mencionando de igual forma cuál de las alternativas es más confiable y de aplicación.

1.6 VARIABLES.

1.6.1 Variables Dependientes.

Obtención de Espesores de pavimentos flexibles para tres niveles de tráfico.

1.6.2 Variables Independientes

Métodos mecanicistas empírico IMT-PAVE y WinDEPAV y método empírico AASHTO 93.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DE PAVIMENTOS.

Lizcano y Quintana (2015) manifiestan que los pavimentos para vías y rutas urbanas son una estructura multicapa diseñadas para soportar cargas impuestas por el tránsito y condiciones ambientales, con el fin de brindar al conductor un camino cómodo, seguro y confortable.

2.1.1 Características de los Pavimentos.

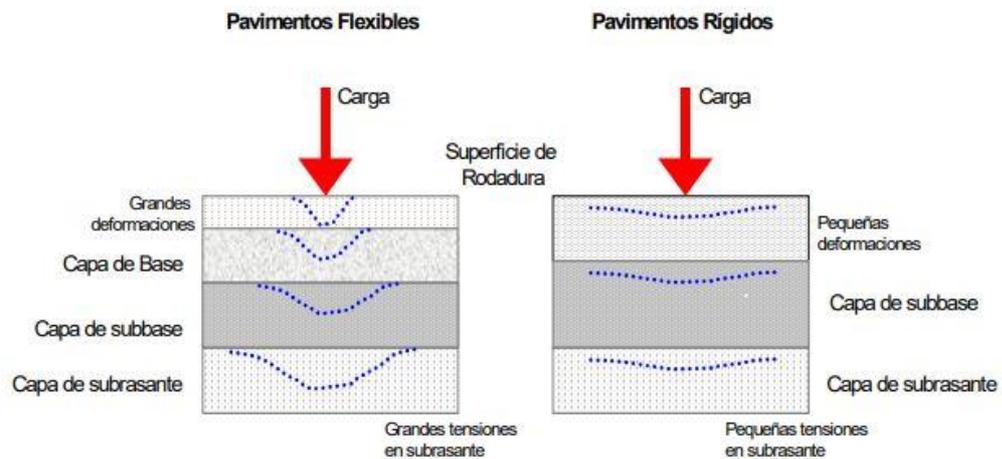
Con base en Castro et al. (2020, pp. 5-6) los pavimentos tienen características tales como:

- Distribución adecuada de cargas y tensiones que se forma en la superficie.
- Estructuralmente resistente para evitar fallas y agrietamientos.
- Debe tener un coeficiente de fricción apropiado para evitar deslizamientos y tener una textura adecuada.
- Resistencia a esfuerzos destructivos del tránsito, intemperie y agua.
- Debe tener una superficie impermeable con condiciones de drenaje.
- Adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento, para evitar accidentes en su vida útil.

Las estructuras de pavimentos pueden ser flexibles y rígidos y su desempeño varía por la aplicación de la carga, cómo la **Figura 1** muestra a continuación:

Figura 1

Comportamiento del pavimento flexible y rígido



Nota. La **figura 1** representa la distribución de cargas en la estructura de pavimentos flexible y rígido. Tomado de *Coronado Iturbide (2002, p. 93)*

Las capas que conforman un pavimento flexible son las siguientes:

- a) **Subrasante.** Rahim y George (2005, p. 4) destaca que la capa de pavimento que experimenta una presión de confinamiento debido a sobrecarga es la subrasante. De acuerdo con Quintana et al. (2012, p. 175) el módulo resiliente M_r , es la ecuación matemática desarrollada a través del tiempo.
- b) **Subbase.** Citando a Escobar et al. (2012) la subbase es una capa de transición, que está diseñada para soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, actuando como filtro y que al llegar a la capa de subrasante, esta pueda soportar variaciones inherentes a dicho suelo sin afectar a la subbase.
- c) **Base.** Francois et al. (2019) describen que la base de pavimentos flexibles puede ser bases agregadas separadas y bases agregadas unidas y la función es la misma, distribuir y transferir las cargas ocasionadas por

el tránsito, a la subbase y mediante este a la subrasante, sobre la base se coloca la capa de rodadura.

- d) Carpeta asfáltica.** Auqui y Ramírez (2019, p. 277) definen la carpeta asfáltica como la capa superior de la estructura de pavimento flexible y es ubicado sobre la base granular con el propósito de sostener directamente el tránsito. También, es la capa de mejor calidad debido a que debe ofrecer características como fricción, suavidad, control de ruido y drenaje.

2.2 ENFOQUE DE DISEÑO MEPDG (THE MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE).

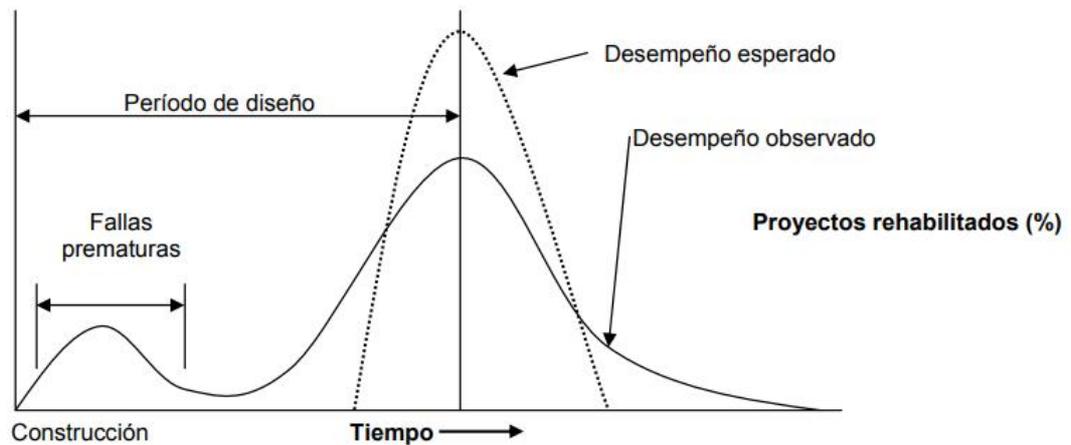
Citando a Li et al. (2011, p. 117), el enfoque de diseño que ofrece la MEPDG está compuesta de tres etapas primordiales. Como se muestra en la **figura 2** el inicio del diseño empieza con la etapa 1, que comprende los valores de entrada, se identifican las estrategias viables y se efectúa un estudio de los fundamentos. Dicho con las palabras de Ahmed y Erlingsson (2015, p. 488) la estructura de pavimento se analiza con la entrada del tráfico predominante y condiciones ambientales (temperatura, precipitación, radiación solar, nubosidad y viento, velocidad) de las estaciones meteorológicas. Ktari et al. (2022) destaca que la identificación de estos mecanismos relacionados con el clima que conducen a la degradación del pavimento es un tema de investigación importante que pueden ayudar a optimizar la inversión en la construcción, mantenimiento y reparación de la red vial.

Consiguiente en la etapa 2 se efectúa el análisis estructural/desempeño. Como afirman Lu et al. (2011, p. 568) el período de vida de los pavimentos asfálticos depende de diversos componentes, uno de ellos es comprender los contribuyentes claves de la durabilidad para su desempeño. De Ceita (2009, p. 13) verifica la idea con la caracterización de materiales cuantificada, definiéndola por el módulo resiliente de elasticidad (M_r) y relación de Poisson. Se efectúa el diseño de prueba inicial y esta se analiza de manera incremental a lo largo del tiempo usando los modelos de respuesta del pavimento, mostrando el daño acumulado de deterioro y suavidad con el tiempo.

En consecuencia, se obtiene un diseño estructural del pavimento mediante un proceso iterativo, como resultado de una comparación entre el rendimiento esperado y los criterios de diseño para los múltiples daños previstos hasta que todos los criterios de diseño se cumplan con el especificado nivel de confiabilidad. (Li et al., 2011, p. 117).

Figura 2

Desempeño de los pavimentos a través del tiempo.

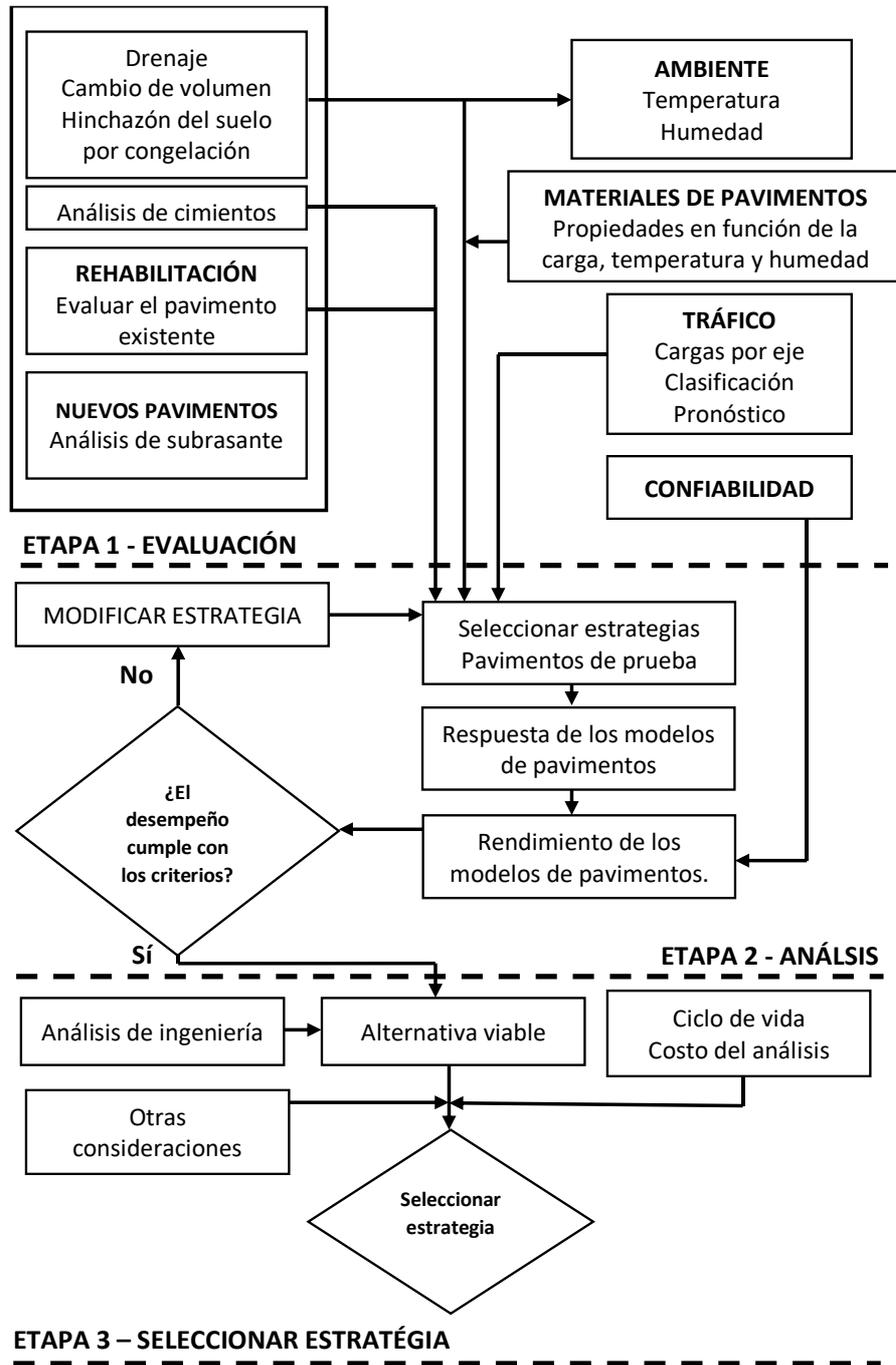


Nota. La **figura 2** muestra el alcance de la metodología mecanicista-empírica, que proporciona la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que pueden generarse, de modo que, aumenta en gran medida la confiabilidad de los diseños. Fuente: *Leiva Villacorta (2006, p. 5)*

Y para finalizar este proceso se encuentra la etapa 3 en donde se realiza la evaluación de las alternativas estructuralmente viables, análisis ingenieril y profesional. Batista (2014, p. 40) comenta que en esta última etapa se realiza un examen de resultados y se evalúa si el diseño de prueba ha cumplido con los criterios de eficiencia de pavimento. El diseño final consiste en comparar el número de repeticiones esperadas de tránsito durante el período de diseño del pavimento con el número de repeticiones permisibles en la carpeta asfáltica y en las capas granulares derivados de los modelos de deterioro. Si resultan mayores, quiere decir que los materiales todavía no satisfacen todas las repeticiones de tránsito, por lo tanto se repite el procedimiento modificando la geometría del pavimento o las características elásticas de las capas (módulos dinámicos y módulos resilientes) hasta que cumplan con la sollicitación de tránsito esperada

Figura 3

Esquema de las 3 Etapas de la MEPDG.



Nota. La **figura 3** detalla los estados de desarrollo de las tres etapas de la MEPDG.

Tomado de *Li et al. (2011, p. 117)*.

2.3 MÉTODO DE DISEÑO AASTHO 93

Officials (1993) establecen que la AASHTO se instituye con el propósito de diseñar una vía que tenga un desempeño óptimo para el tránsito y especificaciones del

proyecto. Este método de diseño incluyó el concepto de falla funcional, a diferencia de los métodos expuestos hasta el momento, tales como "serviciabilidad", indicando la capacidad que tiene un pavimento durante un periodo de vida útil, el "comportamiento" de la estructura de pavimento, definido cómo la capacidad de soporte de los materiales al tráfico durante su vida útil. Abd El-Raof et al. (2020, p. 1) mencionan el número estructural de pavimento (SNeff) como valor numérico usado como indicador de la resistencia de pavimento. Conforme con la metodología señalada en la Guía de diseño AASHTO 93, se debe considerar la ecuación 1 para obtener el número de cargas equivalentes:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log(\Delta PSI)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

Ecuación 1: Ecuación de diseño AASHTO 93

En dónde:

SN= Número estructural en pulg

W18= Número de cargas equivalente a 18 Kips (80 Kn)

So= Desviación estándar de las variables presentes.

Zr= Coordenada del área igual a R (Confiabilidad) en la curva de distribución estandarizada.

ΔPSI= Pérdida de la serviciabilidad.

MR= Módulo de resiliencia, subrasante

2.3.1 Variables de diseño de Pavimento flexible.

La gran mayoría de los métodos de diseño de pavimentos flexibles desarrollan una metodología general de diseño empírico- mecanicista aceptada internacionalmente con algunas variantes en su ejecución.

- a) **Periodo de diseño.** La estructura de pavimento flexible se realiza en primera instancia en función del periodo de diseño para soportar la derivación acumulativa de tránsito. Harvey et al. (2016) describe que el ciclo de vida incluye entradas tales como la producción de materiales, diseño y etapas de fin de vida del pavimento.

Tabla 1

Estimación de periodo de diseño.

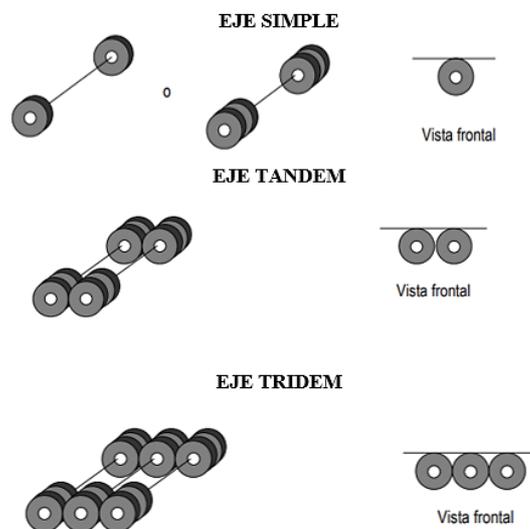
Tipo de Carretera	Periodo de diseño
Autopista regional	20-40 años
Troncales Suburbanas	15-30 años
Troncales rurales	
Colectoras suburbanas	10-20 años
Colectores rurales	

Nota. La **Tabla 1** muestra los periodos de diseño que podemos adaptar al tipo de carretera. Adaptado de *Officials (1993, pp. II-7)*

b) Tránsito de diseño. Minaya y Ordoñez (2006) definen el volumen de tránsito cómo la cantidad de vehículos que circulan por un lugar específico o un carril durante un tiempo determinado. El método empírico AASHTO se fundamenta en transformar los diferentes pesos de los vehículos a un número equivalente de ejes de 80KN, y a partir de esto se llamará ESAL (Carga de ejes equivalente). Los tipos de ejes referentes son: eje sencillo, posee dos ruedas en los extremos, eje tándem, contiene 2 ejes con dos ruedas en los entremos, eje trídem, con 3 ejes con dos ruedas en los extremos

Figura 4

Tipos de ejes equivalentes



Nota. En la **figura 4** muestra los 3 tipos ejes equivalentes, eje simple, eje tándem, eje trídem para configuración vehicular. Fuente: *Minaya y Ordoñez (2006)*

Molina y López (2020, p. 2) enfatizan que el **ESAL's de diseño** por cada vehículo es obtenido mediante la multiplicación del tránsito de diseño y FC y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ESAL's \text{ por carril de tránsito} = LD * LC * ESAL's \text{ de diseño} \quad (2)$$

Ecuación 2 ESAL'S DE DISEÑO.

- **Factor de distribución por carril.** El LC se especifica como el carril de diseño que soportará la mayor cantidad de ESAL's.

Tabla 2

Factor de Distribución Carril (Fc)

Nº Carriles en 1 dirección	% ESAL en el carril de diseño
1	100
2	80 – 100
3	60-80
4	50-75

Nota. La **Tabla 2** muestra el % de ESAL en el carril de diseño. Tomado de *Officials (1993)*

- **Factor de distribución por dirección.** Generalmente es 0.5, el factor de distribución por dirección especifica que, por el total del volumen de tránsito, la mitad o mayor de acuerdo al caso va para cada dirección.

Tabla 3

Factor de distribución por dirección (Fd)

Nº Carriles en 2 direcciones	% de camiones en carril de diseño
2	50
3	47,5
4	45(35-48)
6 o más	40(25-48)

Nota. En esta tabla podemos observar los valores de % de camiones en el carril de diseño. Tomado de *Officials (1993)*

- c) **Confiabilidad.** De acuerdo con Gómez (2014, p. 52) esta posibilidad está en función de componentes que influyen el pavimento. Es una medida que acoge cierto valor de certeza en el proceso de diseño para certificar que las diferentes medidas incorporadas alcancen el periodo de diseño.

Tabla 4

Niveles recomendado de Confiabilidad, R

FUNCIONALIDAD DE LA VÍA	URBANA	RURAL
Autopistas	85-99,9	80-99,9
Troncales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Ramales y Vías Agrícolas	50-80	50-80

Nota. La **Tabla 4** especifica valores de confiabilidad recomendados para la funcionabilidad de la vía. Tomado de *Officials (1993)*

- d) **Serviciabilidad.** Coronado (2002, p. 152) define la serviciabilidad como la calidad de servicio de la estructura de pavimento flexible. El índice de Serviciabilidad Presente, PSI, varía de 0 (carreteras imposibles de transitar) a 5 (carretera perfecta). Officials (1993, p. 12) sugiere valores de serviciabilidad final (Pt) de 2.5 para el diseño de carreteras principales y de 2.0 para las carreteras con menores volúmenes de tránsito y para Po para pavimento flexible una serviciabilidad de 4.2.

La guía de diseño AASHTO 93 usa la variación total del índice de serviciabilidad (Δ PSI) a modo de criterio de diseño, determinado cómo:

$$\Delta\text{PSI} = P_o - P_t \quad (3)$$

Ecuación 3. Pérdida de serviciabilidad

- e) **Desviación estándar (ZR).** La desviación estándar (Z_r) se toma en base la confiabilidad escogida de acuerdo al nivel de tránsito establecido por el tema investigativo. A continuación, se presentan los valores de desviación estándar.

Tabla 5*Desviación estándar (ZR)*

Valor de Zr en la curva normal para	
(R)	ZR
50	0
60	0,253
70	0,524
75	0,674
80	0,841
85	1,037
90	1,282
91	1,34
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	3,09
99,99	3,75

Nota. Esta tabla define los valores de la desviación estándar (Zr) para el nivel de Confiabilidad. Tomado de *Officials (1993)*

- f) **Desviación estándar de todas las variables (So).** Esta medida muestra el error o desviación del diseño de las condiciones de diseño y la variación de la predicción en el comportamiento del pavimento.

Tabla 6*Desviación estándar recomendada.*

Valores Recomendados para la Desviación Estándar (So)	
Condición de Diseño	Desviación Estándar

Variación de la predicción en el comportamiento del pavimento (sin error de tráfico)	0,25
Variación total en la predicción del comportamiento del pavimento y en la estimación del tráfico (0.45 valor recomendado)	0,35 — 0.50

Nota. La **Tabla 6** muestra los valores de desviación estándar para todas las variables recomendado según la condición del diseño. Tomado de *Officials (1993)*

g) Condiciones de drenaje. Las condiciones de drenaje parten de las características y capacidad de drenaje del material de base y/o subbase granular. Rokade et al. (2012, p. 1311) consideran que dentro del sistema de pavimento uno de los factores más influyentes es el exceso de humedad.

Tabla 7

Características de drenaje (Base y Subbase)

<i>Nivel de Drenaje</i>	<i>Agua eliminada dentro de</i>
Excelente	Dos (2) horas
Buena	Un (1) día
Regular	Una (1) semana
Pobre	Un (1) mes
Muy pobre	El agua no drena

Nota. La **Tabla 7** define la capacidad de drenaje del material. Tomado de *Officials (1993)*

Officials (1993) expone una tabla de los coeficientes recomendados de drenaje.

Tabla 8

Coeficientes recomendado de drenaje

CALIDAD DE DRENAJE	% de tiempo en que la estructura del pavimento es expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	MENOS QUE 1%	1 - 5%	5 - 25%	MAYOR QUE 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 POBRE	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Nota. La **Tabla 8** muestra coeficientes de drenaje recomendados en calidad del mismo. Tomado de Officials (1993)

h) Ensayos de suelos. Son diferentes los ensayos en los cuáles podemos obtener la resistencia de los suelos, el ensayo de módulo de resiliencia Mr. AASHTO - 294 es el más sensible a las propiedades del suelo en comparación a otros ensayos de resistencia. Coronado (2002) define al módulo de resiliencia cómo un valor de la propiedad elástica del suelo que expone las características no lineales de su desempeño. La guía de diseño AASHTO también sugiere las siguientes ecuaciones para el cálculo del módulo resiliente:

$$MR (PSI) = 1500 \times CBR$$

$$MR (KPA) = 10342 \times CBR \quad (4)$$

$$MR (KG/CM2) = 100 \times CBR$$

Ecuación 4 Módulo resiliente (Mr.)

Se han mostrado correlaciones que permiten obtener el Mr. con CBR mayores al 10%.

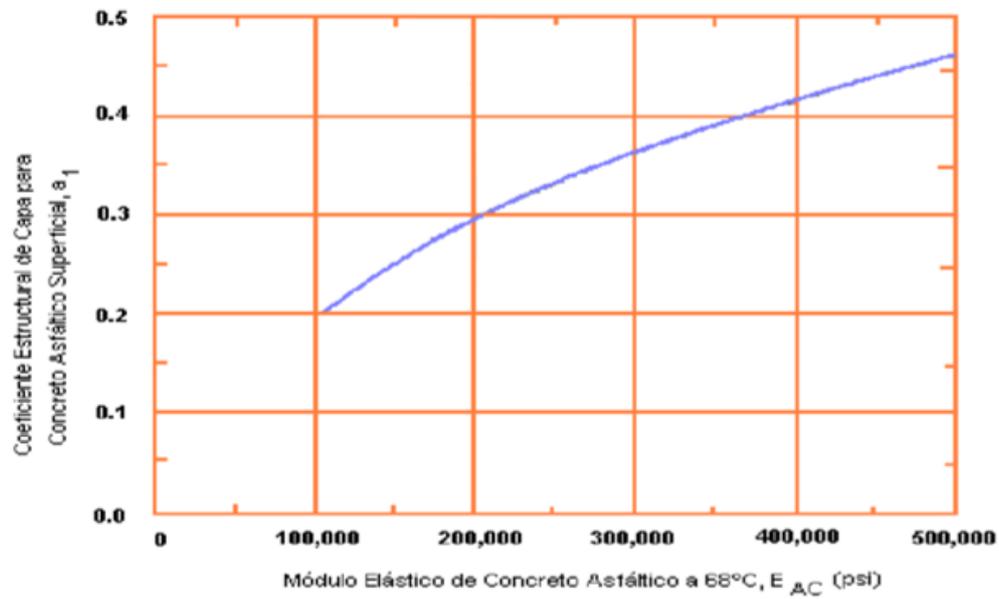
$$MR = 3000 * CBR^{0.65} (PSI) \quad (5)$$

Ecuación 5 Módulo resiliente entre 10 y 20%

i) Coeficientes estructurales de capa. Como menciona Zambrano (2016), se determinan los coeficientes estructurales (a1, a2, a2) que están en función de los materiales de las capas de la estructura de pavimento, carpeta asfáltica, base y subbase, granular, las cuales la selección del coeficiente se realiza en base módulo resiliente del material especificados en las siguientes figuras:

Figura 5

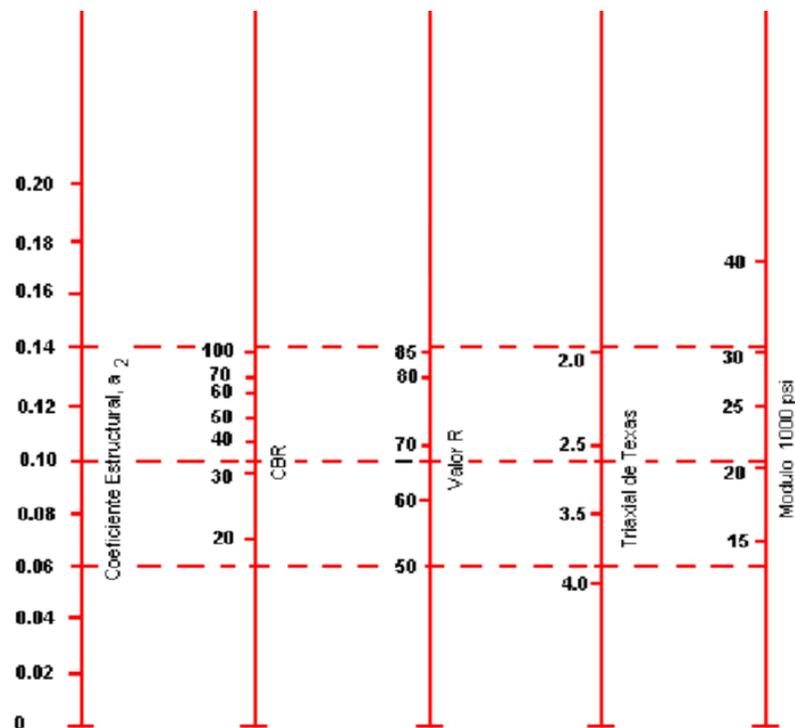
Coefficiente estructural a1



Nota. Con la **Figura 5** se obtiene el coeficiente estructural a_1 en función del módulo elástico. Tomado de *Officials (1993)*

Figura 6

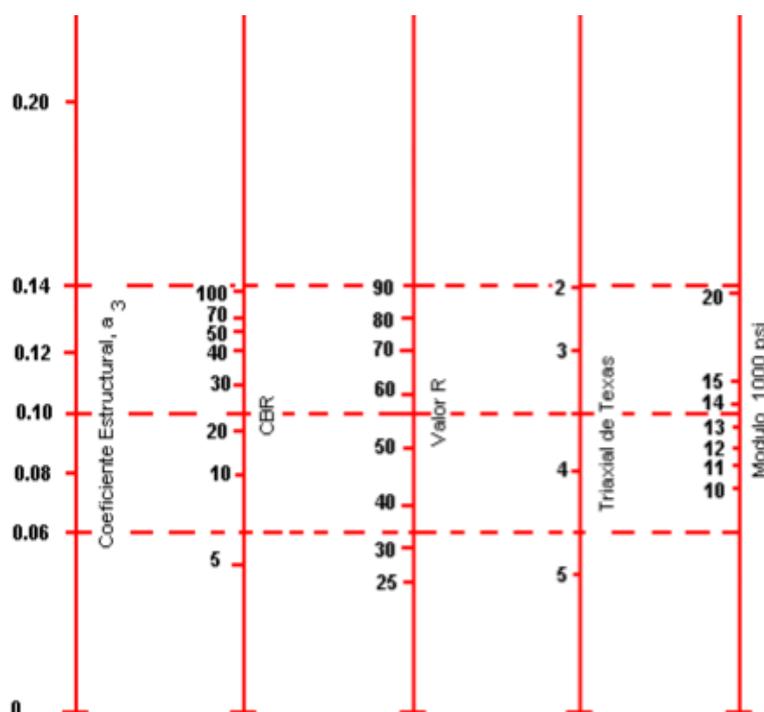
Variación de coeficiente de la capa de base granular (a_2)



Nota. Con la **Figura 6** se obtiene el coeficiente de capa a_2 de base granular con la variación de parámetros de resistencia. Tomado de *Officials (1993)*

Figura 7

Variación de coeficiente de capa de subbase granular (a_3)



Nota. Con la **Figura 7** se obtiene el coeficiente a_3 de subbase granular en función a parámetros de resistencia. Tomado de *Officials (1993)*

- j) **Determinación de espesores mínimos.** Officials (1993) ofrece un método para la determinación de espesores del pavimento, con el fin de obtener el SN o número estructural que está en función de los espesores mínimos para cada capa.

Tabla 9

Espesores mínimos sugeridos

Espesores mínimos sugeridos - AASHTO 93		
Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50.000	3 cm	10 cm
50.000-150.000	5 cm	10 cm
150.000-500.000	6.5 cm	10 cm
500.000-2,000.000	7.5 cm	15 cm
2,000.000-7,000.000	9 cm	15 cm
Más de 7,000.000	10 cm	15 cm

Nota. La **Tabla 9** sugiere espesores mínimos de carpeta y base en referencia al número de ESAL's. Tomado de *Officials (1993)*.

La expresión que une el SN con los espesores es:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (6)$$

Ecuación 6 Estimación del número estructural.

Donde:

a₁, a₂, a₃: coeficientes estructurales, adimensionales.

m₁, m₂, m₃: coeficientes de drenaje.

D₁, D₂, D₃ son los espesores de capas.

Los datos escogidos para el diseño de pavimento flexible se agregan en el software ecuación AASHTO 93, interfase que se usa para el cálculo de SN

2.4 DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO IMT-PAVE.

El Instituto mexicano del Transporte, ha instituido una herramienta tecnológica para el diseño de pavimentos flexible que responde al nuevo concepto mecanicista-empírico, nombrada IMT PAVE, accesible a todos los usuarios, y es una alternativa que permite realizar la predicción adecuada de la evolución de los deterioros de la estructura de pavimentos bajo estándares de calibración del proyecto (Anguas Garnica & Hernández Domínguez, 2013). Mediante esta herramienta se analizarán los 3 diseño de pavimentos flexibles y se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones de diseño:

2.4.1 Consideraciones de diseño.

- a) **Horizonte del proyecto.** Representa el tiempo previsto para el proyecto, el periodo de vida útil de la estructura de pavimentos.
- b) **Clasificación vehicular.** Anguas y Hernández (2013) comentan que la caracterización correcta de tránsito es esencial para realizar el diseño de pavimentos con capacidad de desempeño durante su periodo de vida proyectado. Este es un componente de entrada en dónde se especifican las cantidades en % de todos los tipos de vehículos que circulan por la vía.

- **TPDA (Tránsito Promedio Diario Anual).** C. t. MTOP (2013, p. 52) define el TPDA cómo el volumen de tránsito general que circula sobre una vía por los 365 días del año. Este valor se ubica como un valor de entrada en el IMT PAVE porque es un flujo que influye directamente en el deterioro de pavimentos.

c) **Espectros de cargas.** De acuerdo con Anguas y Hernández (2013) el concepto de espectro de carga desde que se instauró la MEPDG ha tenido gran aceptación en la actualidad, ya que permite caracterizar las cargas de los vehículos en una distribución de carga de ejes durante un periodo de tiempo. Por eso, es de tal importancia definir el nivel de carga hacia el cual se debe generar los espectros de carga.

Acevedo (2022, p. 4) y Castro et al. (2021, p. 9) ratifican que los datos de tráfico pueden ser recolectados usando pesaje en movimiento (WIN) o pesaje en puente (BWIN), mediante esto se obtiene la información de tráfico detallada, carga por eje y configuraciones con el tiempo, generalmente es presentado en forma de espectros de carga.

- **Especificaciones de nivel de carga**

El software IMT-PAVE permite el ajuste de los espectros de carga de acuerdo al país en el que se va aplicar la metodología de diseño, y la define de la siguiente manera:

Legal. Nivel de carga legalmente de cada país.

Ligera sobrecarga. Leve aumento de carga

Alta sobrecarga. Aumento permitente de carga

Muy alta sobrecarga. Excede la capacidad de carga

Avanzado. Opción del software que permite la personalización de los espectros de carga.

d) Análisis espectral de la estructura. Se definen las capas de la estructura de pavimento, a razón de que los espesores desempeñen con las normativas y exigencias estructurales que el proyecto requiera y como base fundamental del diseño es el análisis de las propiedades de los materiales que tendrá la capa de rodadura y los materiales granulares correspondientes a base, subbase y subrasante.

- **Carpeta asfáltica.** la capa de rodadura debe cumplir condiciones mecánicas óptimas para su desempeño, muy bien se pueden obtener mediante ensayos de laboratorio cómo a partir de la **Tabla 10**.

Tabla 10

Valores característicos de módulos dinámicos

Material	Rango de Ed, Mpa	V. típico de Ed, Mpa
Mezcla asfáltica diseñada con la Marshal, asfalto convencional	2000-4000	3000 Mpa
Mezcla asfáltica de alto desempeño, metodología Superpave, Protocolo AMAAC, asfalto modificado	4000-6000	5000 Mpa
Mezcla asfáltica de alto módulo, metodología especial.	8000-12000	10000 Mpa

Nota. La **Tabla 10** establece rangos y valores típico de módulos dinámicos de acuerdo al material de la mezcla asfáltica. Tomado de *Anguas Garnica and Hernández Domínguez (2013)*, pág. 11.

- **Materiales Granulares.** La metodología de diseño de IMT PAVE, resalta el Mr Módulo resiliente como componente importante para la evaluación de los materiales, usando correlaciones que permitan la obtención del mismo, o de acuerdo a obtener resultados más precisos y factibles la ejecución de ensayos, cómo también recomienda el uso de la **Tabla 11**.

Tabla 11*Valores característicos de Mr, para Clasificación S.U.C.S*

Clasificación del suelo	Rango de Mr (Mpa)	Valores típicos de Mr (Mpa)
CH	39-90	55
CH+cal	100-200	150
CH+cemento	200-300	250
MH	55-120	80
CL	90-165	117
ML	50-100	75
SW	193-259	220
SP	166-228	193
SW-SC	148-214	176
SW-SM	166-228	193
SP-SC	148-214	176
SP-SM	166-228	193
SC	148-193	166
SM	193-259	221
GW	273-350	310
GW+cemento	750-2000	1500
GW+Asfalto	500-1500	1000
GP	245-300	270
GW-GC	193-276	238
GW-GM	245-179	266
GP-GC	193-276	235
GP-GM	214-276	252
GC	166-259	214
GM	228-290	266

Nota. La **Tabla 11** establece rangos y valores típicos de módulos resilientes según la clasificación de suelos granulares. Tomado de Manual de Usuario IMT PAVE, pág. 11, por Paúl Garnica y Roberto Hernández

- e) **Modelos de daño.** Anguas Garnica and Hernández Domínguez (2013) resaltan el concepto de espectro de daño definido por Miner en 1945, que, por cada tipo de eje y carga, resulta el cociente entre el No. de repeticiones previstas por año y el No. de repeticiones admisibles, representada en la ecuación siguiente.

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (7)$$

Ecuación 7 Ecuación de daño total de la estructura de pavimento

- **Fatiga.** Dinigdae, Onifade, Jelagin, and Birgisson (2015) argumentan que se supone una presión de contacto normal uniforme bajo la carga en la superficie de la capa de concreto asfáltico, lo que ocasiona un esfuerzo de tracción horizontal máximo en la parte inferior de la capa de AC y el esfuerzo de compresión horizontal máximo en la superficie bajo la carga. EL Nf (número de repeticiones admisibles) para este modelo de daño, se obtiene con la ecuación:

$$Nf = f1 \varepsilon 1^{-f2} \quad (8)$$

Ecuación 8 Ecuación de Nf (Número de repeticiones adm.)

- **Deformación permanente.** La ecuación que establece el deterioro de las capas inferiores es la siguiente:

$$Nd = f4 \varepsilon c^{-f5} \quad (9)$$

Ecuación 9 Ecuación de Nd para deformación permanente.

- f) **Análisis probabilista.** El análisis probabilista proporcionará como resultado la vida útil con respecto a los modelos de daño descritos anteriormente y este se realiza en relación a la confiabilidad escogida para el pavimento.

2.5 DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO WINDEPAVE 2.6

Varela (2018) declara al software WinDEPAV cómo una herramienta tecnológica que permite realizar el diseño de pavimentos flexibles en un número de 2 a 6 capas,

insertando las características y comportamiento materiales, para que luego el mismo realice un análisis estructural en base a criterios de falla.

2.5.1 Consideraciones de diseño.

El diseño de la estructura de pavimentos en esta interfaz WinDEPAV 2.6 se mantiene en una sola pantalla, y los datos de entrada comprenden el nombre del proyecto y el número de capas en las cuáles está basada el diseño.

a) **Propiedades mecánicas de los materiales.** Una de las consideraciones importantes de las capas de la estructura de pavimentos es la estimación de las propiedades mecánicas y la metodología que aplica esta alternativa permite obtener estas componentes mediante los siguientes modelos:

- **Modelo de Barber.** Coria et al. (2018, p. 168) propusieron un sistema estructural de equivalencia, el módulo para determinar el módulo elástico de un pavimento multicapa, el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$E(n) = E(n - 1) \left\{ \begin{array}{l} A \cdot \log[h(n)] + B \cdot \log 10 [E(n - 1)] \\ -C \cdot \log 10 [h(n)] \cdot \log 10 [E(n - 1)] - D \end{array} \right\} \quad (10)$$

Ecuación 10 Ecuación de Barber para materiales granulares.

- **Modelo Shell.** Thenoux (1995, p. 13) comenta que este **modelo** está desarrollado bajo conceptos mecanicistas de comportamiento, que admite que la estructura de pavimentos, se forma con materiales elásticos, homogéneos e isotrópicos, y en la mayoría de diseño de estructuras, pueden representar mediante un sistema de 3 capas. La ecuación que determina el módulo es:

$$E(n) = 0.20 \cdot h(n)^{0.45} \cdot E(n - 1) \quad (11)$$

Ecuación 11 Ecuación Shell (Método de diseño de 3 capas)

Propiedades mecánicas. Massenlli y de Paiva (2019), en su estudio de "Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia" representan los datos que usaremos para el presente estudio.

Tabla 12

Valores característicos de Mr, para Clasificación S.U.C.S

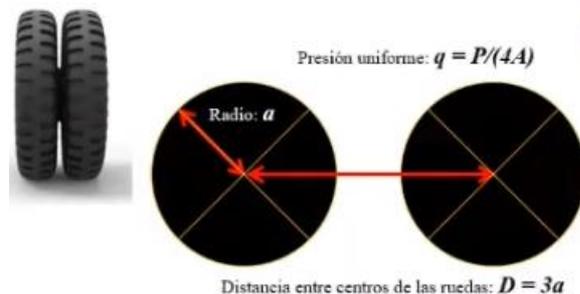
PARÁMETROS DE DISEÑO PARA ANÁLISIS MECANICISTAS		
CAPA	MÓDULO ELÁSTICO (Mpa)	Coef. De Poisson
Concreto Asfáltico	3500 a 1100	0.3
Base Granular	300 a 100	0.35
Sub-base granular	200 a 100	0.4
Subrasante	50 a 20	0.45

Nota. La **Tabla 12** define los módulos elásticos y relaciones de Poisson de las capas de pavimentos flexible. Tomado de Massenlli y de Paiva (2019).

- b) **Funciones de comportamiento.** Otro de los parámetros que podemos complementar en nuestro diseño es seleccionar varias capas, para el análisis de daño por tensión (fatiga), que por defecto habilita la primera capa para análisis por fatiga y la última por compresión.
- c) **Modelo de carga.** Maneja un semieje de carga, que representa una rueda doble conocida como Pacha mediante dos superficies circulares de radio A, separadas de centro a centro de $3a$ y aplican una presión uniforme q. Estos valores pueden ser calculado según las especificaciones de la siguiente figura:

Figura 8

Semieje de carga.



Nota. La **figura 8** represente el semieje de carga que maneja el modelo de carga, en la que se aplica una presión uniforme (q) en una rueda doble. Fuente. Varela (2018)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1.1 Tipo

El tipo de investigación aplicado en el presente trabajo de titulación es experimental, se ejecutará la evaluación de diseño de estructuras de pavimentos flexibles realizados con el método tradicional AASHTO-93, para luego comparar la respuesta estructural de los pavimentos flexibles obtenidos, aplicando criterios mecanicistas-empíricos, mediante la aplicación de los softwares IMT-PAVE Y WinDEPAVE.

3.1.2 Nivel

En el presente estudio se aplicará el nivel de investigación descriptiva y aplicativo:

- a) El nivel descriptivo del presente trabajo se centra en el análisis de las variables y criterios establecidos para el desarrollo de cada una de las metodologías de diseño de pavimento flexibles estudiadas.
- b) La investigación es aplicada ya que luego de haber realizado el análisis de los espesores de pavimentos obtenidos con las metodologías evaluadas, se realizarán propuestas de estructuras de pavimentos óptimas que alcancen los niveles de servicio y duración propuestas.

3.2 MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

3.2.1 Método

El método de investigación del presente trabajo de titulación es hipotético deductivo, porque se evaluarán tres niveles de ESAL's ajustados a la clasificación

funcional de una vía en base al TPDA (tránsito promedio diario anual) de acuerdo a la Normativa del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, para la ejecución de los diseños de pavimentos flexibles mediante el método empírico AASHTO 93.

3.2.2 Enfoque

El enfoque de la investigación es cuantitativo dado que el espesor de las estructuras de pavimento flexible varía según el nivel de tránsito de ESAL's. la información de tráfico se obtuvo de la clasificación funcional en base al TPDA (tránsito promedio diario anual) del MTOP.

3.2.3 Diseño

Se diseñan estructuras de pavimentos flexibles para tráficos de intensidad media, baja, alta con el método empírico AASHTO-93, para comparar su desempeño mediante la aplicación de metodologías mecanicista-empírica contenidas en los softwares IMT-PAVE y WinDEPAVE 3.0; y se elaborarán propuestas de diseño de espesores de pavimentos flexibles optimizadas.

3.3 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.

3.3.1 Población

En base al TPDA (tránsito promedio diario anual) se realizará el cálculo del tráfico para diseño de estructuras de pavimentos flexibles.

3.3.2 Muestra

Se tomará en cuenta el número de vehículos de la clasificación vehicular con sus pesos específicos de carga vigente por MTOP para proceder a convertir el tránsito en un número de ejes equivalentes de 80 KN, con lo cual se definirán los niveles de tráfico bajo (liviano), medio y alto (pesado) propuestos en el tema de investigación.

3.3.3 Muestreo

Los valores del TPDA (tránsito promedio diario anual), se escogieron de acuerdo con la clasificación funcional de la vía de la Normativa del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

3.4 METODOLOGIA DE O.E1: MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93.

3.4.1 *Diseño de estructuras de pavimentos flexibles para tráfico bajo, medio y alto.*

- a) **Caracterización de tránsito.** La finalidad de este estudio es realizar el análisis estructural y comparativo de los diseños de estructuras de pavimentos flexibles mediante el método empírico AASHTO 93 con la metodología mecanicista – empírica, para eso se establecieron 3 niveles de tránsito de ESAL's correspondientes a tráfico bajo, medio y alto, valores que se ajustaron a un tránsito promedio diario anual (TPDA) de acuerdo a la clasificación funcional de una vía, ya que el estudio no cuenta con un conteo anual de tránsito de 365 días.
- b) **Cálculo de ESAL's.** En base al TPDA se definió la clasificación vehicular y se especificaron las cargas del tránsito en función de los pesos límites reglamentarios para Ecuador. MTOP (2013, p. 37) considera diversas tipologías de vehículos de diseño similar a los ejes equivalentes dado por la AASHTO, **Figura 9**, y las clasifica en:
- Vehículos livianos (A) para motocicletas y automóviles.
 - Buses y busetas (B).
 - Camiones (C), derivados en C1 (dos ejes), C2 (tres ejes), C3(4,5, más).
 - Remolques (R), con características de tráiler o Dolly.

Figura 9

Clasificación vehicular según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO).

CUADRO DEMONSTRATIVO DEL TIPO DE VEHÍCULOS MOTORIZADOS REMOLQUES Y SEMIREMOLQUES							
TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)			
				Largo	Ancho	Alto	
2 D			7	5,00	2,60	3,00	
2DA			10	7,50	2,60	3,50	
2DB			18	12,20	2,60	4,10	
3-A			27	12,20	2,60	4,10	
4-C			31	12,20	2,60	4,10	
4-0			32	12,20	2,60	4,10	
V2DB			18	12,20	2,60	4,10	
V3A			27	12,20	2,60	4,10	
VZS			27	12,20	2,60	4,10	
T2			18	8,50	2,60	4,10	
T3			27	8,50	2,60	4,10	
S3			24	13,00	3,00	4,30	
S2			20	13,00	3,00	4,30	
S1			11	13,00	3,00	4,30	
R2			22	10,00	3,00	4,30	
R3			31	10,00	3,00	4,30	
B1			11	10,00	3,00	4,30	
B2			20	10,00	3,00	4,30	
B3			24	10,00	3,00	4,30	

Nota. La **Figura 9** describe longitudes y peso máximo permitido por tipo de vehículo. Fuente: Tomado de MTO (2013, p. 39)

Posteriormente a los efectos de cálculo, se los transforma en un número equivalente de ejes tipo de 80 KN o 18 Kips, mediante factores equivalentes de cargas LEF, valor numérico que formula la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una carga de un tipo de eje. Para su determinación, se usaron las siguientes ecuaciones determinadas por la AASHTO.

$$\frac{W_x}{W_{18}} \quad (12)$$

Ecuación 12 Factor equivalente de carga o LEF

Dónde:

W_x: No. de ESAL's de 80 KN que producen una pérdida de serviciabilidad

W₁₈: No. de ejes x KN que producen la misma pérdida de serviciabilidad.

En base a la prueba vial de la AASHTO, se desarrollaron las ecuaciones 13,14,15 y 16 para la determinación de los valores LEF.

$$G = \text{Log}\left(\frac{4.2-pt}{4.2-1.5}\right) \quad (13)$$

$$B_{18} = 0.40 + \frac{0.081 (L_x + L_{2s})^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_{2s}^{3.23}} \quad (14)$$

$$B_x = 0.40 + \frac{0.081 (L_x + L_{2x})^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_{2x}^{3.23}} \quad (15)$$

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{G/B_x}}{10^{G/B_{18}}} \right] [L_{2s}]^{4.33} \quad (16)$$

Dónde:

L₁₈= 18 Kips (carga del eje de 80 KN en Kips)

L_x= Peso del eje en Kips

L_{2s}= Código para eje estándar, 1.

L_{2x}= Depende del tipo de eje (1 para eje simple sencillo o eje simple dual, 2 para eje tándem y 3 para trídem)

G = función de la proporción de la pérdida de serviciabilidad en un tiempo t , para la pérdida potencial observada en el punto donde $t=1,5$.

β = función que determina la relación entre serviciabilidad y eje de carga.

Luego se determinó el total de tránsito de diseño aplicando los factores de distribución carril y dirección de la **Tabla 2 y 3**, respectivamente, el cual nos permitirá establecer el tipo de tráfico que ha circulado por la vía de estudio y proyectar los ejes equivalentes de ESAL's, a los años de diseños de vida útil del pavimento según la **Tabla 1** (periodos de diseño), se obtuvo los parámetros de confiabilidad con la **Tabla 4** según el tipo de tráfico (liviano, mediano y alto), y se consigue el número estructural del pavimento con la ecuación AASHTO por tanteo.

Se obtuvo la desviación estándar para la confiabilidad seleccionada aplicando la **Tabla 5** y mediante la **Tabla 6** se seleccionó la desviación estándar para todas las variables. Se formuló la ecuación 3 para la pérdida de serviciabilidad y con las condiciones de drenaje de la **Tabla 7**, se optó el coeficiente de drenaje recomendado en la **Tabla 8**. La ecuación 4 nos permite obtener el módulo resiliente, sin embargo, para el presente análisis se utilizó la **Tabla 10**.

Finalmente, con el uso de los nomogramas de las **Figuras 5,6,7**, se definió los coeficientes de capa estructurales de la carpeta asfáltica (a_1), base (a_2) y subbase (a_3). Con la ayuda de la **Tabla 9**, de espesores mínimos se estimó los espesores de las capa de la estructura para cada nivel de tráfico.

3.5 METODOLOGÍA DE O.E2: EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL MÉTODO EMPÍRICO MECANICISTA.

3.5.1 Alternativa de Diseño Imt-Pave

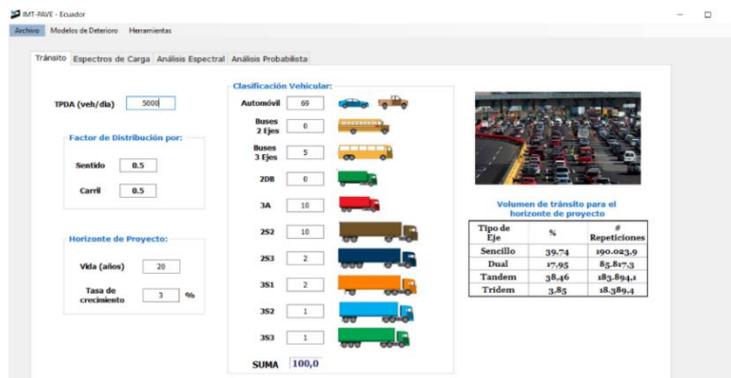
Esta herramienta nos permitió analizar la predicción adecuada de la evolución de los deterioros de las estructuras de pavimentos flexibles diseñados por

el método AASHTO 93 para los 3 niveles de tráfico establecidos. El proceso para la ejecución del análisis se dividió en 4 fases los cuales detallaré a continuación:

- a) **Fase 1.** Se realizó el ingreso de los datos de entrada, correspondiente al tráfico promedio diario anual (TPDA), factor de distribución por carril F_c , el factor direccional F_d , el horizonte del proyecto expresada en años incluyendo la tasa de crecimiento del tráfico y la clasificación vehicular expresada en porcentajes. Datos obtenidos con los mismos criterios de la norma AASHTO. Al completar el ingreso de dato en la Fase 1, se calcula el número de repeticiones por eje, especificado también en porcentaje.

Figura 10

Fas1. Pantalla principal de datos de entrada IMT-PAVE.



Nota. La **Figura 10** muestra la pantalla de la Fase 1 de IMT-PAVE, donde se realiza el ingreso de datos de entrada de la estructura a analizar. Fuente: El programa fue desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte, 2013.

- b) **Fase 2.** En esta segunda fase se requiere seleccionar el nivel de carga definidos por los espectros de carga de cada tipo de eje, simple, simple - dual, tándem y trídem. El nivel de carga que se usará para el análisis de todos los diseños será el legal ya que el software empleado para el objeto de estudio es el IMT-PAVE ECUADOR, el mismo que está ajustado para los niveles de carga de tráfico en Ecuador, considerados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. La aplicación de los espectros de carga ya no refiere a factores LEF como el método AASHTO 93, sino que se realiza el análisis en base a la distribución de

la carga de un conjunto de ejes durante un período de tiempo. De acuerdo al tipo de eje de la clasificación vehicular, los espectros de carga se distribuyen de la siguiente manera:

Tabla 13

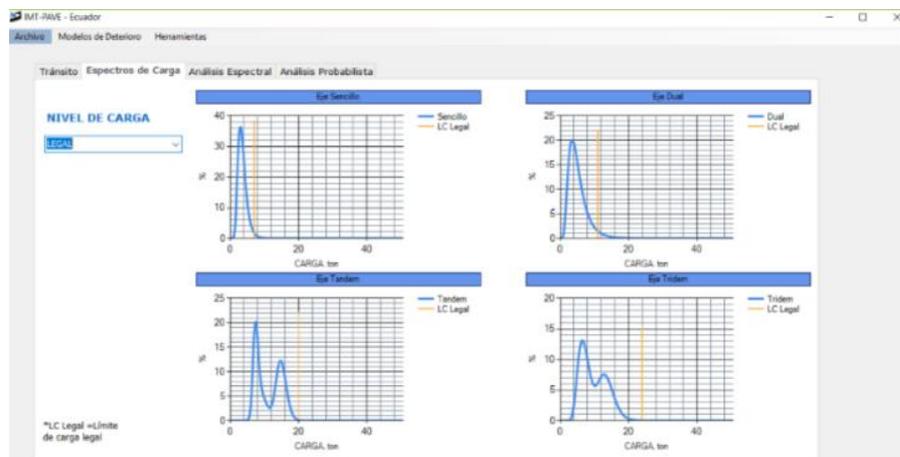
Valor espectral según la clasificación vehicular

CLASIFICACIÓN VEHICULAR	VALOR ESPECTRAL
Bus de 2 ejes	espectro simple + espectro dual
Bus de 3 ejes	espectro simple + espectro tándem
2DB	espectro simple + espectro dual
3A	espectro simple + espectro tándem
2s2	espectro simple + dual + tándem.
2s3	espectro simple + dual + trídem
3s1	espectros simples + tándem + dual
3s2	espectro simple+2 tándem
3s3	espectros simples + tándem + trídem

Nota. La **Tabla 13** representa el valor espectral de acuerdo a los ejes por vehículo de la clasificación vehicular. Fuente: Tomado de MTOP (2013)

Figura 11

Fase 2. Niveles de espectros de cargas para diferentes tipos de ejes.



Nota. **Fase 2** de espectros de carga de IMT-PAVE, donde se establece el nivel de carga en que evaluará el análisis. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*

- c) **Fase 3.** La fase 3 consistió en el ingreso de propiedades de las capas que componen las estructuras de pavimentos evaluadas (espesor y módulo resiliente), con la metodología AASHTO 93, una vez que terminamos con este proceso de ingreso de datos, se ejecutó el análisis espectral y probabilístico contenidos en el software, con los que se estimará si el espesor de pavimento alcanzará la duración prevista (periodo de diseño), en término de desempeño ante los dos tipos de deterioro evaluados que son el agrietamiento por fatiga de la capa asfáltica y el ahuellamiento por deformación de la subrasante.

- d) **Fase 4.** En esta fase se ajustará el espesor del pavimento evaluado anteriormente mediante el software IMT-PAVE, considerando el tipo de deficiencia estructural (fatiga o ahuellamiento) y se establecerán los espesores óptimos que permitan que el diseño estructural del pavimento alcance el periodo de diseño considerado para los tres niveles de tráfico considerados en el presente proyecto de tesis.

3.5.2 Alternativa De Diseño WinDEPAV

Se realizó el análisis de las estructuras de pavimentos flexible diseñadas bajo el método empírico AASHTO 93 aplicando la interfase WinDEPAV, con el objeto de conocer los factores de daño que se evalúan en los diseños realizados con esta metodología. El ingreso de datos se realizó de la siguiente manera:

- a) Se especifica el número de capas (2 a 6) que tiene la estructura de pavimento.

- b) Se ingresan las propiedades de la estructura, inicialmente definimos los valores de módulos elásticos de las capas de la estructura de pavimento, las relaciones de Poisson y los espesores correspondientes.

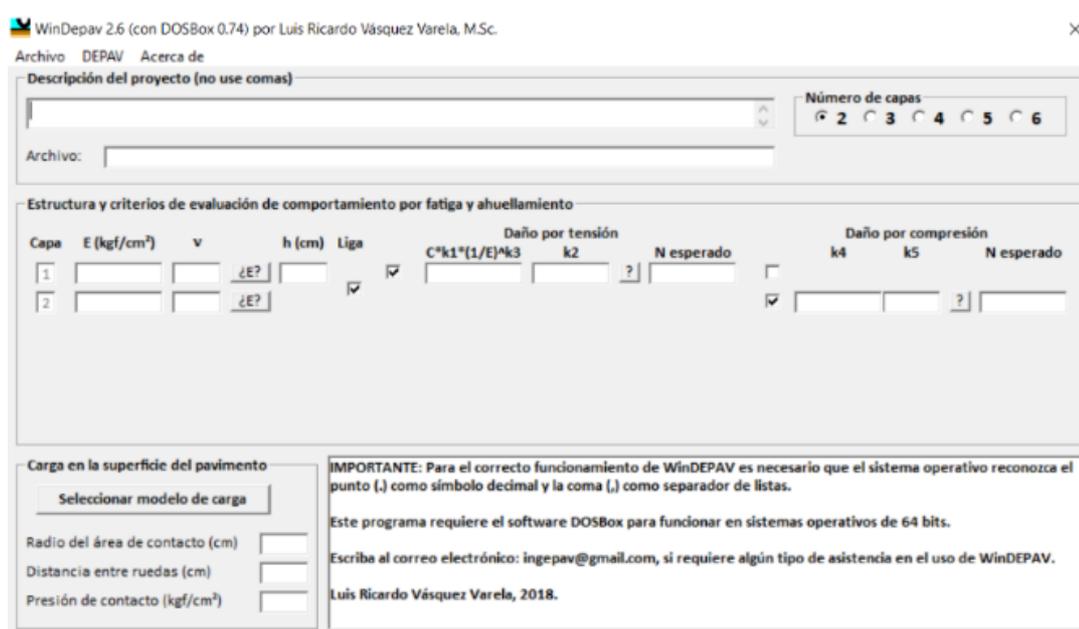
- c) Se selecciona el modelo de carga a usar, cabe recalcar que para el análisis de todos los diseños se selección el modelo de carga obtenido de acuerdo con el Instituto del Asfalto, que consiste en transformar todos

los pesos de los ejes de tráfico considerados a un solo eje de peso 8.2 Ton., considerado como el eje de diseño.

- d) Se selecciona el modelo de daño por tensión (capas asfálticas y/o capas de materiales estabilizados) y compresión (subrasante) que se usarán para el cálculo del número de repeticiones admisibles para los modelos de falla citados anteriormente, y en el cuadro de N esperado, se ingresa el valor del número de repeticiones esperadas calculadas previamente.
- e) Analizamos los resultados en el software, y de forma inmediata la interfase muestra una ventana, con los resultados de factores de daño para cada una de las estructuras de pavimento evaluadas, si el factor de daño (por tracción o compresión) es igual o mayor que 1 se deberá realizar el ajuste de espesores de capas ya sea a nivel de capa asfáltica y/o de espesor de capas granulares.

Figura 12

Pantalla principal del programa WinDEPAV 2.6



Nota. La **Figura 12** muestra la pantalla principal del programa WinDEPAV del método mecanicista-empírico. Fuente. *WinDEPAV2.6 (2018)*.

3.6 METODOLOGÍA DE O.E3: ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO DE LOS ESPESORES DE PAVIMENTOS RESULTANTES PARA LOS TRES NIVELES DE TRÁFICO CONSIDERADOS.

La estructura de pavimento flexible se la evaluó para tráfico, liviano, mediano y pesado, por tres métodos de diseño, que son: norma AASHTO 93, IMT-PAVE, WinDEPAV 2.6. Cabe indicar que los dos últimos análisis corresponden a métodos mecanicistas que se basa en el análisis del deterioro estructura y para ellos se usó el software correspondiente a cada método.

- Diseño con método AASHTO 93, el cual nos permitirá obtener el parámetro llamado número estructural (SN), cuyo valor es un indicativo del espesor total requerido del pavimento, para esto se determinaron las variables de diseño que integra este método, como son, la confiabilidad, la desviación estándar (Z_r), la desviación estándar de todas las variables (S_o), la serviciabilidad, el índice de serviciabilidad, las condiciones de drenaje, los coeficientes estructurales de capas, y se definen las propiedades de las capas del pavimento. Luego para el cálculo de espesores de cada capa se usó el criterio de espesores mínimos con el fin de realizar un diseño óptimo, funcional y económico del pavimento. Este procedimiento se aplicó para el diseño de pavimento flexible de los 3 niveles de tráfico propuestos para el desarrollo del tema de investigación.
- Diseño con la aplicación del Software IMT-PAVE. Se ingresó el tráfico promedio diario anual (TPDA), los factores de distribución por carril F_c , direccional F_d , el horizonte del proyecto expresada en años, la tasa de crecimiento del tráfico y la clasificación vehicular en porcentajes. Luego se seleccionó el nivel de carga definidos por los espectros de carga de cada tipo de eje, simple, simple - dual, tándem y trídem. Además se describió las propiedades de las capas que componen las estructuras de pavimentos y posteriormente, se ejecutó el análisis espectral y probabilístico, tomando en

cuenta que, este último análisis integra el coeficiente de variabilidad y confiabilidad.

- Diseño con la aplicación del Software WinDepav 2.6. Se ingresó las propiedades mecánicas de materiales, módulo resiliente y las características de la estructura de pavimento, tales como el espesor de las capas de pavimentos, relación de Poisson, número de repeticiones admisibles, y se escoge la fórmula empírica para cálculo de k_2 , y el número de repeticiones admisibles por fatiga y ahuellamiento. Finalmente, se efectúa el análisis, y el programa presenta los resultados en factores de daño, en el cuál este debe ser menor a 1 para su desempeño.

Dado los resultados estructurales obtenido por cada método, se establecieron cuadros representativos por cada nivel de tráfico con el fin de efectuar el análisis estructural y comparativo.

CAPITULO IV: DESARROLLO, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE O.E1: DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES POR EL MÉTODO AASHTO 93.

4.1.1 Descripción general de niveles de tráfico

La **tabla 14** describe los niveles de ESAL's establecidos para el diseño de pavimentos flexibles mediante el método AASHTO-93.

Tabla 14

Niveles de tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18 Kips)

NIVEL	TRÁNSITO EN EJES EQUIVALENTE
1	Menos de 50,000
2	500,001 – 2'000,000
3	Mayor de 7'000,000

Nota. El nivel 1 corresponde a un tráfico bajo, el nivel 2 a tráfico medio y el tercer nivel a nivel de tránsito de ESAL's alto.

4.1.2 Diseño de estructura de pavimento para tráfico bajo.

- a) **Cálculo de ESAL's de diseño.** Se evaluó el Nivel 1 correspondiente a ejes de diseño menores a 50.000 ESAL's como un valor máximo permisible para carreteras locales. Según la clasificación funcional de las vías en base al TPDA del MTOP (2013, p. 64) las carreteras C3 (carretera convencional básica) el tráfico promedio diario anual oscila entre 500 a 1000.

- Se considerará un periodo de vida útil estructural de 7 años.
- La serviciabilidad final (Pt) seleccionada es 2.0 para carreteras con menores volúmenes de tráfico. (Officials, 1993, p. 12)
- El SN (número estructural) para la evaluación de este nivel de tráfico es de 2.
- La tasa de crecimiento vehicular considerada es de 3% para todos los niveles de tráfico.
- El material de subrasante se considera para este proyecto como de baja capacidad de soporte.
- Se considera una vía de dos carriles y que el tráfico circula en ambas direcciones.
- Para el cálculo de lef de cargas de tráfico bajo se usó valores número estructural 2 .
- El L18 = 18 kips
- El L2x (código para eje estándar) =1
- El L2s (dependiente del eje) = 1,2,3

En la **Tabla 15** se muestra los valores LEF de carga obtenidos para cada tipo de eje de pavimento flexible según la clasificación vehicular escogida para el presente tema de titulación:

Tabla 15*Cálculo de LEF de Carga para cada tipo de eje.*

Cálculo de factores equivalentes de carga o LEF.													
Lx/ton	Lx/kips	L18	L2x	L2s	Pt	SN	G	Bx	G/Bx	B18	G/B18	Wx/W18	LEF
2	4.4	18	1	1	2	2	0.0889411	0.462785239	0.19218652	4.052580851	0.02194678	279.7846588	0.00357418
3	6.6	18	1	1	2	2	0.0889411	0.589344899	0.15091517	4.052580851	0.02194678	59.86379586	0.01670459
7	15.4	18	1	1	2	2	0.0889411	2.670760526	0.03330178	4.052580851	0.02194678	1.971390733	0.50725611
11	24.2	18	1	1	2	2	0.0889411	9.493884911	0.00936825	4.052580851	0.02194678	0.266133585	3.75751148
12	26.4	18	1	1	2	2	0.0889411	12.31681027	0.00722111	4.052580851	0.02194678	0.179114281	5.58302773
20	44	18	2	1	2	2	0.0889411	7.170279797	0.01240413	4.052580851	0.02194678	0.297592692	3.36029757
24	52.8	18	3	2	2	2	0.0889411	3.809985378	0.02334421	0.859436724	0.10348765	1.027151108	0.97356659

Nota. Cálculo de factores equivalente o Lef se obtuvo mediante la especificación del número estructural (SN), serviciabilidad final, y los pesos de los ejes de los vehículos.

Tabla 16*Cálculo de ESAL de diseño para Tráfico Bajo*

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO	TIPO DE VEHÍCULO	%	TASA DE RETORTOR (%)	CANTIDAD	EJE	TIPO DE EJE	PESOS (Tn)	Pesos (Kips)	LEF DE CARGA	FACTOR CAMIÓN	FACTOR CRECIMIENTO	DIAS DEL AÑO	ESAL'S DISEÑO
LIVIANOS	AUTOMOVIL	97.50%	3.00%	488	DELANTERO	Simple	2	4.40	0.004	0.020	7.66	365	27649
					POSTERIOR	Simple	3	6.60	0.017				
BUSES	2 EJES	2.50%	3.00%	13	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.507	4.265	7.66	365	149096
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	3.758				
	3 EJES	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.507	3.868	7.66	365	0
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	3.360				
CAMIONES	2DB	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.543	7.66	365	0
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	2.985				
	3A	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.438	7.66	365	0
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T2-S2	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.423	7.66	365	0
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	2.985				
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T2-S3	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	4.370	7.66	365	0
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	2.985				
					POSTERIOR	Trídem	24	52.80	0.827				
	T3-S1	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.423	7.66	366	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.880				
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	2.985				
	T3-S2	0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.799	7.66	365	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	3.360				
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T3-S3	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.507	4.841	7.66	365	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	3.360				
					POSTERIOR	Trídem	24	52.80	0.974				
	TOTAL		100%		500			TOTAL			43.990	ESAL's de diseño	176745

Nota. Se identifica la composición de tráfico bajo de acuerdo al tipo de vehículos y el peso por eje para el cálculo del ESAL's durante su vida útil.

Los factores de distribución de tráfico en función al número de carriles en ambas direcciones corresponden al 50 % de carril de diseño. Conforme el No. de carriles en cada dirección se ha escogido un 50% de ejes simples equivalentes de 80 KN en el carril de diseño.

Factor de Dirección: 0.5

Factor de Carril: 0.5

ESAL's por carril de tránsito: $0.5 \times 0.5 \times 176745 = 44186$

- b) **Variables de diseño Método AASHTO 93.** Previo al cálculo de W18 (No. de cargas previstas) mediante la ecuación de diseño AASHTO-93 se toman en cuenta las siguientes variables de diseño de pavimento flexible:

Tabla 17

Consideraciones de diseño para tráfico bajo

Consideraciones de Diseño	
Confiabilidad (R)	50%
Desviación Estándar (Zr)	0
Desviación Estándar (So)	0.49
Serviciabilidad inicial (Po)	4.2
Serviciabilidad final (Pt)	2
Pérdida de serviciabilidad (Δ PSI)	2.2

Nota. Se definen las variables iniciales de diseño de tráfico bajo, para la ecuación de AASHTO-93.

- La confiabilidad se escogió en base a las características de la vía. De acuerdo a la **Tabla 4** de Niveles recomendados de Confiabilidad para carreteras de bajo nivel de tráfico tipo local y de zona rural se opta por un valor de R= 50%.
- Según la Confiabilidad escogida el valor de la desviación estándar (Zr) según la **Tabla 5** corresponde a 0.

- La desviación estándar seleccionada para todos los diseños es 0.49.
- c) **Condiciones de Drenaje.** Según los datos obtenidos de Nacional and MAGAP (2012) en su proyecto “GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1:25.000”, Santa Elena presenta un periodo húmedo seco de 37 días al año, correspondiente a 10.14% de tiempo.

Considerando una calidad de drenaje BUENO, y 10.14 % de tiempo en que la estructura del pavimento es expuesta a niveles de humedad próximas a saturación, nos encontraríamos en el nivel de entre 1.15-1.00 % de la **Tabla 8**. Se realizó interpolación lineal de acuerdo a los datos asignados, para obtener el coeficiente m1, m2 de las capas granulares.

Interpolación

5	1.15
10.14	m _{1,2}
25	1

$$m_{1,2} = 5 + \frac{1-1.15}{25-5}(10.14 - 5) = 1.11 \quad (17)$$

d) **Propiedades de las capas de pavimentos.**

- Se usó el Nomograma de coeficiente estructural de concreto asfáltico para obtener el coeficiente estructural de la capa de rodadura con un Módulo de 435000 PSI. *Ver Anexo 1.*
- Los coeficientes estructurales y los módulos elásticos de las capas granulares de base y subbase se tomaron en relación del CBR (%), 80% min para la capa de base y 30% min para la subbase. *Ver Anexo 2 y 3*
- La subrasante trabajará con un Mr = 5000 SI, considerando que el material es de baja capacidad de soporte en condiciones saturadas.

- Los valores y propiedades de las capas de pavimentos resumidos en **Tabla 18** serán utilizados para el diseño de todas las estructuras de pavimentos previstas en el presente trabajo de titulación.

Tabla 18

Propiedades de las capas de pavimentos flexibles.

PROPIEDADES DE LAS CAPAS DE PAVIMENTO.						
CAPAS	CBR (%)	COEFICIENTES DE CAPA		MÓDULOS		
		a_i	m_i	PSI	Kg/cm ²	Mpa
CARPETA ASFÁLTICA	----	0.44	1	435000	30583.545	2999.22
BASE	80%	0.133	1.11	28500	2003.7495	196.5
SUB BASE	30%	0.107	1.11	14900	1047.5743	102.73
SUBRASANTE	----	----	----	5000	351.535	34.47

Nota. Se describen los módulos elásticos y coeficientes de capa de la estructura de pavimentos flexibles.

Se evalúan los parámetros de entrada en la ecuación AASHTO 93 para un $W18 = 44186$

Figura 13

Cálculo de SN para un W18 de tráfico bajo en la Ecuación AASHTO 93

Nota. La **Figura 13** muestra el resultado de SN (número estructural requerido) para que el pavimento soporte la carga proyectada en ejes equivalentes de 80 KN para tráfico bajo. Fuente : *Officials (1993)*

- e) **Determinación de espesores de la estructura de pavimentos 1.** La determinación de espesores de la estructura de pavimentos para tráfico bajo se realizará empleando el criterio de espesores mínimos sugeridos por la AASHTO 93, en la **Tabla 9** sugiere un espesor mínimo de carpeta de 3 cm y para base granular de 10 cm.

Tabla 19

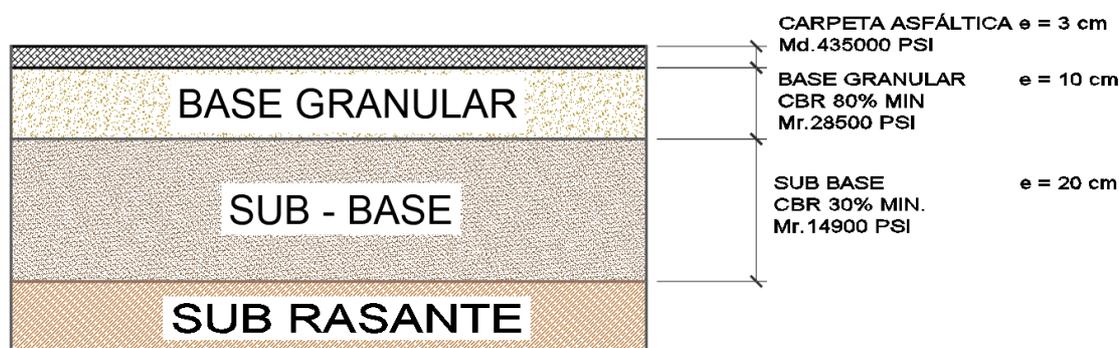
Determinación de espesores - Estructura 1

Determinación de espesores con el criterio de espesores mínimos.				
D1	1.18 in		SN1= a1 x D1	0.52
	3.0 cm			
D2	4.00 in		SN= a2 x m2 D2	0.59
	10.0 cm			
D3= SN -(SN1+SN2)	6.82 in		SN= a3 x m3 D3	0.81
/ a3m3	17 Cm			
Se ajusta a 20cm. la sub-base por construcción.			SN capa subbase	0.94
			TOTAL, SN	2.05 > 1.92

Nota. En acuerdo al criterio de espesores mínimos y análisis constructivo se ajustó el espesor de la sub-base, para definir un diseño óptimo para tráfico bajo.

Figura 14

Detalle de estructura de pavimento para tráfico bajo.



Nota. Se muestran los espesores de las capas del pavimento para tráfico bajo.

El espesor total de pavimento requerido de acuerdo con la metodología AASHTO 93 es de 33 cm. para las condiciones y parámetros de diseño evaluados.

4.1.3 Diseño de estructura de pavimento para tráfico medio

a) Cálculo de ESAL's de diseño.

En el desarrollo del pavimento se estableció lo siguiente:

- Para el diseño de la estructura de pavimento para tráfico medio se consideró un nivel de ESAL's entre 500,001 – 2'000,000. De acuerdo a la clasificación funcional de las vías en base al TPDA del MTOP (2013, p. 64) las carreteras C1 correspondiente a carreteras de mediana capacidad oscilan un tráfico promedio diario anual de entre 1000 a 8000 TPDA.
- Se considerará un periodo de vida útil de 12 años para que la estructura cumpla con su desempeño.
- La serviciabilidad final (Pt) escogida es 2.5 para carreteras con mayores tránsitos. (Officials, 1993, p. 12)
- El SN (número estructural) para la evaluación de este nivel de tráfico es 4.
- El material de subrasante se considera para este proyecto como de baja capacidad de soporte.
- Se considera una vía de dos carriles y que el tráfico circula en ambas direcciones.
- Para el cálculo de lef de cargas de tráfico medio se usó valores de número estructural 4.

Tabla 20*Cálculo de ESAL's de diseño para tráfico medio*

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO	TIPO DE VEHÍCULO	%	TASA DE RETORTOR (%)	CANT.	EJE	T. DE EJE	PESOS (Tn)	Pesos (Kips)	LEF DE CARGA	FACTOR CAMIÓN	FACTOR CRECIMIENTO	DIAS DEL AÑO	ESAL'S DISEÑO
LIVIANOS	AUTOMOVIL	92.00%	3.00%	1840	DELANTERO	Simple	2	4.40	0.004	0.023	14.19	365	215077
					POSTERIOR	Simple	3	6.60	0.019				
BUSES	2 EJES	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.543	14.19	365	0
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	2.985				
	3 EJES	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.438	14.19	365	0
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
CAMIONES	2DB	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.543	14.19	365	0
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	2.985				
	3A	5.00%	3.00%	100	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	3.438	14.19	365	1781068
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T2-S2	2.0%	3.00%	40	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.423	14.19	365	1330851
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	2.985				
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T2-S3	1.0%	3.00%	20	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	4.370	14.19	365	452753
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	2.985				
					POSTERIOR	Tridem	24	52.80	0.827				
	T3-S1	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.423	14.19	366	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.880				
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	2.985				
	T3-S2	0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	6.318	14.19	365	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.880				
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.880				
	T3-S3	0.0%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.559	4.265	14.19	365	0
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.880				
					POSTERIOR	Tridem	24	52.80	0.827				
TOTAL		100%		2000				TOTAL		41.785	TOTAL		3779749

Nota. Se identifica la composición de tráfico medio de acuerdo con el tipo de vehículos y el peso por eje para el cálculo del ESAL's durante su vida útil.

$$\text{ESAL's por carril de tránsito: } 0.5 \times 0.5 \times 3779749 = 944.937$$

b) **VARIABLES DE DISEÑO MÉTODO AASHTO 93.** Los valores de las variables de diseño escogidos para este nivel de tráfico son los siguientes mostrados en la **Tabla 21**.

Tabla 21

Consideraciones de diseño para Tráfico medio.

DATOS DE VARIABLES DE DISEÑO	
Confiabilidad (R)	80%
Desviación Estándar (Zr)	-0.841
Desviación Estándar (So)	0.49
Serviciabilidad inicial (Po)	4.2
Serviciabilidad final (Pt)	2.5
Pérdida de serviciabilidad (Δ PSI)	1.7

Nota. Se finen las variables iniciales de diseño de tráfico medio, para la ecuación de AASHTO-93.

- De acuerdo a la **Tabla 4** de Niveles recomendados de Confiabilidad para carreteras colectores correspondientes a un tráfico medio y de zona rural se elige un valor de $R = 80\%$.
 - Según la Confiabilidad escogida el valor de la desviación estándar (Zr) según la **Tabla 5** corresponde a -0.841.
 - La desviación estándar seleccionada para todos los diseños es 0.49.
 - El coeficiente de drenaje es $m_{1,2} = 1.11$, valor obtenido mediante la interpolación lineal asignada a un periodo húmedo seco de 37 días al año, correspondiente a 10.14% de tiempo y calidad de drenaje buena.
- c) **Características de las capas de pavimentos.** Componen los coeficientes estructurales y módulos elásticos de la carpeta asfáltica y

capas granulares de base y subbase que se tomaron en relación del CBR (%), 80% min para la capa de base y 30% min para la subbase. Se reitera que los valores mostrados con anterioridad en la **Tabla 18**, serán usados para todos los diseños de estructura de pavimentos flexibles de los diferentes niveles de tráfico.

- Se evalúan los valores de entrada en la ecuación AASHTO 93 para un $W18 = 944.937$ para la determinación del SN (Número estructural) efectivo.

Figura 15

Cálculo de SN para un W18 de tráfico medio en Ecuación AASHTO 93.

The screenshot shows a software window titled "Ecuación AASHTO 93". It contains several input fields and a calculation button. The "Tipo de Pavimento" section has "Pavimento flexible" selected. "Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)" is set to "80 % Zr=-0.841" and "So" is "0.49". "Serviciabilidad inicial y final" has "PSI inicial" as "4.2" and "PSI final" as "2.5". "Módulo resiliente de la subrasante" is "Mr" as "5000 psi". The "Tipo de Análisis" section has "Calcular SN" selected, with "W18 =" as "944937". The "Número Estructural" section shows "SN =" as "3.78". There are "Calcular" and "Salir" buttons at the bottom.

Nota. La **Figura 15**, muestra el resultado del SN (número estructural requerido) para soportar la carga proyectada en ejes equivalentes de 80 Kn $W18= 944937$ es $SN = 3.78$ bajo las variables de diseño consideradas y detalladas con anterioridad. Fuente: *Officials (1993)*

- d) **Determinación de espesores de la estructura de pavimentos 2.** El cálculo de los espesores se realizó mediante el uso del software de aplicación del método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos

Figura 16

Determinación de espesores - Estructura 2

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela, Ingeniero Civil, Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: Flexible Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 80 % Zr = -0.841, So = 0.49

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial = 4.2, PSI final = 2.5

Tránsito de diseño: W18 = 944937

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coeficiente de capa (ai)	Coeficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	435000	¿E/a?	1.00	1.93	4.39	4.5	1.98
2	28500	¿E/a?	1.11	2.49	3.45	3.5	0.89
3	14900	¿E/a?	1.11	3.78	7.70	8.0	0.95
4	5000	MR					3.82 OK

W18 real: 1,02E+006

Botones: Diseñar, Ver informe, Salir

Quitar el control de variables:

Nota. En la **Figura 16**, se muestra el diseño de pavimento flexible para tráfico medio realizado por el software del Método AASHTO para diseño de pavimentos. Fuente: *Officials (1993)*

La estructura 2 de pavimentos flexibles para los datos ingresados muestran espesores de:

Carpeta asfáltica: 4.5'' = 12 cm

Capa de Base: 6'' = 15 cm

Subbase: 8'' = 20 cm

Datos que están ajustados a un valor entero o decimal próximo resultando SN2= 3.82 para soportar una carga W18 = 1.02 x 10⁶.

También se realizó la determinación de espesores de las capas de la estructura de pavimentos flexibles en base al criterio de espesores mínimos sugeridos por la AASHTO. De acuerdo a la **Tabla 9**, el valor para la capa asfáltica mínima es de 7.5

cm, y para la capa de base granular el espesor mínimo sugerido es 15 cm para un ESAL's que oscila de entre 500.000 - 2,000.000.

Para un SN requerido de 3.78 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 22

Determinación de espesores – Estructura 2

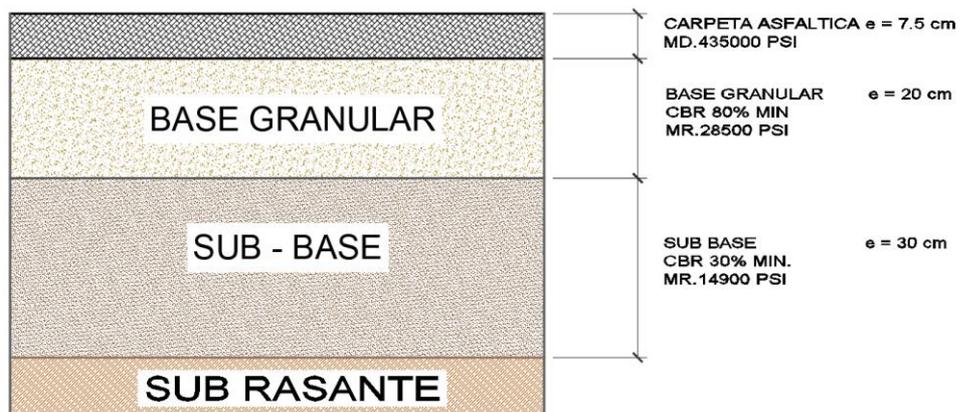
Determinación de espesores con el criterio de espesores mínimos.				
D1	2.95	in	SN1= a1 x D1	1.30
	7.5	cm		
D2	5.91	in	SN= a2 x m2 D2	0.87
	15.0	Cm		
D3= SN -(SN1+SN2) / a3m3	13.81	in	SN= a3 x m3 D3	1.61
	35	cm		
OPTIMIZACION DE ESPESORES:				
Base: 20cm.				1.16
Sub-Base: 30cm.				1.40
			TOTAL, SN	3.86 > 3.78

Nota. En acuerdo al criterio de espesores mínimos y análisis constructivo se ajustó el espesor de la sub-base para definir un diseño óptimo para tráfico medio.

Para viabilidad del proyecto y proceso constructivo, se realizó la optimización de espesores como muestra la **Tabla 22**, y se propone la siguiente estructura de pavimento para tráfico medio.

Figura 17

Detalle de estructura de pavimentos para tráfico medio.



Nota. Se muestran los espesores de las capas del pavimento para tráfico medio.

Espesor total de pavimento flexible 57.5cm. para las condiciones y parámetros evaluados en esta alternativa.

4.1.4 Diseño de estructura de pavimento para tráfico alto.

a) Cálculo de ESAL's de diseño.

- El último nivel de tráfico que se evaluará para diseño estructural de pavimento flexible oscila un ESAL's mayor a 7,000.000. De acuerdo a la clasificación funcional de las vías en base al TPDA del MTOP (2013, p. 64) este nivel de tráfico alto corresponde a carreteras AV1 (autovía o carreteras multicarriles) con un tráfico promedio diario anual de entre 8000 a 26000 TPDA.
- Se considerará un periodo de vida útil de 15 años.
- La serviciabilidad final (Pt) escogida es 3 para carreteras con tránsitos mayores. (Officials, 1993, p. 12)
- El SN (número estructural) para la evaluación de este nivel de tráfico es de 6.
- El material de subrasante se considera para este proyecto como de baja capacidad de soporte
- Se considera una vía de dos carriles y que el tráfico circula en ambas direcciones.

Tabla 23

Cálculo de ESAL's de diseño para tráfico alto

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO	TIPO DE VEHÍCULO	%	TASA DE RETORTO r (%)	CANT.	EJE	TIPO DE EJE	PESOS (Tn)	Pesos (Kips)	LEF DE CARGA	FACTOR CAMIÓN	FACTOR CRECIMIENTO	DIAS DEL AÑO	ESAL'S DISEÑO
LIVIANOS	AUTOMOVIL	69.00%	3.00%	8280	DELANTERO	Simple	2	4.40	0.003	0.018	18.60	365	1012287
					POSTERIOR	Simple	3	6.60	0.015				
BUSES	2 EJES	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	3.579	18.60	365	0
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	3.047				
	3 EJES	5.00%	3.00%	600	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	3.503	18.60	365	14270321
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.972				
CAMIONES	2DB	0.00%	3.00%	0	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	3.579	18.60	365	0
					POSTERIOR	Simple	11	24.20	3.047				
	3A	10.00%	3.00%	1200	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	3.503	18.60	365	28540642
					POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.972				
	T2-S2	10.0%	3.00%	1200	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	6.551	18.60	365	53365831
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	3.047				
	T2-S2	10.0%	3.00%	1200	POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.972	6.551	18.60	365	7449331
					DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531				
	T2-S3	2.0%	3.00%	240	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	4.572	18.60	365	7449331
					INTERMEDIO	Simple	11	24.20	3.047				
	T2-S3	2.0%	3.00%	240	POSTERIOR	Trídem	24	52.80	0.994	6.551	18.60	366	10702408
					DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531				
	T3-S1	2.0%	3.00%	240	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	6.551	18.60	366	10702408
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.972				
	T3-S1	2.0%	3.00%	240	POSTERIOR	Simple	11	24.20	3.047	6.476	18.60	365	5275325
					DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531				
	T3-S2	1%	3.00%	120	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	6.476	18.60	365	5275325
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.972				
	T3-S2	1%	3.00%	120	POSTERIOR	Tándem	20	44.00	2.972	4.497	18.60	365	3663408
					DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531				
	T3-S3	1.0%	3.00%	120	DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531	4.497	18.60	365	3663408
					INTERMEDIO	Tándem	20	44.00	2.972				
	T3-S3	1.0%	3.00%	120	POSTERIOR	Trídem	24	52.80	0.994	4.497	18.60	365	3663408
					DELANTERO	Simple	7	15.40	0.531				
TOTAL		100%		12000				TOTAL		42.829	ESAL's DE DISEÑO		124279552

Nota. Se identifica la composición de tráfico alto de acuerdo al tipo de vehículos y el peso por eje para el cálculo del ESAL's durante su vida útil.

$$\text{ESAL's por carril de tránsito: } 0.5 \times 0.5 \times 124.279.552 = 31,069.888$$

- b) **VARIABLES DE DISEÑO MÉTODO AASHTO 93.** Los valores de las variables de diseño escogidos para este nivel de tráfico son los mostrados en la **Tabla 24**.

Tabla 24

Consideraciones de diseño para Tráfico alto.

DATOS DE VARIABLES DE DISEÑO	
Confiabilidad (R)	95%
Desviación Estándar (Zr)	-1.645
Desviación Estándar (So)	0.49
Serviciabilidad inicial (Po)	4.2
Serviciabilidad final (Pt)	3
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	1.2

Nota. Se definen las variables iniciales de diseño de tráfico alto, para la ecuación de AASHTO-93.

- Se adopta una Confiabilidad del 95% para carreteras con tráfico alto.
- De acuerdo a la Confiabilidad seleccionada el valor de la desviación estándar (Zr) según la Tabla 5 corresponde a -1.645.
- La desviación estándar seleccionada para todos los diseños es 0.49.
- El coeficiente de drenaje es $m_{1,2} = 1.11$, valor usado para todos los diseños.
- Se reitera que los valores mostrados con anterioridad en la **Tabla 18** de las propiedades de las capas de pavimentos, serán usados para todos los diseños de estructura de pavimentos flexibles de los diferentes niveles de tráfico. Se evalúan las consideraciones de diseño en la ecuación AASHTO 93 para un $W_{18} = 31,069.888$ para la determinación del SN (Número estructural) efectivo.

Figura 18

Cálculo de SN para un W18 de tráfico alto en Ecuación AASHTO 93.

The screenshot shows a software window titled "Ecuación AASHTO 93". It contains several input fields and a calculation button. The "Tipo de Pavimento" section has "Pavimento flexible" selected. "Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)" shows "95 % Zr=-1.645" and "So = 0.49". "Serviciabilidad inicial y final" shows "PSI inicial = 4.2" and "PSI final = 3". "Módulo resiliente de la subrasante" shows "Mr = 5000 psi". The "Tipo de Análisis" section has "Calcular SN" selected, with "W18 = 31069888" displayed. The "Número Estructural" section shows "SN = 7.80". A "Calcular" button is visible at the bottom.

Nota. La **Figura 18** muestra el resultado del SN requerido para los datos ingresados de tráfico alto. Fuente : *Officials (1993)*

El resultado del número estructural requerido para soportar la carga proyectada en ejes equivalentes de 80 Kn para un $W18=31,069.888$ según el cálculo realizado mediante la ecuación AASHTO es $SN = 7.80$, valor que se usará para realizar el análisis de espesores con el criterio de espesores mínimos.

c) Determinación de espesores de la estructura de pavimentos.

La **Figura 19**, muestra los resultados del diseño de la estructura de pavimentos para soportar la carga proyectada W18 de tráfico alto mediante la aplicación del software "Método AASHTO para el diseño de pavimento (1993)".

Figura 19

Determinación de espesores - Estructura 3

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coeficiente de capa (ai)	Coeficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto	
1	435000	¿E/a?	0.440	1.00	¿m?	4.39	9.98, 10.0	10.0, 4.40
2	28500	¿E/a?	0.133	1.11	¿m?	5.57	7.93, 8.0	8.0, 1.18
3	14900	¿E/a?	0.107	1.11	¿m?	7.80	18.68, 19.0	19.0, 2.26
4	5000	MR					7.84 OK	3.25E+007

Nota. En la **Figura 19**, se muestra el diseño de pavimento flexible para tráfico alto realizado por el software del Método AASHTO para diseño de pavimentos Fuente: *Officials (1993)*

El resultado dado por el software del Método AASHTO deduce un SN total= 7.84 para soportar la carga proyectada $W18 = 3,25 \times 10^7$, con espesores:

carpetas de asfáltica: $D = 10'' = 25 \text{ cm}$

capa de base: $D = 8'' = 20 \text{ cm}$

Subbase: $D = 19'' = 48 \text{ cm}$

De igual manera se efectuó la determinación de espesores de las capas de la estructura de pavimentos flexibles en base al criterio de espesores mínimos sugeridos por la AASHTO. La **Tabla 9** muestra los valores mínimos sugeridos por el AASHTO; para el número de ESAL's evaluado que se encuentra en el rango de más de 7.000.000 el espesor de capa asfáltica mínima sugerida es de 10 cm, el espesor mínimo sugerido de la capa de base granular es 15 cm. Basados en espesores mínimos, se consideró la evaluación espesores de $D= 24 \text{ cm}$ para la

carpeta asfálticas, $D = 30$ cm para la capa de base, y se realizó el cálculo respecto para obtener el espesor de la subbase, cómo muestra la **Tabla 25**.

Tabla 25

Determinación de espesores – Estructura 3

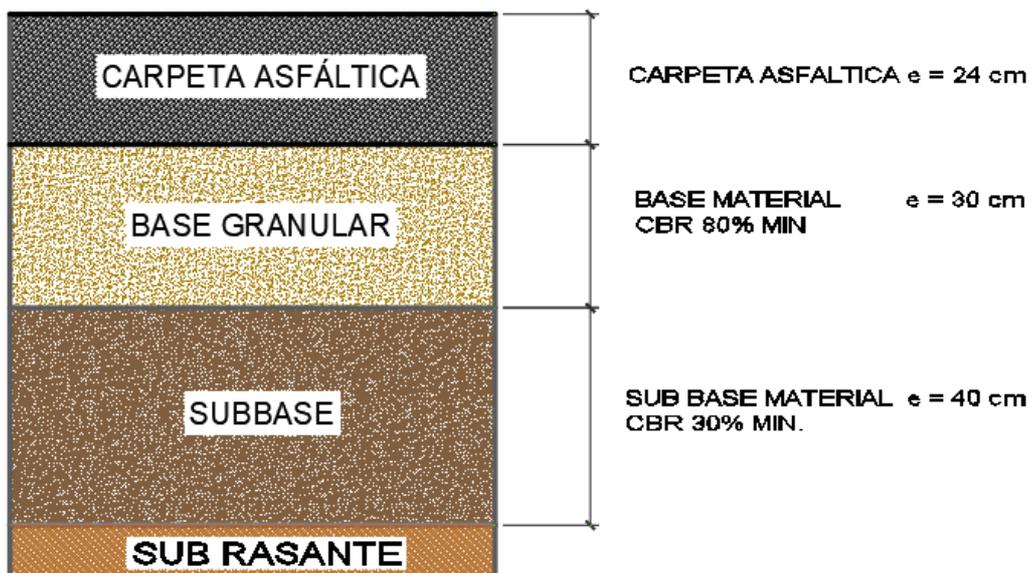
Determinación de espesores con el criterio de espesores mínimos.				
D1	9.45	in	SN1= a1 x D1	4.16
	24.0	cm		
D2	11.81	in	SN= a2 x m2 D2	1.75
	30.0	cm		
D3	15.75	in	SN= a2 x m2 D2	1.87
	40	cm		
D total	94	cm	TOTAL, SN	7.8

Nota. En acuerdo al criterio de espesores mínimos y análisis constructivo se ajustó el espesor de la sub-base, para definir un diseño óptimo para tráfico medio.

A continuación, se detalla el diseño de la estructura de pavimento flexible para tráfico alto.

Figura 20

Detalle de estructura de pavimentos para tráfico alto.



Nota. Se muestran los espesores de las capas del pavimento para tráfico alto.

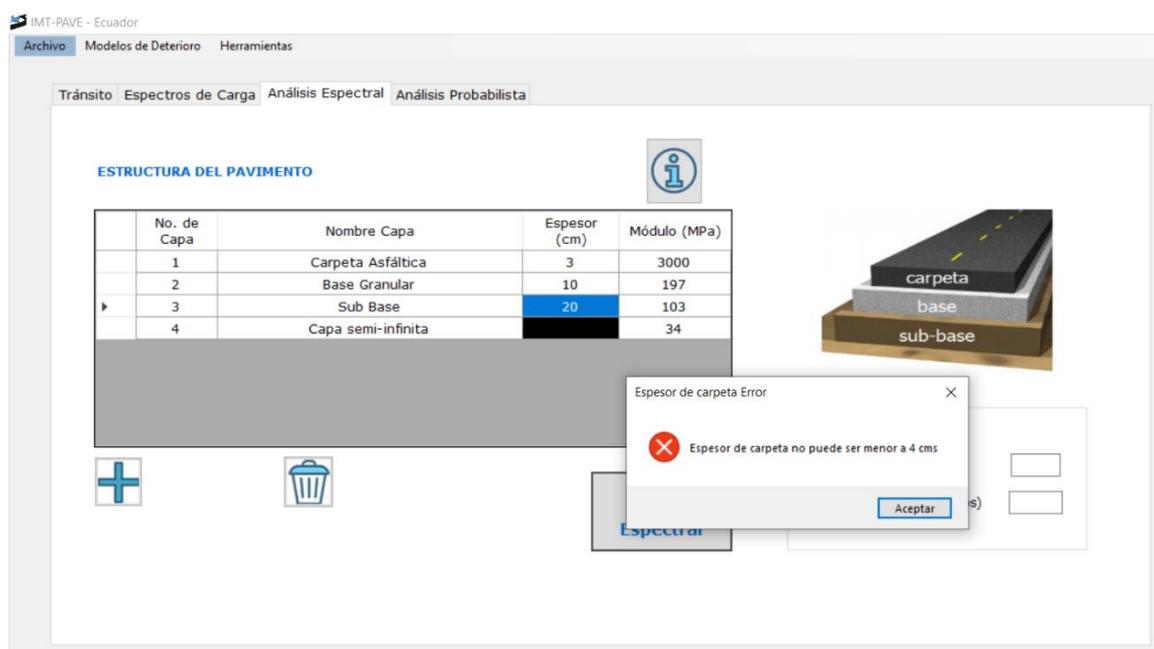
4.2 RESULTADOS DE O.E2: EVALUACIÓN DE DISEÑOS POR ALTERNATIVA IMT-PAVE Y WINDEPAVE 2.6.

4.2.1 Evaluación del Diseño 1 por IMT PAVE

- a) En la fase 1 del software IMT-PAVE se ingresan los datos del TPDA de 500 veh/día, los factores de distribución de la vía a analizar, el horizonte del proyecto, que integra la vida útil que le asignamos al pavimento, la tasa de crecimiento (%) y los valores en % de la clasificación vehicular del diseño 1 para tráfico bajo
- b) En la fase de espectros de carga se escoge para todos los diseños el nivel carga Legal.
- c) En la Fase 3 no se efectuó el análisis espectral, y por ende el análisis probabilístico, dado que el software IMT-PAVE no permite ingreso de espesores menores o igual a 3 cm de carpeta asfáltica.

Figura 21

Fase 3 de Análisis Espectral del diseño 1 -Tráfico bajo.



Nota. La **Figura 21** muestra que el software no ejecuta el análisis espectral, porque hay error en el espesor de carpeta. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.2 Propuesta de diseño por IMT-PAVE para tráfico bajo.

Se realizó el diseño de la estructura de pavimentos flexible para tráfico bajo mediante la aplicación del software IMT-PAVE del método mecanicista-empírico, dado que la estructura AASHTO para tráfico bajo no se puede evaluar por el análisis espectral, ni probabilístico por insuficiencia de espesor en la carpeta asfáltica, por tanto, se debe realizar un aumento de espesor de la carpeta y en consecuencia de las capas granulares para que cumplan con los modelos de daño de la alternativa.

- a) El proceso de ingreso de datos de entrada es el mismo, en las fases de tránsito y espectros de carga.
- b) En la fase 3 de análisis espectral, se definió la estructura de pavimento con los nuevos espesores de capa, para que esta cumpla con los modelos de daño de vida por fatiga y deformación de la estructura, dando un total espesor total = 42 cm, distribuidos de la siguiente manera:

Para la carpeta asfáltica $e = 4$ cm

Para la capa de base $e = 15$ cm

Para la Sub-base $e = 22$ cm

- c) Se ejecutó posteriormente el análisis probabilístico de la propuesta de diseño con la confiabilidad correspondiente de 50% para el nivel de tráfico referenciado y se generó el siguiente reporte de la nueva propuesta de diseño.

Figura 22

Reporte de análisis de IMT-PAVE de la propuesta de diseño 1.

RESULTADOS

VIDA A LA FATIGA : > 7 Años

A LA DEFORMACIÓN : > 7 Años

Nota. La **Figura 22** muestra los resultados del análisis de daño de la propuesta de diseño de pavimento para tráfico bajo. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.3 Evaluación del Diseño 2 por IMT-PAVE

- a) Se realizó la evaluación del diseño 2 del método AASHTO-93 para tráfico medio en el software IMT-PAVE, donde se ingresaron los datos de entrada en la fase de tránsito con un TPDA de 2000 veh/día, los valores en % correspondientes de su clasificación vehicular, los factores de distribución ya definidos y el horizonte del proyecto de 12 años de vida útil.
- b) El nivel carga escogido es el Legal, para la evaluación de todos los diseños.
- c) En la fase 3 se realizó el ingreso de las propiedades y características de estructura 2 para ejecutar el análisis espectral. *Ver Anexo 5*
- d) En última fase de análisis probabilístico usamos la Confiabilidad de 80% definida para tráfico medio y el coeficiente de variación del 15%. *Ver Anexo 6*

Figura 23

Reporte de análisis de IMT-PAVE del diseño 2 para tráfico medio

NIVEL DE CARGA USADO : LEGAL

CONFIABILIDAD : 80%%

RESULTADOS

VIDA A LA FATIGA : 4.5 Años

A LA DEFORMACIÓN : 6.0 Años

Nota: El proyecto constructivo deberá contemplar los espesores indicados y verificar que los materiales seleccionados para cada una de las capas del pavimento cumple con los valores de módulo de resiliencia definidos en el diseño y para las condiciones de compactación especificadas.

Nota. El reporte muestra los resultados de vida por deformación y fatiga del diseño 2 de pavimento diseñada por el método AASHTO. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.4 Propuesta de diseño IMT-PAVE para tráfico medio

Al realizar el análisis de la estructura 2 diseñada por el método AASHTO 93 en la alternativa IMT-PAVE presentó falla en la vida por fatiga y deformación

de la estructura, por lo que se elaboró la propuesta de diseño de pavimento flexible mediante la aplicación de este método, descrita a continuación:

- a) Se definieron los espesores de capa del pavimento para tráfico medio, para que esta cumpla con los modelos de daño de vida por fatiga y deformación de la estructura:

Para carpeta asfáltica $e = 10$ cm

La capa de base $e = 25$ cm

La capa de sub-base $e = 30$ cm

Espesor total de pavimento flexible 65cm. para las condiciones y parámetros evaluados en esta alternativa

- b) En la última fase se ejecutó el análisis probabilístico con la confiabilidad de 80% y un coeficiente de variación de 15%. En la **Figura 24** se muestra el reporte de resultados de la propuesta de diseño.

Figura 24

Reporte de análisis de IMT-PAVE de propuesta de diseño 2.

NIVEL DE CARGA USADO : LEGAL

CONFIABILIDAD : 80%

RESULTADOS

VIDA A LA FATIGA : > 12 Años

A LA DEFORMACIÓN : > 12 Años

Nota: El proyecto constructivo deberá contemplar los espesores indicados y verificar que los materiales seleccionados para cada una de las capas del pavimento cumple con los valores de módulo de resiliencia definidos en el diseño y para las condiciones de compactación especificadas.

Nota. La Figura 24 muestra los resultados del análisis de daño de la propuesta de diseño de pavimento para tráfico medio. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.5 Evaluación del Diseño 3 por IMT-PAVE

- a) Se evaluó el diseño 3 del método AASHTO-93 para tráfico alto en el software IMT-PAVE, y en la fase 1 se realizó el ingreso de los datos de entrada, TPDA de 12000 veh/día, los valores en % de la clasificación vehicular, los factores de distribución ya definidos y el horizonte del proyecto de 15 años de vida.
- b) En la fase 2 aplicamos el nivel de carga legal.
- e) Se ingresaron las propiedades y características de la estructura de pavimento flexible para tráfico alto del método AASHTO para la ejecución del análisis espectral. **Ver Anexo 6.**
- f) En última fase de análisis probabilístico ingresamos el valor de confiabilidad correspondiente al 95% definida para tráfico alto y el coeficiente de variación del 15%. **Ver Anexo 7.**

Figura 25

Reporte de análisis de IMT-PAVE del diseño 3 para tráfico alto.

RESULTADOS

VIDA A LA FATIGA : > 15 Años
A LA DEFORMACIÓN : 9.1 Años

Nota: El proyecto constructivo deberá contemplar los espesores indicados y verificar que los materiales seleccionados para cada una de las capas del pavimento cumple con los valores de módulo de resiliencia definidos en el diseño y para las condiciones de compactación especificadas.

Nota. El reporte de análisis de la estructura 2 para tráfico alto muestra el resultado de daño de vida por deformación y fatiga. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.6 Propuesta de diseño IMT-PAVE para tráfico alto

Se realizó el análisis de la estructura 3 diseñada por el método AASHTO 93 en la alternativa IMT-PAVE, los resultados expusieron que la estructura no cumple con el modelo de daño de vida por deformación, por lo que debe ver aumento de

espesores de la estructura. Con el fin de realizar el análisis comparativo de las estructuras de pavimentos, se efectuó la propuesta de diseño de la estructura de pavimento para tráfico alto con el uso de la alternativa y en efecto que cumpla con los modelos de daño.

- a) Tomando en cuenta que las capas granulares de la estructura 3 para tráfico alto tienen espesores máximos según la Normativa y no cumplen con los modelos de daño de vida por deformación de la alternativa, hay la necesidad de incluir en el diseño, mejoramiento para la subrasante. En base a lo expuesto se definieron los espesores de capa del pavimento para tráfico alto:

Para la carpeta asfáltica $e = 24$ cm

Para la capa de base $e = 30$ cm

Para la Sub-base $e = 40$ cm

Mejoramiento $e = 50$ cm

Espesor total de pavimento flexible 1.44 cm. para las condiciones y parámetros evaluados en esta alternativa

Con la nueva propuesta de diseño se obtuvo el siguiente resultado de la **Figura 26**.

Figura 26

Reporte de análisis de IMT-PAVE de la propuesta diseño 3

RESULTADOS

VIDA A LA FATIGA: > 15 Años

A LA DEFORMACIÓN: > 15 Años

Nota: El proyecto constructivo deberá contemplar los espesores indicados y verificar que los materiales seleccionados para cada una de las capas del pavimento cumple con los valores de módulo de resiliencia definidos en el diseño y para las condiciones de compactación especificadas.

Nota. La **Figura 26** muestra los resultados de daño de vida por fatiga y deformación que tendría la propuesta de diseño. Fuente: *IMT-PAVE (2013)*.

4.2.7 Evaluación del Diseño 1 por WinDEPAV 2.6

Se realizó la evaluación de las estructuras de pavimentos flexibles diseñadas por el AASHTO-93 en la alternativa WinDEPAV 2.6. La figura 27 muestra la ventana principal del software, donde se efectuó el ingreso de las consideraciones de diseño descritas a continuación:

- a) Se ingresaron los valores de los módulos elásticos, espesores y relación de Poisson de las capas del pavimento de la estructura 1.
- b) Se selecciona el modelo de cálculo de coeficiente empíricos de regresión k_1 para capas cementantes que usaremos para el análisis de daño por tensión; para análisis de todas las estructuras se usará el modelo de Nottingham y se ingresa el valor del número de repeticiones esperadas para el nivel de tráfico bajo, N esperado = 44186
- c) Para el modelo de daño por compresión se seleccionó el mismo modelo y los coeficientes que integran son los observados en la **Figura 27**.

Figura 27

Datos ingresados de la estructura 1 en WinDEPAV.

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vásquez Varela, M.Sc.

Archivo DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas)
 EVALUACIÓN DE DISEÑO 1 PARA TRÁFICO BAJO

Número de capas
 2 3 4 5 6

Archivo: C:\Users\User\OneDrive\Escritorio\TRÁFICO BAJO\ELAVUACIÓN DE DISEÑO 2.pav

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	ν	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión		
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado
1	30584	0.30	3	<input checked="" type="checkbox"/>	8.8903E-13	4.9020	44186	<input type="checkbox"/>		
2	2004	0.35	10	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>		
3	104	0.35	20	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>		
4	352	0.40		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.1262E-06	3.5710

Carga en la superficie del pavimento
 Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm) 11.50
 Distancia entre ruedas (cm) 34.50
 Presión de contacto (kgf/cm²) 4.912

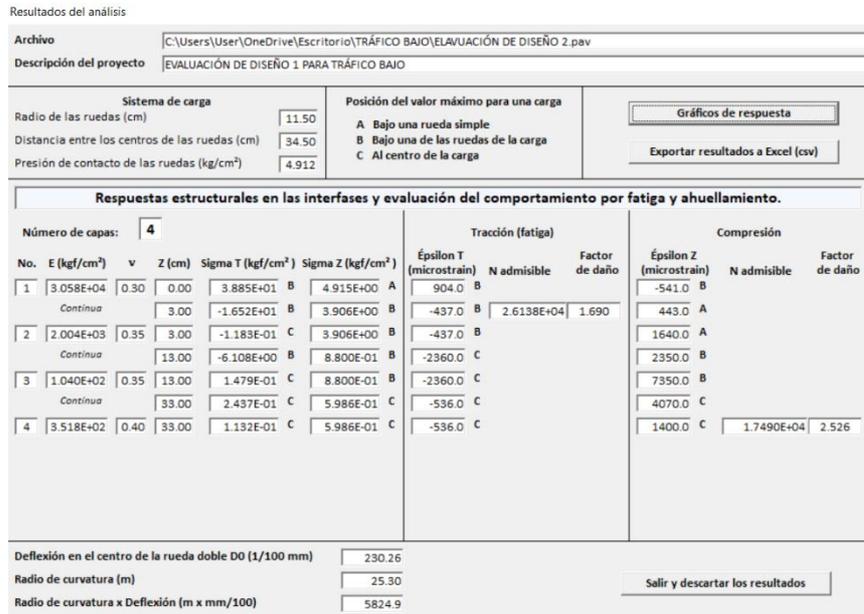
IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.
 Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.
 Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.
 Luis Ricardo Vásquez Varela, 2018.

Nota. La **Figura 27** muestra la pantalla principal de WinDEPAV con los datos ingresados de la estructura AASHTO para tráfico bajo. Fuente: *WinDEPAV2.6 (2018)*

d) Al realizar el análisis de la estructura el software genera los siguientes resultados.

Figura 28

Resultados del análisis del Diseño 1



Nota. La **figura 28** muestra los resultados de los factores de daño que se generan por fatiga y por ahuellamiento de la estructura 1. Fuente: WinDEPAV2.6 (2018)

4.2.8 Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico bajo

De acuerdo a las respuestas estructurales del diseño 1, se propone un diseño de pavimento para el cumplimiento de los factores de daño, cabe recalcar que los espesores ingresados se realizaron en base a criterios del autor y conforme a las condiciones y parámetros evaluados en esta alternativa El espesor total obtenido es 44 cm, distribuido de la siguiente manera:

Para la carpeta asfáltica un e = 4 cm

Para capa de base un e = 20 cm

Para la capa de sub-base un e = 20 cm

Figura 29

Resultados del análisis de la propuesta de diseño para tráfico bajo

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.															
Número de capas:		4													
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)		Sigma Z (kgf/cm ²)		Tracción (fatiga)			Compresión				
								Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	3.058E+04	0.30	0.00	2.223E+01	B	4.915E+00	A	481.0	B			-254.0	B		
	Continuo		4.00	-1.162E+01	A	3.783E+00	A	-303.0	A	1.5736E+05	0.281			-37.9	C
2	2.004E+03	0.35	4.00	1.142E+00	B	3.783E+00	A	-303.0	A			1500.0	A		
	Continuo		24.00	-8.372E-01	C	8.351E-01	B	-483.0	C			660.0	B		
3	1.048E+03	0.35	24.00	-2.376E-01	C	8.351E-01	B	-483.0	C			897.0	B		
	Continuo		44.00	-4.956E-01	C	3.253E-01	C	-447.0	C			611.0	C		
4	3.518E+02	0.40	44.00	-2.559E-02	C	3.253E-01	C	-447.0	C			948.0	C	7.0377E+04	0.628

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	95.20
Radio de curvatura (m)	65.53
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)	6238.2

Nota. La **figura 29** muestra el análisis de los resultados de la propuesta de diseño de pavimento flexible realizada con la alternativa WinDEPAV. Fuente: WinDEPAV2.6 (2018)

4.2.9 Evaluación del Diseño 2 por WinDEPAV 2.6

Se evaluó la estructura 2 para tráfico medio en el software WinDEPAV. El proceso de ingreso de la estructura y criterios para su análisis es el mismo, cómo se observa en la **Figura 30**.

Figura 30

Datos ingresados de la estructura 2 en WinDEPAV.

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vásquez Varela, M.Sc.

Archivo DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas): ESTRUCTURA 2

Archivo: C:\Users\User\OneDrive\Escritorio\TRAFICO MEDIO\ESTRUCTURA 2.pav

Número de capas: 2 3 4 5 6

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	C*k1*(1/E)*k3	k2	N esperado	Daño por tensión	Daño por compresión	N esperado
1	30584	0.30	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	8.8903E-13	4.9020	944937			
2	2004	0.35	20	<input type="checkbox"/>						
3	1048	0.35	30	<input checked="" type="checkbox"/>						
4	352	0.45		<input checked="" type="checkbox"/>				1.1262E-06	3.5710	944937

Carga en la superficie del pavimento: Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm): 11.50
 Distancia entre ruedas (cm): 34.50
 Presión de contacto (kgf/cm²): 4.912

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.
 Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.
 Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.
 Luis Ricardo Vásquez Varela, 2018.

Nota. La **Figura 30** muestra la pantalla principal de WinDEPAV con los datos ingresados de la estructura AASHTO para tráfico medio. Fuente: WinDEPAV2.6 (2018)

Posteriormente el software analiza la estructura de pavimentos ingresada y muestra los siguientes resultados:

Figura 31

Resultados del análisis del Diseño 2

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.													
Número de capas: 4													
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión		Factor de daño	Factor de daño				
				Épsilon T (microstrain)	N admisible	Épsilon Z (microstrain)	N admisible						
1	3.058E+04	0.30	0.00	1.703E+01	B	4.915E+00	A	367.0	B	-151.0	B		
	Continua		7.50	-1.132E+01	B	2.131E+00	B	-299.0	B	1.6795E+05	5.626	280.0	A
2	2.004E+03	0.35	7.50	2.937E-01	B	2.131E+00	B	-299.0	B			939.0	B
	Continua		27.50	-5.853E-01	C	6.547E-01	C	-342.0	C			493.0	C
3	1.048E+03	0.35	27.50	-1.377E-01	C	6.547E-01	C	-342.0	C			678.0	C
	Continua		57.50	-3.202E-01	C	2.060E-01	C	-278.0	C			399.0	C
4	3.518E+02	0.45	57.50	-1.713E-03	C	2.060E-01	C	-278.0	C			575.0	C
												4.1961E+05	2.252

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	80.67
Radio de curvatura (m)	111.55
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)	8998.9

Nota. La **figura 31** muestra los resultados de los factores de daño que se generan por fatiga y por ahuellamiento de la estructura 2. Fuente: WinDEPAV2.6 (2018)

4.2.10 Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico medio

De acuerdo a los resultados expuestos, se realizó una propuesta de diseño para tráfico medio, con el fin de que esta cumpla su desempeño durante la vida útil prevista, tomando en cuenta que de acuerdo a los resultados de fatiga y ahuellamiento la estructura necesita mayor espesor en sus capas para el buen funcionamiento y desempeño, en base a esto los espesores de pavimentos para la propuesta fueron diseñados, además de consideraciones de diseño y criterios del autor, conforme a parámetros que quiere esta alternativa. El espesor total de la estructura de pavimento es 69 cm, dimensionada de la siguiente forma:

Carpeta asfáltica e = 14 cm

Capa de base e = 25 cm

Sub-base e = 30 cm

Posteriormente, el software analiza la propuesta y muestra los siguientes resultados:

Figura 32

Resultados del análisis de la Propuesta de diseño para tráfico medio

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.														
Número de capas:		4												
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)		Sigma Z (kgf/cm ²)		Tracción (fatiga)			Compresión			
								Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	3.058E+04	0.30	0.00	1.122E+01	B	4.915E+00	A	226.0	B			-122.0	C	
	Continúa		14.00	-7.821E+00	B	9.830E-01	B	-204.0	B	1.0942E+06	0.864	170.0	B	
2	2.004E+03	0.35	14.00	-5.170E-02	C	9.830E-01	B	-204.0	B			489.0	B	
	Continúa		34.00	-4.079E-01	C	3.722E-01	C	-211.0	C			314.0	C	
3	1.048E+03	0.35	34.00	-1.173E-01	C	3.722E-01	C	-211.0	C			419.0	C	
	Continúa		59.00	-2.417E-01	C	1.601E-01	C	-210.0	C			309.0	C	
4	3.518E+02	0.45	59.00	1.886E-03	B	1.601E-01	C	-210.0	C			444.0	C	1.0564E+06 0.895

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	65.77
Radio de curvatura (m)	256.37
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)	16860.7

Salir y descartar los resultados

Nota. La **figura 29** muestra el análisis de los resultados de la propuesta de diseño para tráfico medio por WinDEPAV. **Fuente:** WinDEPAV2.6 (2018)

4.2.11 Evaluación del Diseño 3 por WinDEPAV 2.6

Se ingresó la estructura 3 diseñada por el método AASHTO 93 en el software WinDEPAV, en conjunto con los datos de los parámetros que requiere dicha alternativa, con el fin de conocer las respuestas estructurales de la interfase y el comportamiento por fatiga y ahuellamiento de la misma. **Ver Figura 33.**

Figura 33

Datos ingresados de la estructura 3 en WinDEPAV.

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vásquez Varela, M.Sc.

Archivo: DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas): ESTRUCTURA 3

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo: C:\Users\User\OneDrive\Escritorio\TRÁFICO ALTO\ESTRUCTURA 3.pav

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	C ⁴ k ¹ *(1/E) ³ k ³	k ₂	N esperado	Daño por tensión	Daño por compresión
1	30584	0.30	24	<input checked="" type="checkbox"/>	8.8903E-13	4.9020	31069888	<input type="checkbox"/>	
2	2004	0.35	30	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
3	1048	0.35	40	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
4	352	0.45		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.1262E-06 3.5710 31069888

Carga en la superficie del pavimento: Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm): 11.50
 Distancia entre ruedas (cm): 34.50
 Presión de contacto (kgf/cm²): 4.912

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.
 Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.
 Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.
 Luis Ricardo Vásquez Varela, 2018.

Nota. La **figura 33** muestra la pantalla principal de WinDEPAV con los datos ingresados de la estructura AASHTO para tráfico alto. **Fuente:** WinDEPAV2.6 (2018)

A continuación, el software analiza la estructura de pavimentos ingresada y muestra los siguientes resultados:

Figura 34

Resultados del análisis del Diseño 3

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.													
Número de capas:		4											
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)		Sigma Z (kgf/cm ²)		Tracción (fatiga)			Compresión		
								Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.058E+04	0.30	0.00	7.362E+00	B	4.915E+00	A	128.0	B			-61.2	C
			24.00	-4.089E+00	B	4.640E-01	B	-111.0	C	2.1614E+07	1.437	87.6	B
2	2.004E+03	0.35	24.00	-5.190E-02	C	4.640E-01	B	-111.0	C			240.0	B
			54.00	-1.764E-01	C	1.672E-01	C	-89.3	C			142.0	C
3	1.048E+03	0.35	54.00	-4.915E-02	C	1.672E-01	C	-89.3	C			190.0	C
			94.00	-9.769E-02	C	6.506E-02	C	-83.3	C			126.0	C
4	3.518E+02	0.45	94.00	7.342E-04	B	6.506E-02	C	-83.3	C			182.0	C
											2.5521E+07	1.217	
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)											43.15		
Radio de curvatura (m)											563.05		
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)											24293.5		
<input type="button" value="Salir y descartar los resultados"/>													

Nota. La **Figura 34** muestra las respuestas estructurales en las interfaces y la evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento del diseño 3. Fuente: *WinDEPAV2.6 (2018)*.

4.2.12 Propuesta de diseño por WinDEPAV 2.6 para tráfico alto.

Se realizó una propuesta de diseño para tráfico alto, tomando en cuenta que la estructura necesita mayor espesor en sus capas por haber presentado factores de daño por fatiga y ahuellamiento mayores a 1, en base a esto y criterios del autor se definieron los espesores del pavimento. El espesor total de la estructura de pavimento es 96.7 cm:

Carpeta asfáltica e = 26.7 cm

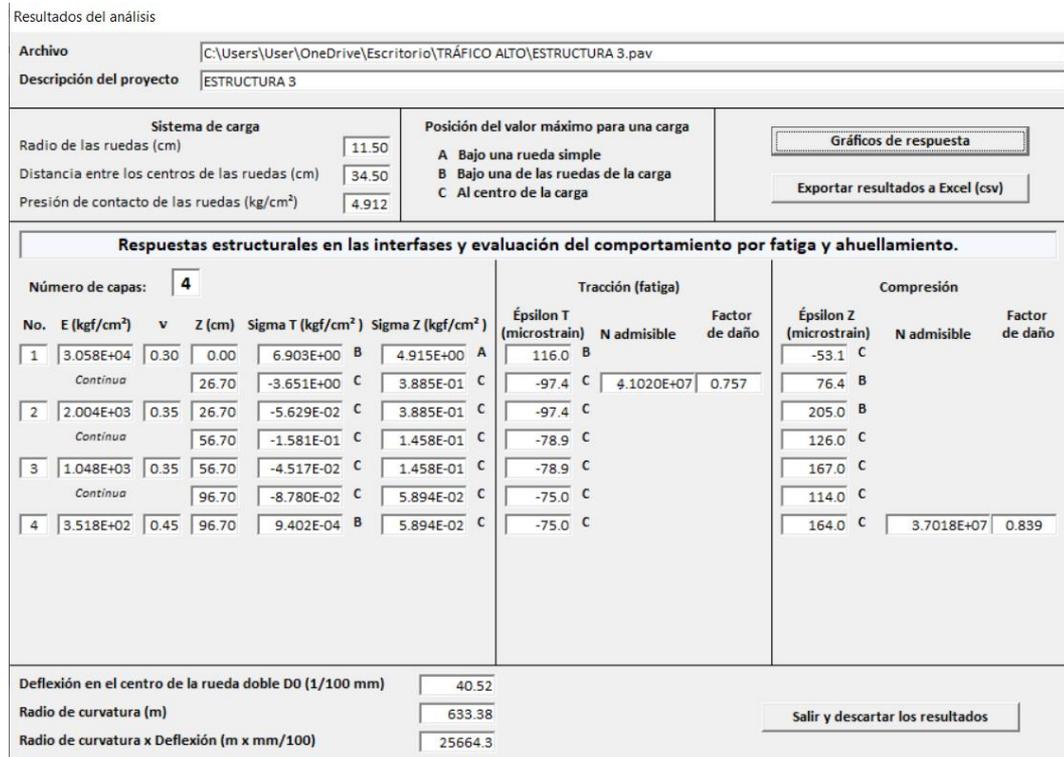
Capa de base e = 30 cm

Sub-base e = 40 cm

Posteriormente, el software analiza la propuesta ingresada y muestra los siguientes resultados:

Figura 35

Resultados del análisis de la propuesta de diseño para tráfico alto.



Nota. La **figura 35** muestra las respuestas estructurales en las interfaces y la evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento de la propuesta de diseño para tráfico alto. Fuente: *WinDEPAV2.6 (2018)*

4.3 RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA O. E3: ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPARATIVO DE RESULTADOS.

Los resultados de los diseños de pavimentos flexible para tráfico bajo (liviano) y su evaluación en los softwares del método mecanicista – empírico se representa a continuación:

Tabla 26*Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico bajo*

DISEÑOS DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA TRÁFICO BAJO			
CAPAS	AASHTO 93	IMT-PAVE	WINDEPAVE
CARPETA ASFÀLTICA	3	4	4
BASE	10	15	20
SUBBASE	20	22	20
TOTAL (cm)	33	41	44

Nota. La **Tabla 26** contiene los diseños de pavimentos flexible para tráfico bajo efectuados con los 3 métodos de diseño, el empírico tradicional y los mecanicistas.

La estructura 1 diseñada mediante el método AASHTO 93 tiene un espesor total de pavimento de 33 cm. para las condiciones y parámetros del diseño. Al ser evaluado en la alternativa del método mecanicista-empírico IMT-PAVE, no se ejecutó el análisis espectral de la fase 3, debido a que el software no admite la evaluación de la estructura de pavimento con espesores mínimos o iguales a 3 cm para la carpeta asfáltica, valor estipulado por el diseño tradicional, por tanto, indica que el pavimento no tendrá funcionalidad y desempeño por deficiencia estructural de carpeta. Modificando la estructura AASHTO, se aumentó los espesores de la estructura de pavimento con 41 cm para el nuevo diseño realizado con la alternativa IMT-PAVE, para que este tenga cumplimiento en los análisis basados en la predicción de evolución en el tiempo de los dos tipos de deterioros típicos de pavimento.

Se analizó la estructura diseñada por el método AASHTO 93 en la alternativa WinDEPAV2.6 que analiza resultados en factores daño. De acuerdo a los resultados expuestos en el análisis, manifiesto que la capa de rodadura no cumple por fatiga, puesto que, su $FD = 1.69$, indicando que hay falta de espesor, así mismo, se identifica falla por ahuellamiento, es decir, que debemos aumentar pavimento para tener factores de daño menores que 1; en base a esto se realizó una propuesta de diseño con la alternativa WinDEPAVE2.6, que obtuvo un espesor estructural de pavimento de 44 cm, para que cumpla el comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Para tráfico medio se generaron los siguientes resultados:

Tabla 27*Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico medio.*

DISEÑOS DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA TRÁFICO MEDIO			
CAPAS	AASHTO 93	IMT-PAVE	WINDEPAVE
CARPETA ASFÁLTICA	7.5	10	14
BASE	15	25	25
SUBBASE	25	30	30
TOTAL (cm)	47.5	65	69

Nota. La **Tabla 27** contiene los diseños de pavimentos flexible para tráfico medio efectuados con los 3 métodos de diseño, el empírico tradicional y los mecanicistas.

La estructura 2 de pavimento flexible para tráfico medio, con el método AASHTO 93, tiene un espesor de pavimento de 57.5 cm para soportar la carga de tránsito esperada $W18 = 944937$. Al analizarla en la alternativa IMT-PAVE presentó resultados de incumplimiento en la vida útil por fatiga y ahuellamiento, en la fase 3 y 4 de análisis espectral y probabilístico, producto de deterioro en la capa de rodadura y deformación permanente en las capas inferiores de la estructura, en particular de la subrasante durante los próximos 12 años. Se realizó el diseño de una propuesta de estructura de pavimento flexible que cumpla con los modelos de deterioro del software, obteniendo un total de espesor estructural de pavimento $e = 65$ cm.

De acuerdo a los resultados del análisis de la estructura 2 para tráfico medio en el software WinDepav, manifiesto que la estructura de pavimento presenta daño en ambos modelos deterioro, con un factor de daño por fatiga de 2.529, es decir, que la carpeta asfáltica necesita aumento de espesor de capa, y el factor de daño por ahuellamiento es 1.309 manifestando que la estructura de pavimento debe aumentar sus espesores, y en consecuencia en ambos casos el número de repeticiones esperadas será mayor al número de repeticiones admisibles en menos de 12 años. En base a lo expuesto y a criterios del autor se realizó la propuesta de diseño con esta alternativa, que, al definir los espesores, se obtuvo un resultado total de pavimento de 69 cm para que cumpla con los modelos de deterioro que expone el método.

El análisis de resultados de las estructuras de pavimentos para tráfico alto se especifica a continuación:

Tabla 28

Diseños de estructuras de pavimentos para tráfico alto (pesado)

DISEÑOS DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO PARA TRÁFICO ALTO			
CAPAS	AASHTO 93	IMT-PAVE	WINDEPAVE
CARPETA ASFÀLTICA	24	24	26.7
BASE	30	30	30
SUBBASE	40	40	40
MEJORAMIENTO	-	50	-
TOTAL (cm)	94	144	96.7

Nota. La **Tabla 28** contiene los diseños de pavimentos flexible para tráfico alto efectuados con los 3 métodos de diseño, el empírico tradicional y los mecanicistas

El espesor que se obtuvo para la estructura 3 de tráfico alto con el método AASTHO 93 es 94 cm, con esta estructura al realizar el análisis en la fase 3 en IMT.PAVE, Anexo 7, muestra resultados de cumplimiento por análisis espectral para ambos modelos de deterioro, sin embargo en el análisis probabilístico para varios modelos de carga, presenta deformación por ahuellamiento en 9 años. En consecuencia, se generó una propuesta con esta alternativa, considerando que de acuerdo a los resultados descritos, se necesita aumento de la estructura. Se enfatiza que el límite de espesor para la capa granular de base es 30 cm y para la capa de subbase es 40 cm, teniendo en cuenta esto, se tomó la decisión de incluir en el diseño mejoramiento en la subbase, con la finalidad que este cumpla con los modelos de deterioro en años y tenga durabilidad y desempeño el espesor de pavimento debe alcanzar los 1.44 metros. Los resultados de la evaluación del diseño AASHTO para tráfico alto en el software WinDEPAV, manifiestan que la estructura no cumple con la evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento, ya que en ambos presenta factores de daño mayores a uno. Se redimensionó en primera instancia el espesor de la carpeta asfáltica, viabilizandonos en obtener una estructura de pavimento flexible que no se exceda económicamente. Mediante esto se evaluó en el software y los resultados de comportamiento de la estructura por fatiga y ahuellamiento fueron cumplen con los modelos de daño que ofrece esta alternativa. Es así como el espesor de pavimento que se obtuvo es $e = 96.7$ cm.

En este último caso de diseño de pavimento para tráfico alto, se evaluó otra opción que justificó el cumplimiento de los modelos de deterioro de vida por fatiga y deformación que fue el mejoramiento en IMT-PAVE, no obstante, con la alternativa WinDEPAV por viabilización del proyecto se optó por evaluar una

estructura con mayor espesor de carpeta y mediante esto, cumplió con la funcionalidad del pavimento.

4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Dado los resultados del O.E. 1, en el que se diseñaron estructuras de pavimentos flexibles para 3 niveles de tráfico diferentes mediante el método empírico AASHTO 93, manifiesto que los espesores obtenidos fueron mínimos y funcionales para el ámbito constructivo. En comparación a lo que comenta Palacios (2017), con su tema de investigación de "Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida aplicando el método empírico – mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93", el método tradicional tienen una debilidad y es la de considerar espesores mínimos que impiden la evolución del deterioro estructural y funcional de la carpeta a lo largo de su vida útil, y en consecuencia al realizar diseños estructurales de pavimentos por el método MEPDG se obtienen mayores espesores y mejora en el desempeño del pavimento, reduciendo el deterioro estructural.

En la evaluación de los diseños de pavimentos flexibles mediante las alternativas IMT-PAVE 3.0 y WinDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, aludiendo al objetivo O.E. 2, se obtuvieron resultados de incumplimiento en sus modelos de deterioro por fatiga y deformación razón por la cual se realizó el redimensionamiento con el nuevo modelo en estudio. Haciendo referencia a estudios internacionales como el de García et al. (2014) con la aplicación de las alternativas de diseño IMT-PAVE y CR-ME para la evaluación de la estructura del pavimento, comento que los resultados de la investigación referente, realizadas en base a la MPDG (Guía de Diseño de Pavimentos Mecanicistas Empíricos), son funcionales y viables, dado que al efectuar el análisis en los softwares, cumplen con su periodo de vida útil previsto, y permiten el ingreso de parámetros de diseños reales y ajustables al medio con exigencias particulares que los hacen precisos y prácticos para el proyecto de construcción.

Sin embargo, en la presente investigación los parámetros mecánicos instaurados en los diseños como, elasticidad, y Poisson, conseguidos de tablas y ábacos, generan resultados con mayor perplejidad según el método de diseño.

En relación al estudio de Cruz y Escobar (2019) en el análisis multicapa elástico para diseño de pavimentos flexibles, mediante el software (WinDEPAV), que permiten la evaluación de la estructura mediante factores de daño, el autor manifiesta que, si hay aumento de profundidad el comportamiento de la estructura es más funcional, y en resumen a nuestros resultados la variabilidad de espesores que hubo entre el método AASHTO y al aplicar método mecanicista-empírico muestra diferencias significativas de la estructura para su buen desempeño.

En comparación a los autores Kure y Campoverde (2019), con su estudio basado en enfoques mecanicistas empíricos y método tradicional en la vía Jipijapa – La Cadena perteneciente a la provincia de Manabí, y a Palacios (2017), con su tema de investigación de “Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute – La Florida aplicando el método empírico – mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93”, presentan una misma variable en los resultados del O.E. 3, dado que existió la necesidad de aumento de los espesor tanto de la carpeta asfáltica para cumplimiento por fatiga, como de la estructura por falla por ahuellamiento, y al efectuarse dicho procedimiento como resaltan los autores externos, existen menores deformaciones en los modelos de daño, permitiéndonos efectuar el análisis comparativo y estructural de pavimento.

.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En conclusión, todos los diseños realizados por el método AASHTO 93 que fueron analizados en las alternativas del método mecanicista-empírico, presentaron falla por fatiga y ahuellamiento, independientemente de su evaluación de deterioro, por años, o por factores de daño, en consecuencia, se optó por realizar las propuestas de diseño que necesariamente para su funcionalidad y desempeño, se tuvo que aumentar los espesores de capa.
- La aplicación del software IMT-PAVE es una alternativa de resultados confiables de acuerdo al tema de estudio, dado que considera el desempeño estructural, es decir las deformaciones verticales causadas por el ahuellamiento en las multicapas de suelos y la fatiga de la carpeta asfáltica en función de la vida útil de la estructura. No obstante, el software WinDEPAV presenta mayor incertidumbre en los resultados dado que integra más parámetros mecánicos como la elasticidad y Poisson son obtenidos de tablas o ábacos, y no son como tal, valores reales de ensayo.
- Los análisis que se ejecutaron en base a la predicción de la evolución en el tiempo de los tipos de deterioro por fatiga y ahuellamiento, se realizaron con el fin de manifestar a profesionales de ingeniería que existe otra opción de diseño de pavimento flexible fundamentados en conceptos mecanicistas-empíricos, cómo es el software IMT-PAVE que permite evaluar el comportamiento de la estructura durante un periodo de diseño previsto. De igual forma la alternativa de diseño WinDEPAV que permite al usuario evaluar el diseño de pavimento flexible en base al daño acumulado por acción de cargas a lo largo del tiempo, mostrando

resultados de factores de daño por fatiga y por ahuellamiento, respuesta a las cargas de tránsito pesados, propiedades y características de los materiales, clima, con el propósito de usar estos valores de entrada en la estimación de la variable independiente de respuesta de los modelos empíricos de regresión que usa dicho método

- Los diseños de pavimentos flexibles realizados en base a conceptos mecanicistas-empíricos, presentan nuevos parámetros de diseño que permiten realizar una evaluación más precisa de la estructura. Con la alternativa IMT-PAVE, que permite realizar una caracterización más real del tránsito, ya que lo evalúa en términos de espectros de carga, a cargas legales del país o estado, con los ejes auténticos del vehículo, sencillo, dual, tándem y trídem. Con la alternativa WinDEPAV, una consideración importante es el modelo de carga, que maneja un semieje de carga, que representa una rueda doble y aplican una presión uniforme (q), que permite la estandarización para el eje de carga 8.2 Ton.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los profesionales de ingeniería, aplicar el uso de softwares basados en la nueva metodología mecanicista-empírica en sus diseños de pavimentos, que les permita obtener resultados de deformación, deflexión, y daño a través del tiempo.
- Realizar más estudios e investigaciones que integren la metodología de diseño mecanicista-empírica, para en un futuro generar una "Guía de diseño mecanicista" nacional que permita realizar los diseños de pavimento que cumplan con los modelos de deterioro y comportamiento a través de la vida de diseño prevista.
- Se recomienda que al momento de realizar diseños mediante el método AASHTO 93, no nos limitemos a espesores que cumplan con el número estructural para pavimento flexible, sino que consideremos criterios de durabilidad y funcionamiento del pavimento, y tengamos en cuenta un diseño óptimo que viabilice el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd El-Raof, H. S., Abd El-Hakim, R. T., El-Badawy, S. M., & Afify, H. A. (2020). Structural number prediction for flexible pavements using the long term pavement performance data. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(7), 841-855. doi:10.1080/10298436.2018.1511786
- Acevedo Zarate, L. K. (2022). Método Aashto y Método Shell en el Diseño de Espesores para Pavimentos Flexibles, Huancayo–Junín.
- Ahmed, A. W., & Erlingsson, S. (2015). Characterisation of heavy traffic axle load spectra for mechanistic-empirical pavement design applications. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 488-501. doi:10.1080/10298436.2014.943131
- Anguas Garnica, P., & Hernández Domínguez, R. I. J. D. T. (2013). Manual de Usuario “IMT-PAVE 1.1”. (53).
- Auqui Parra, J. C., & Ramírez Chicaiza, D. R. (2019). *Elaboración de una guía práctica para el diseño estructural de carreteras*.
- Batista Alcántara, A. R. (2014). *Chequeo de estructuras de pavimento flexible a través del software (MEPDG)*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas,
- Bonilla, G. J. T. (2004). Guía NCHRP 1-37 A. Rompiendo Paradigmas en el Diseño de Pavimentos. (7).
- Brown, S. F., Darter, M., Larson, G., Witczak, M., & El-Basyouny, M. M. (2006). Independent review of the "mechanistic-empirical pavement design guide" and software. *NCHRP research results digest*(307), 36. doi:DOI 10.17226/23219
- Bueno, L. D., Pereira, D. d. S., Specht, L. P., Nascimento, L. A. H. d., Schuster, S. L., Fritzen, M. A., . . . Back, A. H. (2022). Contribution to the mechanistic-empirical roughness prediction in asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 1-16. doi:10.1080/14680629.2022.2029758
- Castro-Vásquez, M. G., Castro-Vásquez, L. A., & Castro-Vásquez, P. G. J. P. d. C. (2020). Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido. 5(9), 640-663.

- Castro Mondragon, F., Perez Salazar, A., Garnica Anguas, P., & Hernandez Dominguez, R. J. P. T. (2021). CARACTERIZACION DE ESPECTROS DE CARGA EN LA RED CARRETERA MEXICANA. (624).
- Cedeño Cevallos, J. A. (2014). Propuesta de metodología complementaria a los diseños de pavimentos según AASHTO 93.
- Coria Gutierrez, C., Hernández Dominguez, R., & Garnica Anguas. (2018). TEORIAS PARA CALCULAR ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: UN ENFOQUE MECANICISTA. (72).
- Coronado Iturbide, J. (2002). Manual centroamericano para diseño de pavimentos. In. Guatemala: SIECA.
- Coronado, J., & Ruiz Fernández, R. (2010). *CARRETERAS, TERRITORIO E HISTORIA: UNA PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN TIPOLÓGICA*: ResearchGate.
- De Ceita Paquete, U. T. (2009). *Aplicación de conceptos empírico-mecanicistas en el diseño de pavimentos flexibles*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas,
- Dinegdae, Y. H., Onifade, I., Jelagin, D., & Birgisson, B. (2015). Mechanics-based top-down fatigue cracking initiation prediction framework for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 907-927. doi:10.1080/14680629.2015.1055335
- Escobar, L. M. M., Vasquez, L. C. G., & Gaviria, J. M. J. A. U. D. Q. (2012). Diseño de pavimento flexible y rígido.
- Francois, A., Ali, A., & Mehta, Y. (2019). Evaluating the impact of different types of stabilised bases on the overall performance of flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 938-946. doi:10.1080/10298436.2017.1366766
- García, A., Gutiérrez, F., & Hernández, J. (2014). *Análisis comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las alternativas: IMT-PAVE y CR-ME del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93*. Tesis de posgrado) Universidad de El Salvador. Facultad de ingeniería civil ...,

- Gomez Vallejos, S. J. (2014). Diseño estructural del pavimento flexible para el anillo vial del Óvalo Grau–Trujillo-La Libertad.
- Harvey, J., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Saboori, A., & Kendall, A. (2016). *Pavement life cycle assessment framework*. Retrieved from <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/38470>
- Herrera Cabrejo, D. F., & Sánchez Méndez, J. D. (2021). Verificación mediante el método racional de las alternativas estructurales de pavimentos flexibles para vías con bajos volúmenes de tránsito del Invias.
- IMT-PAVE. (2013).
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., & Romana, M. G. (2003). *Ingeniería de carreteras (v1)*: McGraw-Hill Interamericana.
- Ktari, R., Saint-Laurent, D., Hornych, P., Hammoum, F., Marsac, P., & Nguyen, M. L. (2022). Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1433-1458. doi:10.1080/10298436.2020.1806276
- Kure Hidalgo, H. J., & Campoverde Armendariz, C. A. (2019). *Diseño de la estructura de pavimento flexible de la vía E 482, de la vía la Cadena-Jipijapa por el método de AASHTO 93 y optimización por el método mecanicista, de la Prov. de Manabí*. Universidad de Guayaquil-Facultad Ciencias Matemáticas y Físicas-Carrera de ...,
- Leiva Villacorta, F. (2006). NUEVA GUÍA DE DISEÑO MECANÍSTICA-EMPÍRICA PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO (VISTAZO A LA GUÍA 2002, PROYECTO NCHRP I 37A).
- Li, Q., Xiao, D., Wang, K., Kevin Hall, & Qiu, Y. (2011). Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*, 19(2), 114-133.
- Lizcano, F. R., & Quintana, H. R. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*: ECOE ediciones.
- López Chaparro, H. S. (2015). Análisis comparativo entre diferentes metodologías de diseño para estructuras de pavimento implementando los parámetros de diseño requeridos para el corredor Mulaló-Loboguerrero.

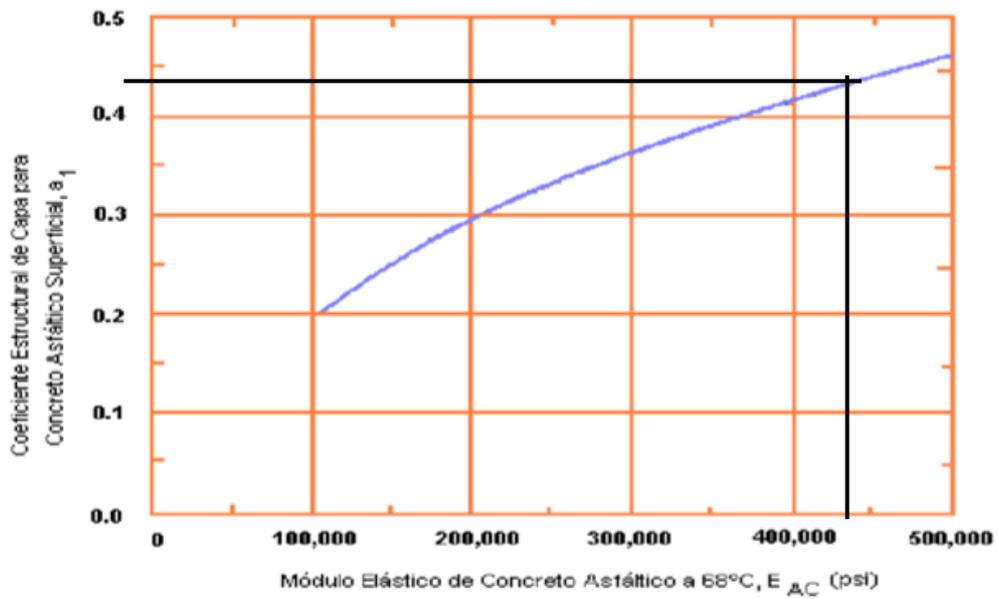
- Lu, X., Redelius, P., Soenen, H., & Thau, M. (2011). Material Characteristics of Long Lasting Asphalt Pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 12(3), 567-585. doi:10.1080/14680629.2011.9695261
- Massenlli, G. S., & de Paiva, C. E. J. I. R. c. d. i. (2019). Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia. 27(4), 613-624.
- Minaya, S., & Ordoñez, A. J. L., Perú: Instituto de la Construcción y Gerencia-ICG. (2006). Diseño moderno de pavimentos asfálticos. 2da.
- Molina, A. S. R., & López, J. A. (2020). METODOLOGÍA PARA OBTENER EL FACTOR “ESAL” DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS. 1(5), 6-6.
- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Colombia: Agora Editores.
- Morán García, I. A., & Sangoquiza Carrasco, N. E. (2018). *Análisis comparativo entre el método empírico mecanicista WIM y el empírico AASTHO para evaluar la caracterización del tránsito de la vía Guayaquil-Daule en el tramo Nobol-Pascuales*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas ..., Retrieved from <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/32839>
- MTOP. (2013). Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP. 2, 382.
- MTOP, C. t. (2013). NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES NEVI-12-MTOP
- MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR*
- 2.
- Nacional, M. d. D., & MAGAP. (2012). Generación de Geoinformación para La Gestión del territorio a nivel nacional, escala 1: 25.000.
- Officials, T. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993* (Vol. 1): Aashto.
- Palacios Carvajal, C. E. (2017). *Diseño estructural del tramo 2 de la vía Mulaute–La Florida aplicando el método empírico–mecanicista AASHTO 2008 y AASHTO 93*.

- Quintana, H. A. R., Lizcano, F. A. R., & Cotte, E. H. S. J. T. (2012). Comportamiento resiliente de materiales fino-granulares en subrasantes. *16*, 173-184.
- Rodríguez Granado, A. H. (2019). *Evaluación de pavimentos flexibles por el método Paver en la avenida J. Leopoldo Carrera Calvo del cantón La Libertad*. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2019.,
- Rahim, A. M., & George, K. P. (2005). Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(2), 89-96. doi:10.1080/10298430500131973
- Rokade, S., Agarwal, P., Shrivastava, R. J. I. J. o. E. S., & Technology. (2012). Drainage and flexible pavement performance. *4*(04), 1308-1311.
- Schliessler, A. (1992). Caminos: un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales.
- Tapia Ortega, R. S. (2016). *Evaluación Ex-Post de la implementación del programa de mantenimiento vial por niveles de servicio en la red vial estatal del Ecuador*. PUCE,
- Tatiana, C. R. J., & Camilo, E. R. C. (2019). ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOFTWARE MULTICAPA ELÁSTICO PARA EVALUACIÓN MECÁNICA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES. 99.
- Thenoux Zeballos, G. A. (1995). Evaluación técnica del pavimento y comparación de métodos de diseño de capas de refuerzo asfáltico.
- Varela, L. R. V. (2018). WinDEPEAV 2.6.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., & Wellner, F. (2005). Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials. *Road Materials and Pavement Design*, *6*(1), 31-51. doi:10.1080/14680629.2005.9689998
- WinDEPAV2.6. (2018).
- Zambrano, W. J. M. U. T. d. M. (2016). Diseño estructural de pavimentos.

ANEXOS

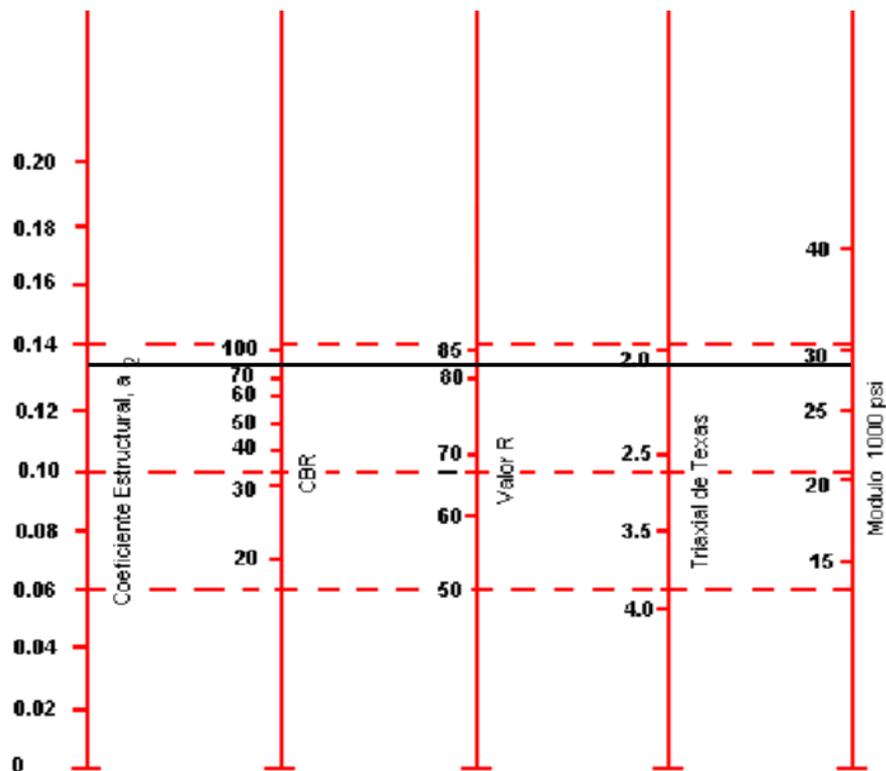
Anexo

Determinación del coeficiente estructural (a_1)



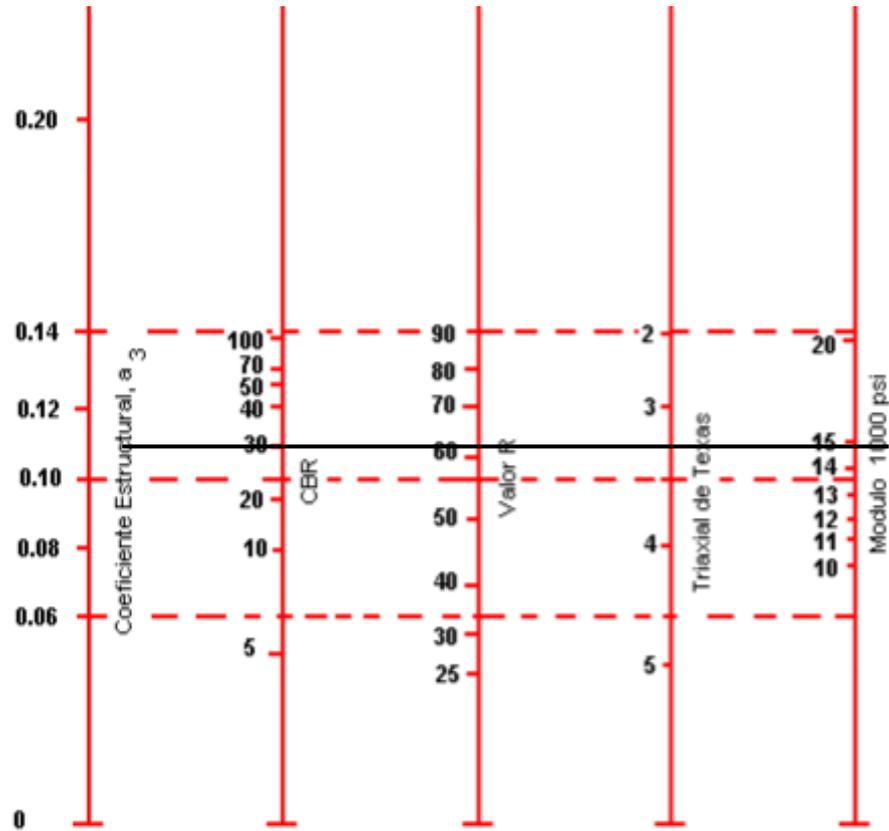
Anexo 1

Determinación del coeficiente de la capa de base granular (a_2)



Anexo 2

Determinación del coeficiente de la capa de sub-base granular (a3)



Anexo 3

Fase 3 de Análisis espectral de diseño 2.

IMT-PAVE - Ecuador

Archivo Modelos de Deterioro Herramientas

Tránsito Espectros de Carga Análisis Espectral Análisis Probabilista

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	7.5	3000
2	Base Granular	20	197
3	Sub Base	30	103
4	Capa semi-infinita		34

RESULTADOS

Vida por fatiga (años) **6.9**

Vida por deformación (años) **8.1**

Ejecuta Análisis Espectral

Anexo 4

Fase 4 de Análisis probabilista de diseño 2.

IMT-PAVE - Ecuador

Archivo Modelos de Deterioro Herramientas

Tránsito Espectros de Carga Análisis Espectral Análisis Probabilista

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica	7.5	3000	15
2	Base Granular	20	197	15
3	Sub Base	30	103	15
4	Capa semi-infinita		34	15

CONFIABILIDAD
80%

Análisis Probabilista

Reporte

RESULTADOS

Vida por fatiga (años) **4.5**

Vida por deformación (años) **6.0**

Anexo 5

Fase 3 de Análisis espectral de diseño 3.

IMT-PAVE - Ecuador

Archivo Modelos de Deterioro Herramientas

Tránsito Espectros de Carga Análisis Espectral Análisis Probabilista

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

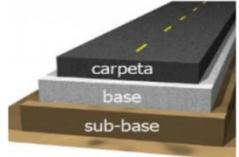
No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	24	3000
2	Base Granular	30	197
3	Sub Base	40	103
4	Capa semi-infinita		34

Ejecuta Análisis Espectral

RESULTADOS

Vida por fatiga (años) **> 15**

Vida por deformación (años) **> 15**



Anexo 6

Fase 4 de Análisis probabilista de diseño 3

IMT-PAVE - Ecuador

Archivo Modelos de Deterioro Herramientas

Tránsito Espectros de Carga Análisis Espectral **Análisis Probabilista**

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica	24	3000	15
2	Base Granular	30	197	15
3	Sub Base	40	103	15
▶ 4	Capa semi-infinita		34	15

CONFIABILIDAD
95% ▾

Análisis Probabilista

Reporte

RESULTADOS

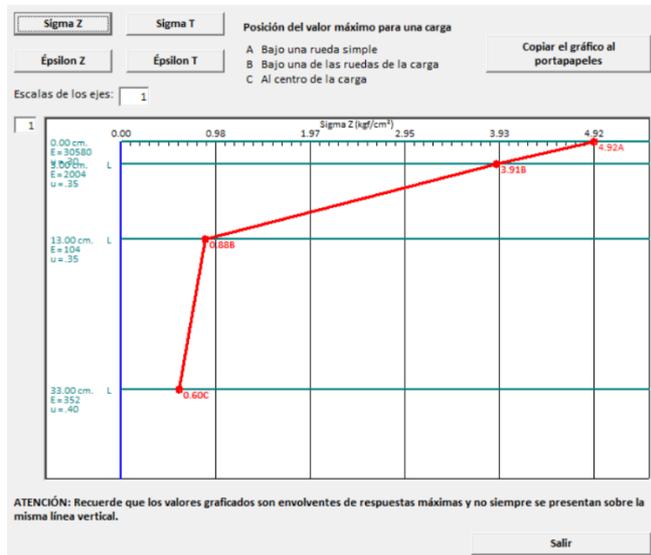
Vida por fatiga (años) **> 15**

Vida por deformación (años) **9.1**

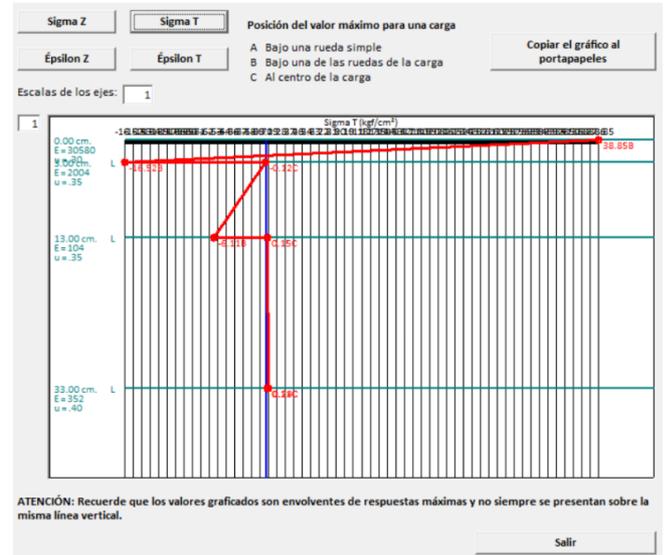
Anexo 7

Gráficos de respuestas de las interfaces – Estructura 2

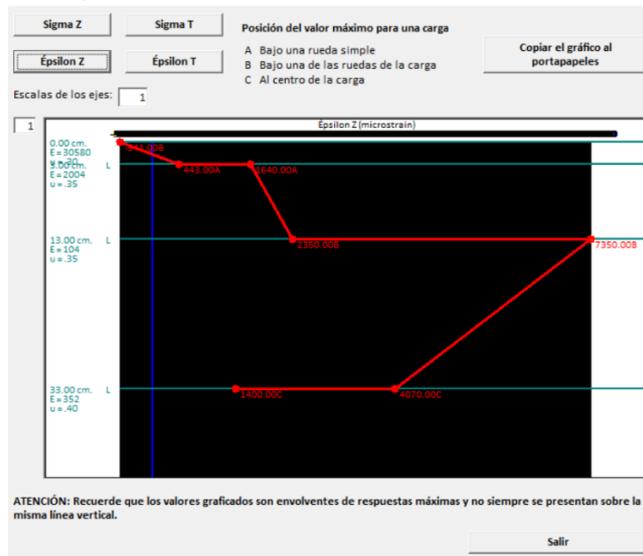
Gráficos de respuesta máxima en las interfaces



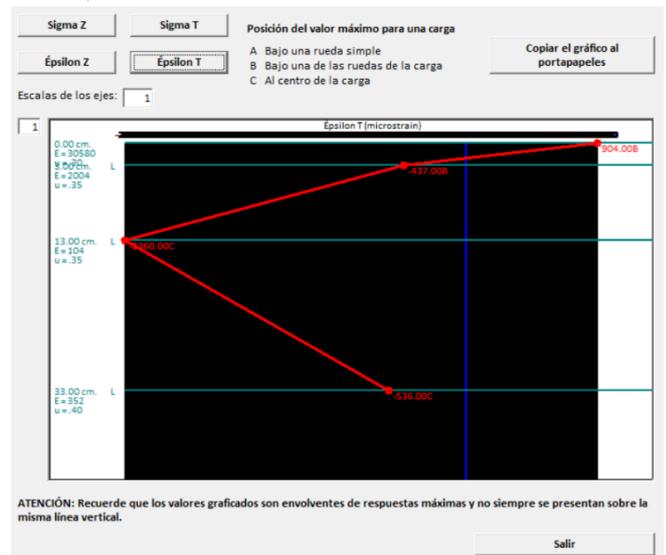
Gráficos de respuesta máxima en las interfaces



Gráficos de respuesta máxima en las interfaces

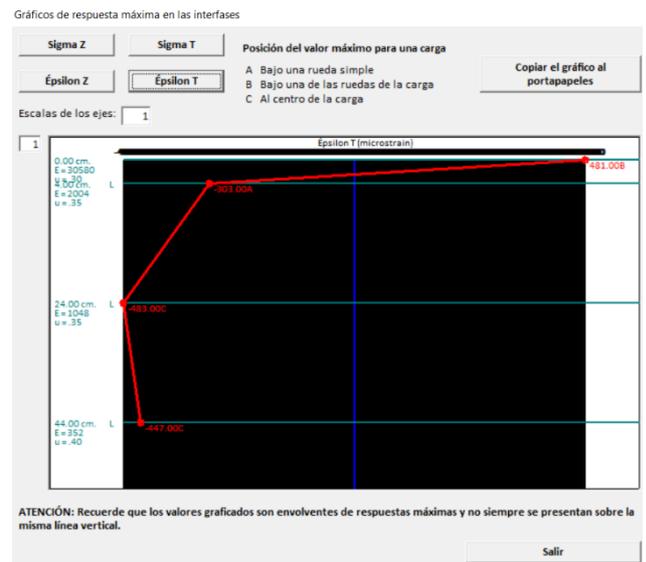
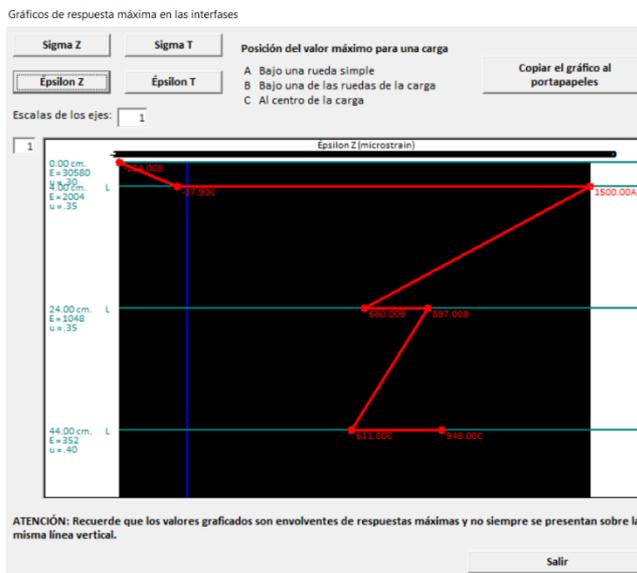
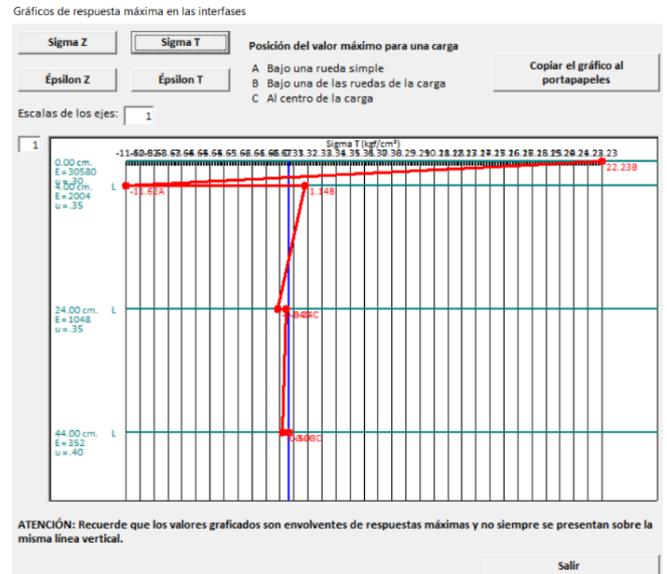
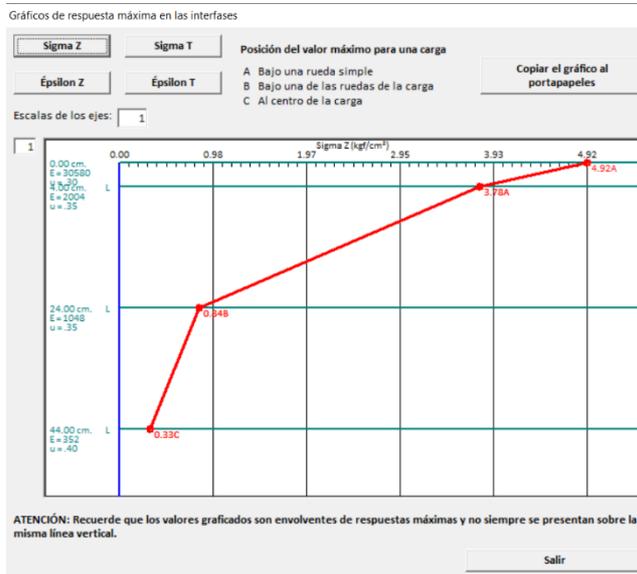


Gráficos de respuesta máxima en las interfaces



Anexo 8

Gráficos de respuestas de las interfaces – Propuesta de diseño 2



Anexo 9

Gráficos de respuestas de las interfaces – Propuesta de diseño 3

